

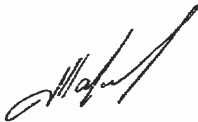
На правах рукописи

Тарасов Алексей Алексеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА
РАСХОДНОГО МАССОВОГО ГАЗСОДЕРЖАНИЯ
В ХОЛОДИЛЬНЫХ СИСТЕМАХ И УСТАНОВКАХ

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Научный руководитель
д. ф. - м. н. Zubov H. B.

МОСКВА - 2000

Официальные оппоненты : доктор технических наук,
профессор Шургальский Э.Ф.

кандидат технических наук,
доцент Гречко А.Г.

Ведущая организация: АООТ «ВНИИхолодмаш-Холдинг»

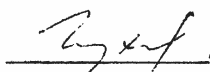
Защита состоится « 19 » июня 2000г. в 14 час. 30 мин. на заседании
Диссертационного совета К.053.15.07 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва,
Лефортовская набережная, д.1.

библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

влять по адресу: 107005, Москва,

2000г.

1566792

 / Глухов С.Д./

из № 117

Актуальность темы.

В настоящее время широкое распространение в технике получили различного рода магистрали с газожидкостными течениями и устройства на их основе. Являясь важными элементами технических систем, такие магистрали находят применение в холодильной технике, атомной энергетике, нефтехимии, химическом машиностроении, высокопроизводительной вычислительной технике.

Эффективное управление системами, включающими в себя газожидкостные (парожидкостные) тракты, в значительной степени зависит от оперативности и точности определения характеристик физических процессов, связанных с газожидкостными (парожидкостными) течениями.

Задача измерения параметров газожидкостных (парожидкостных) течений, и в первую очередь, расходного массового газосодержания (РМГС), или расходного массового паросодержания (РМПС) становится особенно актуальной в кондуктивно-испарительных системах точного охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники (ВПВТ) и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) большой мощности.

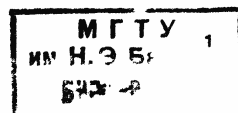
Проведенные исследования и опытные испытания супер-ЭВМ «Электроника - СС БИС» выявили существенные недостатки в работе испарительного контура системы охлаждения (СОХ), выражающиеся, в первую очередь, в нарушении температурных режимов тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), что естественным образом негативно сказывалось на надежности работы всей супер-ЭВМ в целом и определило необходимость проведения исследований.

Испарительные системы СОХ супер-ЭВМ (рис.1) имеют следующие основные особенности:

1. Схема испарительного контура представляет собой коллекторную систему параллельных каналов, вдоль которых расположены интегральные схемы, являющиеся источниками тепловыделений;
2. Каждый канал имеет индивидуальную тепловую нагрузку, колебание которой в зависимости от режима работы ИС достигает 100%;
3. Каждый канал включает в себя кроме испарительного змеевикового участка дроссель, обеспечивающий требуемое поступление хладагента (фреона R-22) и имеющий ручное управление;
4. Неполное выпаривание хладагента в змеевиках испарительной системы; РМГС на выходе из каналов в зависимости от конструктивных особенностей принимает значение в интервале 0.74-0.95.

1566792

НТВ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1566792
Разработка ме
Тарасов А.А.



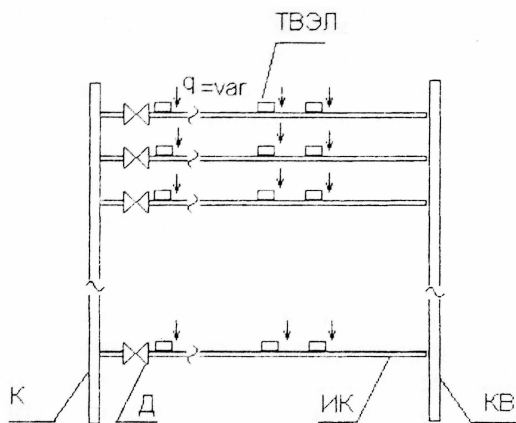


Рис. 1. Схема испарительной системы охлаждения супер-ЭВМ:
 ИК - испарительный канал, К - коллектор входной. КВ -
 коллектор выходной, Д - регулирующий дроссель, ТВЭЛ -
 тепловыделяющий элемент, q - тепловой поток от ТВЭЛа.

Одной из основных причин отказов в работе испарительной системы, выявленных при испытаниях, стало недостаточное поступление холодильного агента в отдельные каналы испарительного контура. Анализ особенностей испарительной системы и характерных отказов в ее работе показывает высокую степень теплогидравлической неустойчивости системы; обязательным требованием повышения ее эксплуатационной надежности должно стать условие ее максимальной оснащенности средствами измерения, контроля и автоматики, и в первую очередь, средствами, позволяющими проводить измерения и расчет РМПС.

Одна из основных задач эксплуатации испарительной системы заключается в том, что на выходе испарительных каналов, отводящих тепло от элементов РЭА, РМПС должно быть меньше единицы и находится в пределах 0,74 - 0,95. Это условие связано с необходимостью поддержания оптимального теплового режима тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) РЭА и исключения, так называемого кризисного кипения. Измерение РМПС на выходе испарителя обеспечит контроль над состоянием парожидкостного потока и возможность управления подачей хладагента в испарительный канал при соблюдении требований компоновки элементов РЭА.

В настоящее время используются разнообразные методы непосредственного измерения газосодержания, основанные на различных физических принципах. Однако, вследствие тех или иных недостатков, они имеют ограниченный диапазон применения и, в большинстве случаев позволяют получать значения истинного объемного газосодержания (ИОГС); при этом определение величины расходного массового газосодержания (РМГС) требует проведения дополнительных расчетов по корреляционным зависимостям на основе данных измерений ИОГС, что, естественно, приводит к дополнительной методической погрешности и делает необходимым проведение метрологического исследования, позволяющего дать реальную метрологическую оценку рассматриваемым методам измерения.

Вышесказанное подтверждает актуальность и необходимость проведения исследований в данной области, в том числе исследований, связанных с созданием новых методов расчета РМГС. В настоящей работе осуществлена разработка таких методов на основе измерений падения давления газожидкостной смеси на диафрагме.

Таким образом, мы можем сформулировать цель и задачи исследований.

Цель и задачи исследований, проводимых в работе.

Цель и тема диссертационного исследования естественным образом вытекают из общей фундаментальной проблемы, запланированной

Президиумом АН СССР (РАН) «Исследование и создание отечественной векторно-конвейерной супер-ЭВМ». Обеспечение устойчивой работы системы охлаждения супер-ЭВМ (стабильности температурного режима интегральных схем) является ключевой задачей научного исследования и ее практической реализации.

Целью диссертационной работы является создание математических моделей расчета РМГС, основанного на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме, разработка на их основе и метрологическое обеспечение методов расчета РМГС для систем охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники.

В соответствии с поставленной целью определены задачи диссертационного исследования, проводимого для условий эксплуатации СОХ ВПВТ:

1. Построить математические модели расчета РМГС, основанного на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме;
2. Разработать методы расчета РМГС, основанные на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме;
3. Провести разработку программно-аппаратного обеспечения диафрагменных методов расчета РМГС для систем охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники.
4. Разработать и провести численный эксперимент для метрологической оценки (определения погрешности) методов расчета РМГС, основанных на измерении ИОГС.
5. Разработать и провести численный эксперимент для метрологической оценки (определения погрешности) методов расчета РМГС на основе измерения падения давления газожидкостной смеси на диафрагме.
6. Провести сравнительный метрологический анализ методов расчета РМГС, основанных на измерении падения давления на диафрагме, и методов основанных на измерении ИОГС.
7. Внедрить результаты теоретического и численного экспериментального исследований в народное хозяйство России.

Поставленные цель и задачи определяют специфику работы, тема которой находится на стыке холодильной техники и ряда других научных областей - математического моделирования, теплофизики, вычислительной техники, метрологии и измерительной техники.

Положения, выносимые на защиту.

1. Обеспечение стабильного температурного режима интегральных схем в кондуктивно-испарительных системах охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники.

2. Математические модели расчета РМГС, основанные на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме.
3. Разработка методов расчета РМГС, основанных на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме для кондуктивно-испарительных систем охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники.
4. Разработка структурных схем и инструментального обеспечения диафрагменных методов расчета РМГС для возможных модификаций измерительных комплексов.
5. Разработка и реализация методов и пакета компьютерных программ численного эксперимента по определению погрешностей методов расчета РМГС, основанных на измерении ИОГС, для кондуктивно-испарительных систем охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники - «ИОГС-методы»;
6. Разработка и реализация методов и пакета компьютерных программ численного эксперимента по определению погрешностей методов расчета РМГС, основанных на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме в системах с измеряемым общим расходом газожидкостной смеси для кондуктивно-испарительных систем охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники - «Диафрагменные методы»;
7. Метрологический сравнительный анализ методов расчета РМГС, основанных на измерении ИОГС и методов, основанных на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме для кондуктивно-испарительных систем охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники.

Методы исследования. При построении моделей расчета РМГС и их метрологическом исследовании использовались как аналитические, так и численные методы.

Научная новизна. В работе получены новые математические модели расчета РМГС, описывающие процесс течения газожидкостной смеси через диафрагму и связывающие в неявном виде искомую величину РМГС с измеряемыми величинами. На основе моделей разработаны новые методы расчета РМГС (численным методом решена обратная задача). Для разработанных методов, применимых в условиях эксплуатации кондуктивно-испарительных систем охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники, а также для методов расчета РМГС, основанных на измерении ИОГС, проведено компьютерное метрологическое исследование, позволяющее определить их методическую погрешность.

Разработан пакет прикладных программ, получивших предметную реализацию в научных исследованиях.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанные методы расчета РМГС, основанные на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме, обладают по сравнению с существующими методами рядом преимуществ и, в первую очередь, такими, как точность в области высоких газосодержаний и слабой зависимостью от коэффициента скольжения фаз. Разработанные программы численного эксперимента позволяют при варьируемых значениях параметров течения и погрешностей измеряемых величин определять методическую погрешность расчетов РМГС, основанных как на измерении ИОГС, так и на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме, и оценивать таким образом область эффективного использования методов. Программы могут быть использованы в качестве метрологического обеспечения, а также для вычисления ожидаемой методической погрешности расчета РМГС для проектируемых измерительных комплексов.

Диафрагменные методы нашли применение в технических системах, эксплуатирующих парожидкостные течения и требующих регулирования и контроля РМПС (супер-ЭВМ), а также в федеральной целевой программе РФ «Интеграция» по линии учебно-научного центра «Теплофизика газодинамических систем». Использование разработанных методов позволяет значительно повысить надежность и эффективность функционирования газожидкостных систем.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации имеется 8 работ. Диссертация обсуждалась на заседании кафедры «Холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э.Баумана (рук. проф. А.М.Архаров), на постоянно действующих всероссийских семинарах отдела надежности и устойчивости систем ВЦ РАН (рук. проф. А.Н.Северцев) и отдела методов нелинейного анализа ВЦ РАН (рук. проф. Е.А. Гребеников).

Работа «Разработка и метрологическое обоснование диафрагменного метода косвенного измерения расходного массового газосодержания» на международной конференции «Передовые технологии на пороге XXI века» (1998г.), посвященной 145-летию со дня рождения В.Г. Шухова, была отмечена дипломом и медалью от правительства г. Москвы.

Объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации 237с., в т.ч. 13 рис., 17 диаграмм, 21 таблица и приложения на 78с.

Содержание работы.

Работа состоит из введения , 4-х глав, заключения и приложения.

Во введении в кратком виде освещены вопросы актуальности темы, определены задачи исследования, а также представлены в сжатом виде особенности, результаты и содержание работы.

ГЛАВА 1 посвящена метрологическому исследованию методов расчета РМГС на основе измерения ИОГС.

Проведен анализ реального положения в области измерения РМГС и ИОГС. Особое внимание уделено вопросам точности методов измерения ИОГС и их реализуемости в условиях эксплуатации СОХ супер-ЭВМ.

Определена задача метрологического исследования, а именно, как построение и анализ функциональной зависимости относительной погрешности РМГС (δx) от относительной погрешности ИОГС ($\delta \varphi$) на всем интервале возможных значений РМГС (x) от 0 до 1 : $\delta x = f(x; \delta \varphi)$; $x \in [0;1]$.

Сформулированы и обоснованы основные положения, на которых в дальнейшем строится метрологическое исследование методов расчета РМГС применительно к системам охлаждения ВПВТ:

1. При метрологическом анализе не учитываются погрешности моделей процессов, на которых основываются рассматриваемые методы расчета, а также моделей, используемых для определения величин (погрешностей величин) - аргументов исследуемых функций;
2. При метрологическом анализе не будут учитываться погрешности итераций численных методов и табличного поиска;
3. Область исследований ограничивается:
 - 1) средой - фреоном R-22
 - 2) значениями давлений - 6, 10, 14,18 бар ($K_p = 14-50$)
 - 3) выбором и анализом отдельной конкретной модели, лежащей в основе метода расчета ;
 - 4) при метрологическом анализе будем оперировать понятием относительной погрешности, вычисление которой проводится в полном диапазоне исследуемой величины РМГС; $x \in [0;1]$.

В рамках аналитического исследования ИОГС - методов расчета РМГС проведен метрологический анализ величин, от которых зависит РМГС; на основании анализа зависимость РМГС от ИОГС приведена к виду, позволяющему оценивать погрешность РМГС, как функцию измеряемых величин (в том числе косвенно измеряемых) и их погрешностей:

для $x < x_{гр} = 1 / (K_p^{1/2} + 1)$:

$$x = \frac{(x K_p + 1 - x)^{1/2} \varphi / K_p}{1 + \varphi ((x K_p + 1 - x)^{1/2} / K_p - 1)}$$

(1)

для $x > x_{гр} = 1 / (K_p^{1/2} + 1)$:

$$x = \frac{(1/K_p)^{3/4} \varphi}{1 + \varphi ((1/K_p)^{3/4} - 1)},$$

где x - РМГС;

$x_{гр}$ - граничное значение РМГС, определяющее переход от
гомогенного течения к расслоенному;

φ - ИОГС;

K_p - коэффициент плотности - $K_p = \rho_{ж} / \rho_{г}$;

$\rho_{ж}$ и $\rho_{г}$ - плотности соответственно жидкой и газовой фаз.

Характер полученной зависимости в гомогенной области ($x < x_{гр}$) требует применения методов численного программирования при расчете РМГС. В рамках аналитического исследования определены краевые условия, точки разрыва и исходные параметры для проведения численного эксперимента по определению расчетной погрешности ИОГС- методов. Для написания программ численного эксперимента был выбран язык Visual Basic for Applications (VBA) и использован пакет программных средств Excel. Разработан алгоритм построения программы численного эксперимента, в соответствии с которым написана программа «ИОГС-методы».

Работа программы заключается в вычислении относительной погрешности РМГС для каждого из 100 значений РМГС, рассчитанных по предварительно заданным на полном интервале от 0 до 1 значениям ИОГС. Программа позволяет получать и анализировать значения относительных погрешностей РМГС при варьировании задаваемыми величинами давления и относительных погрешностей коэффициента плотности (давления) и ИОГС. Результаты расчетов, в том числе и промежуточных, выводятся в виде табличных рядов, по которым построены диаграммы. Программа, таблицы и диаграммы объединены в приложении 2 «ИОГС-методы».

В качестве вывода в краткой форме приведены результаты расчетов программы метрологического исследования. Показаны высокая точность методов в гомогенной области ($x < x_{pp}$) и нелинейный рост погрешности РМГС с увеличением паросодержания. Показано, что для принятых расчетных погрешностей измерения ИОГС и давления расчетная погрешность РМГС для фреона R-22 при давлении $P=6$ бар на исследуемой части диапазона РМГС ($x \in [0,65; 0,85]$ и соответственно $\varphi \in [0,97; 0,99]$) является высокой для использования результатов расчета в кондуктивно-испарительных СОХ супер-ЭВМ векторно-конвейерного типа (табл. 1).

ГЛАВА 2 посвящена построению моделей, основанных на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме, и разработке на их основе методов расчета.

Проведено исследование моделей, описывающих процесс течения газожидкостной смеси через диафрагму. Рассмотрены различные корреляционные зависимости для параметров, корректирующие погрешности моделей, возникающие вследствие принимаемых допущений, включая допущение несжимаемости газожидкостной смеси.

Проведен метрологический анализ моделей по следующим критериям:

1. Точность описания процесса течения газожидкостной смеси через диафрагму;
2. Метрологичность модели (предварительная оценка), т.е. принципиальная допустимость проведения прямых измерений, либо вычислений на основе прямых измерений параметров, необходимых для реализации расчета РМГС;
3. Универсальность модели;
4. Возможность корректировки погрешности модели, возникающие вследствие принимаемых допущений модели.

Аналитическими методами проведены преобразования исходной модели, описывающей течение парожидкостной смеси через диафрагму, и построенной на допущении постоянства отношения скоростей фаз и скорректированной на случай течения сжимаемой парожидкостной смеси. Результатом преобразований стали математические модели - системы уравнений, однозначно определяющие в неявном виде зависимость РМГС от параметров, определяемых либо прямыми измерениями, либо вычислениями на основе их прямых измерений. Одна из разработанных моделей - модель с измеряемым общим расходом газожидкостной смеси, определяющая проблематику диссертационной работы, то есть адекватно применимая в кондуктивно-испарительных системах охлаждения ВПВТ, имеет вид:

при $x > x'$

$$\frac{\Delta P_{\text{дф}}}{\Delta P_0} = (1 - x)^2 + \frac{(\rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{г}})^{3/4} + (\rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{г}})^{1/4}}{R} x (1 - x) + \frac{\rho_{\text{ж}} x^2}{R^2 \rho_{\text{г}}} \quad (2)$$

при $x < x'$

$$\frac{\Delta P_{\text{дф}}}{\Delta P_0} = (1 - x)^2 + \frac{(1 + x)\rho_{\text{ж}}/\rho_{\text{г}} + 1 - x}{R (x\rho_{\text{ж}}/\rho_{\text{г}} + 1 - x)^{1/2}} x (1 - x) + \frac{\rho_{\text{ж}} x^2}{R^2 \rho_{\text{г}}}$$

где $\Delta P_{\text{дф}}$ - падение давления газожидкостной смеси на диафрагме;

ΔP_0 - падение давления на диафрагме при протекании через нее жидкости с общим массовым расходом газожидкостной смеси; является функцией общего массового расхода смеси и параметров диафрагмы;

R - коэффициент, учитывающий сжимаемость газожидкостной смеси на диафрагме, является функцией перепада давления на диафрагме и коэффициента политропного расширения;

$\rho_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{г}}$ - плотности жидкой и газовой фаз.

Характер полученной модели (искомый параметр РМГС выражен в неявном виде) требует для расчета РМГС применения численных методов. Проведен метрологический анализ параметров, входящих в полученную систему. В соответствии с результатами анализа построены 3 метода расчета, различия которых связаны с метрологической неоднозначностью одного из параметров - массового расхода газожидкостной смеси (падения давления газожидкостной смеси на диафрагме при протекании через нее жидкости с общим массовым расходом). При разработке методов рассматривались 3 принципиально важных для кондуктивно-испарительных систем охлаждения ВПВТ случая:

1. Массовый расход газожидкостной смеси известен;
2. Массовый расход газожидкостной смеси измеряется (рис.2.а);
3. Массовый расход газожидкостной смеси неизвестен (рис.2.б).

ГЛАВА 3 посвящена вопросам технической реализации методов расчета РМГС на основе измерения падения давления газожидкостной смеси на диафрагме в кондуктивно-испарительных СОХ ВПВТ.

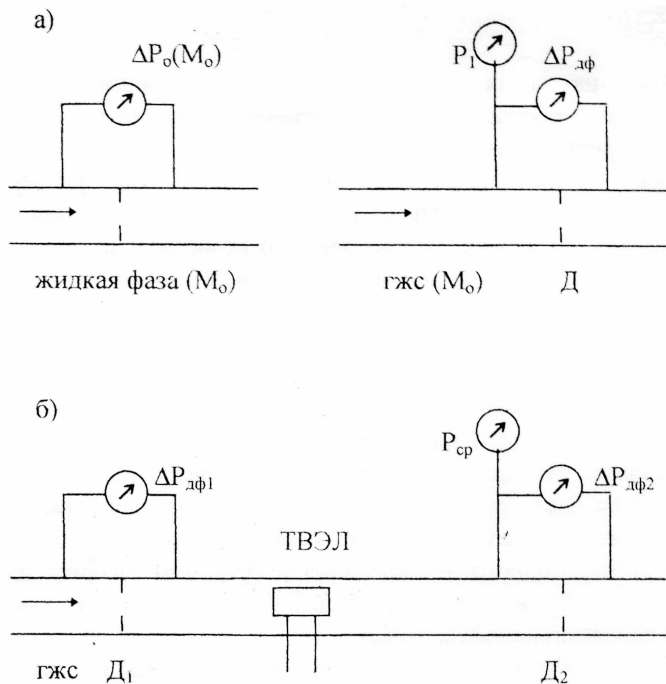


Рис.2. Схемы диафрагменных измерительных комплексов:

а) с измеряемым общим массовым расходом газожидкостной смеси (гжс); б) с неизмеряемым общим массовым расходом гжс; M_0 - общий массовый расход газожидкостной смеси; ΔP_0 - падение давления жидкой фазы текущей с общим массовым расходом газожидкостной смеси; P_1 - давление до диафрагмы; Д - диафрагма; Д₁ - первая диафрагма; Д₂ - вторая диафрагма; $\Delta P_{дф}$ - падение давления гжс на диафрагме; $\Delta P_{дф1}$ - падение давления гжс на первой диафрагме; $\Delta P_{дф2}$ - падение давления гжс на второй диафрагме; $P_{ср}$ - давление между диафрагмами; ТВЭЛ - тепловыделяющий элемент.

Предложена двухмодульная структура комплекса косвенного измерения РМГС, обеспечивающая выполнение двух основных функций - прямых измерений необходимых параметров течения и обработки поступившей и исходной информации. Отмечена универсальность разрабатываемого измерительного комплекса с точки зрения получения дополнительных расчетных параметров, что позволяет при необходимости говорить о комплексном измерении параметров газожидкостного течения.

Разработаны структурные схемы, реализующие в различных исполнениях диафрагменные методы расчета РМГС. Проведен анализ инструментальной базы для диафрагменных методов.

ГЛАВА 4 посвящена метрологическому исследованию методов расчета РМГС, основанных на измерении падения давления газожидкостной смеси на диафрагме. Проведено аналитическое исследование зависимости между падением давления газожидкостной смеси на диафрагме и РМГС, в рамках которого определены краевые условия, точки разрыва и исходные параметры компьютерного исследования. Разработан алгоритм построения программы численного эксперимента, в соответствии с которым написана программа «диафрагменные методы».

Работа программы заключается в вычислении относительной погрешности РМГС для каждого из 100 значений РМГС, рассчитанных на полном интервале от 0 до 1 по предварительно заданным значениям падения давления газожидкостной смеси на диафрагме, при принятых значениях относительных погрешностей коэффициента плотности (давления) и ИОГС для заданных условий течения (определяемых четырьмя значениями давления). Программа позволяет получать и анализировать значения относительных погрешностей РМГС при варьировании задаваемыми величинами давления и относительных погрешностей коэффициента плотности (давления), расходного параметра и падения давления газожидкостной смеси на диафрагме. Программа, таблицы и диаграммы объединены в приложении 3 «Диафрагменные методы».

Результаты расчетов показывают низкую эффективность методов в гомогенной области ($x < x_{гр}$) и высокую - в области раздельного течения. При значениях РМГС от 0,2-0,3 до 1 наблюдается практически линейное снижение погрешности РМГС. Показано, что для фреона R-22 при давлении $P=6$ бар погрешность РМГС на большей части диапазона РМГС в области раздельного течения, включая диапазон докритического кипения ($x \in [0,65; 0,85]$), является достаточно низкой для целей использования результатов расчетов в кондуктивно-испарительных системах охлаждения ВГВТ. Для

ТАБЛИЦА 1
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО
ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСЧЕТА РМГС НА ОСНОВЕ ИОГС - И
ДИАФРАГМЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ФРЕОНА R-22 ПРИ ДАВЛЕНИИ P=6 БАР НА
ИНТЕРВАЛАХ ЗНАЧЕНИЙ:

$X=0.2-0.65$ ($\varphi=0.82-0.97$)

$X=0.65-0.85$ ($\varphi=0.97-0.99$)

Ин- тер- вал изме- рения ИОГС	Погрешность измерения параметров $\delta(\Delta P_{df})$, $\delta(\Delta P_0)$, δP , %	ПОГРЕШНОСТЬ РМГС, ПОЛУЧЕННОГО ДИАФРАГМЕННЫМ МЕТОДОМ		МИНИМАЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ РМГС (БЕЗ УЧЕТА ПОГРЕШНОСТИ МОДЕЛИ), ПОЛУЧЕННОГО ИОГС- МЕТОДОМ		
		РАСЧЕТНАЯ $\delta_{рас}(x)=f(\delta P,$ $\delta(\Delta P_{df}), \delta(\Delta P_{ж})), \%$	МАКСИМАЛЬНАЯ (с учетом погрешнос- ти модели) $\delta_{max}(x)=\delta_m+\delta_{рас}(x), \%$	$\delta_{min}(x)=f(\delta P, \delta(\varphi)) , \%$		
				$\delta(\varphi) =0,5\%$	$\delta(\varphi) =1\%$	$\delta(\varphi) =2\%$
0.82-	1	2.9 - 2.1	7.9 - 7.1	3.1- 7.0	5.6-14.0	10.4-31.6
0.97	2	5.8- 4.3	10.8 - 9.3	3.9- 7.1	6.3-14.6	11.3-31.8
	3	8.8- 6.5	13.8 - 11.5	4.7-7.3	7.1-15.1	12.1-32.0
0.97-	1	2.1-2.0	7.1-7.0	7.0-8.5	14.0-18.0	31.6-(44.5)
0.99	2	4.3-4.1	9.3-9.1	7.1-8.7	14.6-18.5	31.8-(45.0)
	3	6.5-6.2	11.5-11.2	7.3-8.9	15.0-19.1	32.0-(45.5)

данных условий (в интервале значений РМГС 0,65-0,85 для фреона R-22 при давлении 6 бар) расчетная погрешность метода составляет - 2-2,1% (с учетом погрешности модели 7-7,1%) при погрешностях измерения параметров на уровне 1%, и - 4,1-4,3% (с учетом погрешности модели 9,1-9,2%) при погрешностях измерения параметров на уровне 2% (табл.1).

Сравнительный анализ результатов проведенных численных экспериментов - расчетов программ метрологического исследования - «ИОГС-методы» и «Диафрагменные методы» - показал метрологические преимущества методов расчета РМГС, основанных на измерении падения давления на диафрагме, по сравнению с методами, основанными на измерении ИОГС, на интервале значений РМГС фреона R-22 ($x \in [0,65; 0,85]$) при давлении $P=6$ бар, то есть для условий эксплуатации кондуктивно-испарительных систем охлаждения ВПВТ. Метрологические преимущества методов расчета РМГС, основанных на измерении падения давления на диафрагме, сохраняются для рассматриваемых условий и с учетом погрешности исходной модели (таблица 1).

В приложение вошли рекомендации по стабилизации режимов работы системы охлаждения процессорной стойки и автоматизации запуска процессора изделия «Антей» (приложение 1), книга «ИОГС-методы», включающая в себя программу «ИОГС-методы», построенные программой таблицы и диаграммы (приложение 2), книга «Диафрагменные методы», аналогичным образом объединяющая программу «Диафрагменные методы», таблицы и диаграммы (приложение 3) и структурные схемы диафрагмовых измерительных комплексов (приложение 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Для решения задачи стабилизации температурного режима тепловыделяющих элементов в системах охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники в работе получены следующие результаты :

1. Представлены рекомендации по стабилизации температурных режимов тепловыделяющих элементов в кондуктивно-испарительных системах охлаждения супер-ЭВМ векторно-конвейерного типа; результаты внедрены при отладке и опытной прогонке системы охлаждения супер-ЭВМ на экспериментальном стенде завода «Кварц».

2. На основе корреляций Чисхолма для течений газожидкостных сред через диафрагму построены математические модели расчета РМГС. Модели построены для газожидкостных систем с измеряемым расходом жидкой фазы; с измеряемым общим массовым расходом газожидко-

стной смеси; модель для нестационарного режима течения (модель с не измеряемым расходом).

3. На основе модели с измеряемым общим массовым расходом, разработаны методы расчета РМГС, реализуемые как в стационарных, так и нестационарных условиях течения газожидкостной смеси (решена обратная задача). В общем случае методы предполагают проведение измерений давления, падения давления газожидкостной смеси на диафрагме и падения давления на диафрагме при течении жидкой фазы с общим массовым расходом (измерение общего массового расхода).

4. Построены структурные схемы комплексов косвенного измерения РМГС, учитывающие различные варианты реализации диафрагменных методов в кондуктивно-испарительных системах охлаждения ВПВТ.

5. Разработан и реализован пакет компьютерных программ численного эксперимента по определению погрешностей методов расчета РМГС, основанных на измерении ИОГС - «ИОГС-методы»; отмечена высокая эффективность методов в гомогенной области и в области высоких давлений; показана низкая точность данных методов в области докризисного кипения в кондуктивно-испарительных системах охлаждения ВПВТ (для значений РМГС от 0,65 до 0,85 при давлении $P=6$ бар для фреона R-22); для данных условий расчетная погрешность метода находится в пределах 7-8,5% при относительной погрешности ИОГС $\Delta\varphi=0,5\%$ и давления $\Delta P=1\%$;

6. Разработан и реализован пакет компьютерных программ численного эксперимента для метрологического обоснования диафрагменных методов расчета РМГС - «Диафрагменные методы»; показано, что для условий эксплуатации кондуктивно-испарительных систем охлаждения супер-ЭВМ (в интервале значений РМГС 0,65-0,85 для фреона R-22 при давлении 6 бар) расчетная погрешность метода составляет - 2-2,1% при погрешностях измерения параметров на уровне 1%, и - 4,1-4,3% при погрешностях измерения параметров на уровне 2%.

7. На основании анализа расчетных результатов программ «ИОГС-методы» и «Диафрагменные методы» получено метрологическое обоснование методов расчета РМГС, основанных на измерении падения давления на диафрагме, для условий эксплуатации кондуктивно-испарительных систем охлаждения супер-ЭВМ (в интервале значений РМГС 0,65-0,85 для фреона R-22 при давлении 6 бар); в гомогенной области, равно как и при высоких давлениях, метрологическая эффективность ИОГС-методов расчета РМГС выше.

Результаты, полученные в работе, позволяют сделать вывод об эффективности предложенных методов расчета РМГС, получивших реализацию в системах охлаждения супер-ЭВМ векторно-конвейерного типа.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зубов Н.В., Протасов А.Н., Тарасов А.А. Аналитические методы обеспечения надежности теплообменной аппаратуры на этапе проектирования // Вопросы кибернетики (М.).- 1991.- 1-4655.-С. 43-51.
2. Зубов Н.В., Тарасов А.А., Протасов А.Н. Вопросы повышения надежности одноконтурных систем охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники на стадии проектирования //Вопросы кибернетики (М.).- 1991.- 1-4655.-С. 51-61.
3. Метрологическое моделирование обеспечения процесса безопасности течения газожидкостных сред через диафрагму / Н.В. Зубов, А.В. Мухин, А.А. Тарасов, А.А. Голубев // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем.- М.: ВЦ РАН, 1999.-С. 73-82.
4. Моделирование надежности систем с П-структурой / А.В. Мухин, О.П. Сахарова, В.И. Водолазский, А.А. Тарасов //Вопросы теории безопасности и устойчивости систем.- М.: ВЦ РАН, 1999.-С. 106-114.
5. Северцев Н.А., Зубов Н.В., Тарасов А.А. Разработка и метрологическое обоснование диафрагменного метода косвенного измерения расходного массового газосодержания// Передовые технологии на пороге XXI века: Тез. докл. Межд. конф.- М., 1998.-С.290-292.
6. Северцев Н.А., Зубов Н.В., Тарасов А.А. Вопросы эффективного управления системами с парожидкостными магистралями // Процессы горения и охрана окружающей среды: Сб. трудов Всероссийск. научно-технич. конф.- Рыбинск, 1997.-Ч.1.-С. 54-58.
7. Северцев Н.А., Зубов Н.В., Тарасов А.А. Косвенные методы измерения параметров двухфазных потоков в стационарных и нестационарных условиях. - М., 1991.-5с. (Деп. в ВИНТИ, № 3324-В91).
8. Разработка математических моделей теплофизических процессов в перспективных системах охлаждения суперЭВМ с анализом устойчивости и надежности их функционирования: Отчет по теме «Встроенная надежность и эффективность вычислительных комплексов»/Институт проблем кибернетики АН СССР. Рук. темы Северцев Н.А., исп. Зубов Н.В., Тарасов А.А., Протасов А.Н., Шаталов А.Б.; № ГР 0189.0 068367; Инв. №1.2-05-89/49.-М., 1989.- 202с.