

Автореферат Н
Л 68

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

Лобачёв Станислав Степанович

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И РАЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ
ПРЯМОТОЧНЫХ ХЛАДОНОВЫХ СИСТЕМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Специальность 05.14.05 - теоретические основы
теплотехники и 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-1991

Работа выполнена в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Смирнов Г.Ф.
Научный консультант: кандидат технических наук,
доцент Резников Г.В.
Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Милованов В.И.
доктор технических наук
Горохов С.М.

Ведущая организация: научно-исследовательский институт "Шторм".

Защита состоится 27 мая 1991г. в 11 часов на заседании специализированного Совета К.068.27.01 при Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики по адресу: 270056, г.Одесса, ул.Петра Великого, 1/3, ученый Совет ОИНТЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИНТЭ.

Автореферат разослан 27 апреля 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета  Р.К.Никольшин

15.03.91

Лист

XV 1248
Институт холода
ОМАКТ
Библиотека

- 3 -

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Решение проблемы термостатирования больших высокопроизводительных ЭВМ и суперЭВМ связано с возрастанием тепловыделений на поверхности их электронных элементов от 6 до 80 кВт/м². Поэтому разработка эффективных систем охлаждения термостатирования непосредственно влияет на такие их важнейшие показатели, как плотность компоновки, потребляемая мощность, быстродействие, надежность и др. Перспективными в этом плане представляются прямоточные системы, отвод теплоты в которых происходит при фазовых превращениях хладагента.

Сложность, многообразие и многопараметричность прямоточных хладодонных систем (ПХС) определяют математическое моделирование в сочетании с ограниченным натурным экспериментом как наиболее эффективный способ их разработки. Необычные условия работы пароконденсационных холодильных установок (ПХУ) применительно к обеспечению тепловых режимов ЭВМ такие, как жесткие требования к равномерности температуры рабочих поверхностей в широком диапазоне изменения тепловых нагрузок и температур окружающей среды, дискретное расположение тепловыделяющих элементов, высокие скорости изменения тепловых нагрузок (на несколько порядков превышают таковые для холодильных установок промышленного назначения), определяют необходимость нахождения новых схемных и конструктивных решений этих систем.

Известные из литературы результаты исследований ПХУ промышленного назначения не представляют возможности их непосредственного использования в нетрадиционных областях применения искусственного холода, в частности, для анализа прямоточных хладодонных систем термостатирования (ПХСТ) изделий электронной промышленности и выбора их рационального схемного решения.

Цель работы: построить эффективные методы изучения и выбора рациональных тепловых режимов и схем пароконденсационных холодильных установок и ПХСТ на их основе и приложить их к решению конкретной проблемы создания отечественной суперЭВМ с хладодонным охлаждением.

Научную новизну диссертации составили следующие основные результаты: 1) комплекс математических моделей элементов ПХУ, объединенных в обобщенную модель расчета статических характеристик и реализованных как пакет программ; 2) методика построения обобщенных математических моделей, основанная на известном применении теории графов для формирования сложных систем и обеспечивающая исследование на ЭВМ различных схемных решений; 3) данные численных исследований статических характеристик известных и оригинальных схем ПХС, обеспечивающих требования по термостатированию изделий электронной

техники; 4) данные экспериментальных исследований тепловых режимов двух альтернативных вариантов ПХСТ суперЭВМ и их составных элементов.

Практическая ценность. Результаты комплексного исследования статических характеристик ПХСТ позволили: 1) определить область эффективного использования традиционной ПХСТ для обеспечения нормальных тепловых режимов объекта (процессора, оперативного запоминающего устройства суперЭВМ и др.) и возможности расширения ее сферы применения; 2) определить степень соответствия техническому заданию на проектирование модифицированной ПХСТ, а также ее характеристики на нерасчетных режимах работы; использовать рекомендации для доводки испытуемого образца и его последующей эффективной эксплуатации в составе ПХСТ суперЭВМ; 3) использовать разработанные методы, алгоритмы и пакет программ для сравнительного анализа схемных решений ПХСТ обеспечения тепловых режимов объектов различной природы.

Научное положение. Эффективные тепловые режимы ПХС, используемой как основное средство обеспечения нормальных температурных условий функционирования вычислительных комплексов и суперЭВМ, обеспечиваются при исключении традиционных регуляторов прямого действия типа TRV и применении совмещенных конденсаторов-доиспарителей (трехточечных теплообменников).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: У республиканской конференции "Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств" (Днепропетровск, 1980 г.), IV всесоюзной конференции "Математическое моделирование сложных химико-технологических систем" (Одесса, 1985 г.), ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников ОИИТЭ и ОТИПШ им.М.В.Ломоносова (Одесса, 1985-89 гг.), III республиканской школе "Математическое моделирование, системный анализ и оптимизация химико-технологических процессов, энерго-технологических и теплоэнергетических аппаратов и систем" (Киев-Бердянск, 1989 г.), всесоюзных научно-практических конференциях "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса" (Кшинов, 1987г. и Одесса, 1989 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 работ.

Автор защищает: 1) результаты комплексных исследований статических характеристик лабораторной модели и натуральных образцов ПХСТ суперЭВМ, а также область режимных параметров, обеспечивающих требуемое качество термостатирования; 2) метод генерирования на ЭВМ схем ПХСТ различной структурной организации, критерии и выбор их рациональных схем; 3) алгоритмы и пакет программ поверочного расчета ПХСТ с разветвленной системой испарительных каналов, включая и орга-

ны регулирования; 4) алгоритм и программу расчета теоретических холодильных циклов для определенной номенклатуры хладагентов на основе уравнений состояния единого вида; 5) рекомендации по конструкторской доработке и эксплуатации модифицированной ПХСТ суперЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и предложений. Работа изложена на 133 стр. машинописного текста, содержит 38 рисунков, 14 таблиц, список литературы из 104 наименований, приложения на 65 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ работ, посвященных математическому моделированию ПХС и реализации полученных моделей на ЭВМ, а также экспериментальному изучению систем охлаждения объектов различной природы. Систематизированы подходы к анализу характеристик одноступенчатых ПХУ, принципы формирования и сравнения схемных решений, а также методы оптимизации аппаратов, агрегатов и холодильных установок, содержащиеся в разработках ЛИИП, ВНИИхолодмаша, ВНИИкриохолодмаша, ОИИТЭ и др.

Отмечено отсутствие работ, в которых бы с позиций системного анализа, в соответствии с требованиями теплового конструирования объекта, в частности, электронного оборудования ставились и решались на ЭВМ задачи исследования характеристик испарительных систем, определялись критерии надежности и выбора на их основе рациональных схем ПХС. Не известны работы, в которых осуществлены принципы автоматизированного формирования и реализации математических моделей ПХС, в том числе для условий жестких ограничений на показатели качества термостатирования. На основании анализа литературных данных обоснованы задачи исследования.

Во второй главе приведены исходные положения и сформулированы задачи исследования ПХСТ различной структуры. Построены соответствующие математические модели, проведены декомпозиция и редукция.

В результате анализа альтернативных схем ПХУ, технически реализуемых и целесообразных с точки зрения их применения как основы ПХСТ суперЭВМ, были сформулированы гипотетическая схема и соответствующий мультиграф, множеством элементов которых явилось пересечение множества всех рассмотренных схем, а также возможные элементы расширения их номенклатуры на перспективу (насосно-циркуляционный, компрессорно-насосная и др.). Выделение из мультиграфа подграфа конкретной системы ПХС производили с помощью преобразований над матрицей инцидентий. Таким образом были сформированы модели более десяти альтернативных схем ПХСТ, некоторые из них изображены на рис. 1,2.

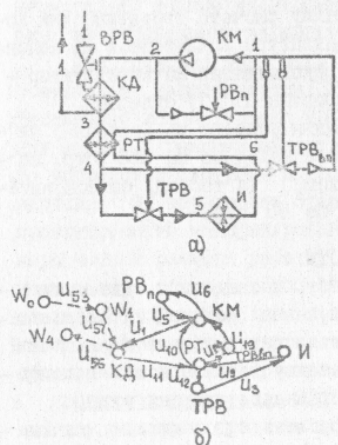


Рис. 1. Принципиальная схема традиционной ПХС (а) и потоковый граф (б)

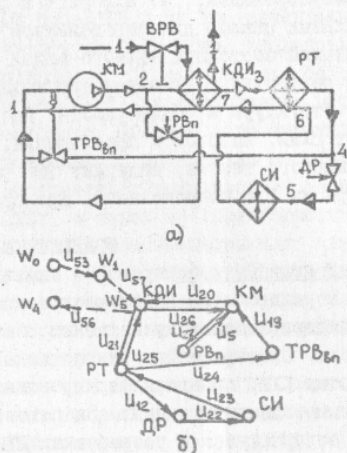


Рис. 2. Принципиальная схема модифицированной ПХС (а) и потоковый граф (б)

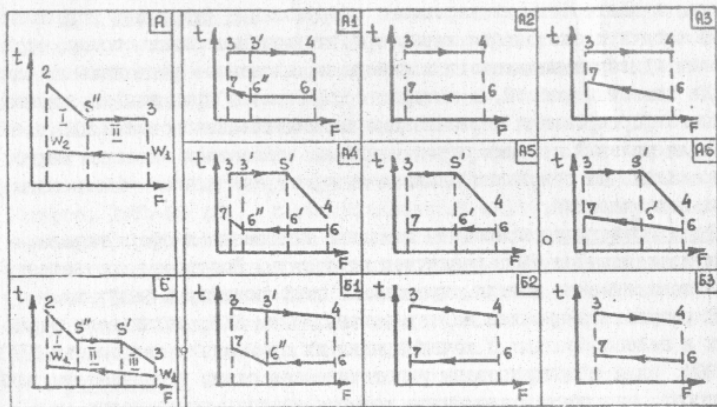


Рис. 3. Температурные диаграммы процессов в конденсаторе и регенеративном теплообменнике

В основу математических моделей элементов ПХСТ были положены уравнения сохранения энергии и массы хладагента, а также уравнения тепло- и массопередачи. Редукция моделей проводилась с целью сведения задач к решению в сосредоточенных параметрах для каждой представительной ячейки элемента. Для теплообменных аппаратов таковыми ячейками являлись зоны, ограниченные кривыми фазовых переходов (рис.3). Элементы и их модели исследуемых ПХСТ составили банк из более тридцати наименований.

Математическая модель испарителя сформулирована в общем виде, содержит варианты процессов теплообмена с граничными условиями первого, второго и третьего родов, а также со смешанными условиями, в том числе для случая дискретного расположения теплообменных элементов, что типично для электронных блоков. Расчет проводили для трехзонной модели испарителя: зон перегрева, ухудшенного теплообмена и кипения. Расчетные уравнения описывали, в частности, испаритель, отбирающий тепло от теплоносителя в процессе конвективного теплообмена. Если скорость теплоносителя невысока, например, скорость окружающего воздуха в шкафах суперВЭМ, то коэффициенты теплопередачи по указанным зонам определялись значениями коэффициентов теплоотдачи со стороны хладагента $k_i = \alpha_i$, $i = 1, 2, 3$, а уравнения определяли температуры стенки в соответствующих точках.

Потери давления хладагента в условиях внутритрубного кипения рассчитывались по нормативному методу, исходя из предположения о гомогенной структуре потока. Решалась также задача потокораспределения хладагента для системы параллельных каналов с неравномерной и независимой тепловой нагрузкой с учетом возможности отключения каналов. При этом в зависимости от значения $\alpha_{\text{вых}} < \alpha_{\text{гр}} < 1$, учитывалось ухудшение теплообмена, что связано с развитием кризисных явлений при кипении хладагента в плоских змеевиковых каналах. Учитывались также наличие и влияние на гидравлику системы каналов регуляторов давления кипения "до себя" (РПД). Задачи потокораспределения ставились и решались совместно с Э.И.Альтман. Значения расходов по каналам определялись из квадратного уравнения

$$\Delta P_{\text{ск}}^* = (A_{ij} + \Delta A_{ij}) G_{ij}^2 + B_{ij} Q_{ij} G_{ij}, \quad (I)$$

где $A_{ij} = [(\sum_{\kappa} \xi_{\kappa}) + \lambda \frac{L}{d_3}]_{ij} \frac{1}{f^2} \times [\frac{1 + \alpha_{\text{вх}}(\rho'/\rho'' - 1)}{2\rho'}]_{ij}$

и $B_{ij} = [(\sum_{\kappa} \xi_{\kappa}) + \lambda \frac{L}{d_3}]_{ij} \frac{1}{f^2} \times [\frac{\rho'/\rho'' - 1}{4\rho'}]_{ij}$ коэффициенты, а

$\Delta A_{ij} = \xi_{ij} \left[\frac{1 + \alpha_{6k} (\rho'/\rho'' - 1)}{2f^2 \rho'} \right]_{ij}$ - комплекс, характеризующий сопротивление регулирующего вентиля (дросселирующего устройства); $i = \overline{1, n}$ - число каналов (блоков) в одном модуле; $j = \overline{1, m}$ - число модулей функционального устройства суперЭВМ.

Значение расхода по группе модулей, регулируемой РПД, находилось из решения системы уравнений

$$G_{ск} = \frac{\Delta P_c - \Delta P_{ск}^* \left(\frac{\partial P_{ск}}{\partial G_{ск}} \Big|_{G_{ск}^*} \right) \cdot G_{ск}^* - \Delta P_{РПД}^{max}}{\frac{\partial P_{ск}}{\partial G_{ск}} \Big|_{G_{ск}^*} - \frac{\Delta P_{РПД}}{G_{РПД}^0}}, \quad (2)$$

$$\Delta P_c = \frac{G_{км} - \sum_k \left[\left(\frac{\partial P_{ск}}{\partial G_{ск}} \Big|_{G_{ск}^*} \right) \cdot G_{ск}^* - \Delta P_{ск}^* - \Delta P_{РПД}^{max} \right]_k / \left[\frac{\partial P_{ск}}{\partial G_{ск}} \Big|_{G_{ск}^*} - \frac{\Delta P_{РПД}}{G_{РПД}^0} \right]_k}{\sum_k 1 / \left[\frac{\partial P_{ск}}{\partial G_{ск}} \Big|_{G_{ск}^*} - \frac{\Delta P_{РПД}}{G_{РПД}^0} \right]_k}; \quad (3)$$

где ΔP_c - значение перепада давлений по всему устройству, например, процессору суперЭВМ. Значение потерь давления по каждой его группе модулей $\Delta P_{ск}^*$ определялось прямым поиском из условия $G_{ск} = \sum_j G_{ij} + \delta_{\epsilon}$, а коэффициент разложения в ряд Тейлора $\frac{\partial P_{ск}}{\partial G_{ск}} \Big|_{G_{ск}^*}$ - на основании опытных данных. Органы регулирования для рассматриваемой ПХСТ являлись регуляторами прямого действия реализовывали П-закон регулирования, их статические характеристики описывались линейными зависимостями. В частности, для регулятора давления кипения была принята модель

$$\frac{\Delta P_{РПД}^{max} - \Delta P_{РПД}}{\Delta P_{РПД}^{max}} = \frac{G_{РПД}}{G_{РПД}^0}. \quad (4)$$

Формулировка общей задачи определялась спецификой прямооточных ПХСТ, отмеченных ранее,

$$J = \min_{t_a, t_k} (Q_o^{расч} - Q_o^{треб})^2, \quad (5)$$

$$Y = F(X) \quad (6), \quad H(X, Y) = 0, \quad (7)$$

где $X = (t_{6k}, P_{6k}, l_{6k}, G_{a6k})$ и $Y = (t_{6k}, P_{6k}, l_{6k}, G_{a6k})$ - векторы входных и

выходных режимных параметров; подсистема (6) - обобщенная запись системы нелинейных уравнений модели ПХСТ; $H(X, Y)$ - подсистема ограничений на режимные параметры, а также производных от них величин. Такими ограничениями являлись, например: $\alpha_{6k} < \alpha_{гр}$ - условие докритического протекания процесса кипения, определяющее качество термостатирования, $t_{6c} > t_s(P_{6c})$ и $t_u < t_k$ - ограничения по перегреву и переохлаждению хладагента, определяющие надежную работу ПХСТ, и др.

Термодинамические свойства используемых рабочих веществ описывались с использованием уравнений, предложенных И.И.Перельштейном и Е.Б.Парушиным и распространяемых на агенты метанового, этанового ряда, аммиака и др.

Задача (4)-(6) сформулирована как обратная, результатом ее решения, помимо параметров состояния хладагента в характерных точках цикла, являлись значения нижнего и верхнего температурных уровней, что в свою очередь, определяло настройку соответствующих органов регулирования.

В работе показано, что сходимость процесса расчета ПХСТ является безусловной для схем, соответствующий граф которых содержит не более трех независимых подконтуров.

Разработанная математическая модель является открытой, в работе показана возможность генерирования других, отличных от рассмотренных вариантов схем ПХСТ.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям, проведенным на натурных образцах традиционной и модифицированной ПХСТ с целью проверки корректности разработанных математических моделей. На рис.4 представлена схема модифицированной стойки охлаждения УОХ-32 устройств суперЭВМ. В схему УОХ-32 введен трехточечный теплообменник, предназначенный для довыпаривания и перегрева хладагента. Проверка его работоспособности была выполнена на лабораторном стенде.

Одной из задач, поставленных и решенных в ходе экспериментальных исследований, явилось определение (уточнение) теплотехнических характеристик элементов ПХСТ, необходимых для замыкания системы уравнений. На рис.5-8 представлены некоторые из них для элементов модифицированной ПХСТ. Погрешность полученных данных эксперимента не превышала 12 %.

В четвертой главе приведены сравнительные результаты численных и экспериментальных исследований традиционной и других альтернативных, в том числе модифицированной ПХСТ. Расчеты проводились для широких интервалов изменения параметров и внешних воздействий, значительно превышающих требования технического задания. На рис.9 пока-

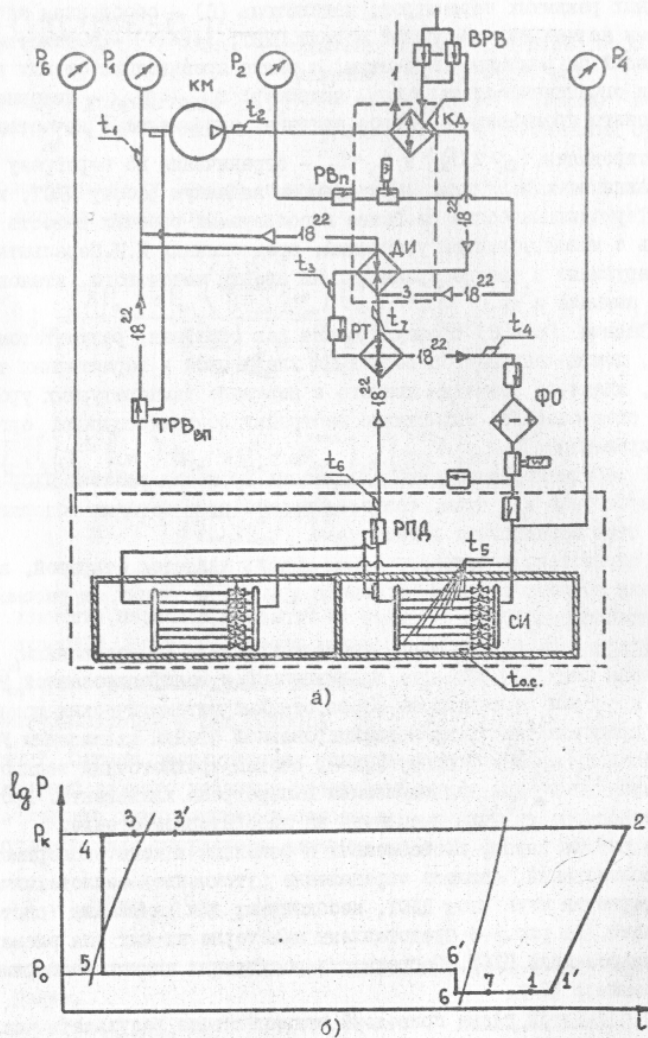


Рис. 4. Схема натурального образца УОХ-32 с тепловыми имитаторами процессора суперЭВМ (а) и $i - \lg P$ диаграмма холодильного цикла (б)

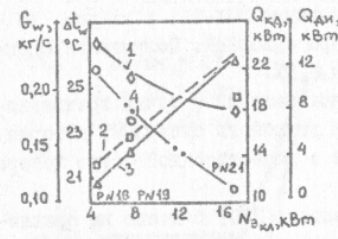


Рис. 5. Экспериментальные зависимости для трёхпоточного теплообменника: 1 - Δt_w , 2 - $Q_{кв}$, 3 - G_w , 4 - $Q_{дн} = f(N_{э,кв})$

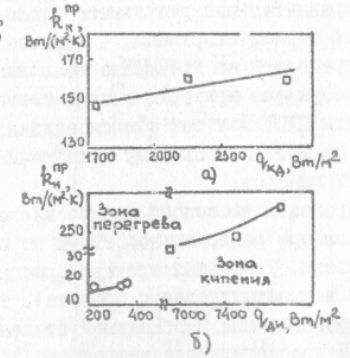


Рис. 6. Зависимости для трёхпоточного теплообменника: (а) - $R_{н,нр} = f(Q_{кв})$; (б) - $R_{н,нр} = f(Q_{дн})$. \square, \circ - эксперимент; — - расчёт

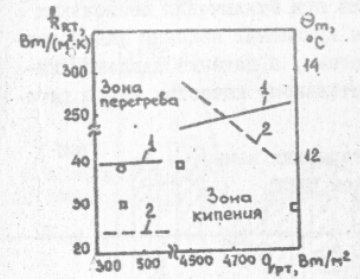


Рис. 7. Зависимости для регенеративного теплообменника: 1 - $R_{н,нр} = f(Q_{рт})$; 2 - $\Theta_m = f(Q_{рт})$. \square, \circ - эксперимент; — - расчёт

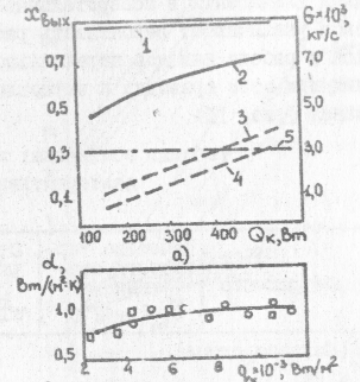


Рис. 8. Зависимости для испарительного канала процессора: (а) расчётные значения 1 - $\alpha_{вх}$, 2 - $\alpha_{вх}$, 3 - $\rho_{ж}$, 4 - $\rho_{ж}$, 5 - $\rho_{ж} = f(Q_{кв})$, (б) $\alpha_{вх} = f(Q_{кв} \cdot 10^3)$. \square - $\rho_{ж} = 130 \text{ кг/(м}^3\text{·с)}$, \circ - $\rho_{ж} = 280 \text{ кг/(м}^3\text{·с)}$, \square, \circ - эксперимент; — - расчёт

заны сравнительные результаты исследования УОХ-32, а на рис. 10 - объекта термостатирования - процессора суперЭВМ. Полученная оценка погрешности не превышала величины 8,0%.

Обсуждены критерии оценки схемных решений с точки зрения надёжности ПХСТ для тех функциональных устройств суперЭВМ, которые имеют прямоточную систему охлаждения с разветвлённой сетью испарительных каналов.

Проведён численный анализ нескольких ПХСТ с целью их сравнения и выбора рациональной схемы по одному из главных критериев - надёжности. Указанный критерий распространён как на внешние (качество термостатирования объекта), так и на внутренние характеристики (обеспечение необходимой степени переохлаждения хладагента на входе в дросселирующее устройство и перегрева на всасывании компрессора, возможность подачи хладагента в систему испарительных каналов в количествах, исключающих кризисные явления процессов кипения). Важно и то, что такие требования должны выполняться в условиях колебаний тепловых нагрузок от 0 до 100%.

Расчёты для схем с ТРВ в качестве дросселирующих устройств показали их непригодность для прямоточных систем термостатирования устройств суперЭВМ, так как автоматическое изменение (уменьшение) подачи хладагента в испарительные каналы при отключении нескольких блоков увеличивает вероятность развития кризисных явлений для оставшихся в работе каналов параллельной системы, а падение давления кипения при этом приводит к неудовлетворительному качеству термостатирования (рис. 11)

Таблица обобщённых характеристик качества альтернативных схем ПХСТ

Схемное решение	Качество термостатирования $\delta t_o \leq \pm 2^\circ\text{C}$	Степень переохлаждения $\Delta t_u \geq 6^\circ\text{C}$	$Q_o^{\text{min}} = Q_l / \Delta t_k \geq 10^\circ\text{C}$, кВт	Примечание
ПХУ (базовая схема)	+	-	20,0	
ПХУ + РВ _П	-	-	17,5	дросселирующее устройство - РВ;
ПХУ + РТ (СОХ-32)	+	+	17,0	$t_o = 10^\circ\text{C}$,
ПХУ + ДИ	+	-	11,0	$t_k = 40^\circ\text{C}$
ПХУ + РТ + ДИ	+	+	8,3	$Q_o^{\text{н}} = 16 \text{ кВт}$
ПХУ + ЭП	+	-	0,0	
ПХУ + КДИ	+	-	3,0	
ПХУ + РТ + КДИ (УОХ-32)	+	+	0,0	

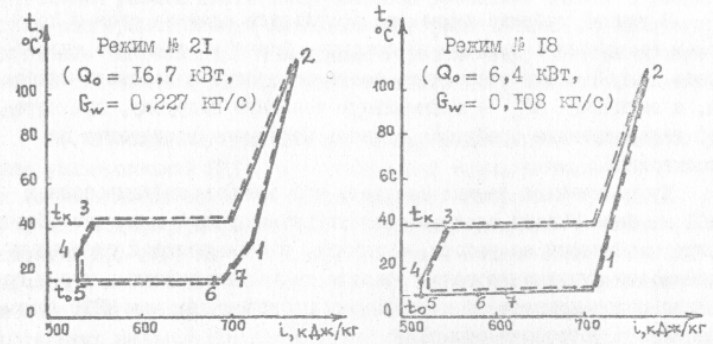


Рис. 9. Сравнительная диаграмма цикла УОХ-32 при номинальной и частичной тепловых нагрузках
— эксперимент, - - - расчёт ($t_{o,c} = 25^\circ\text{C}$; $t_o = 11^\circ\text{C}$)

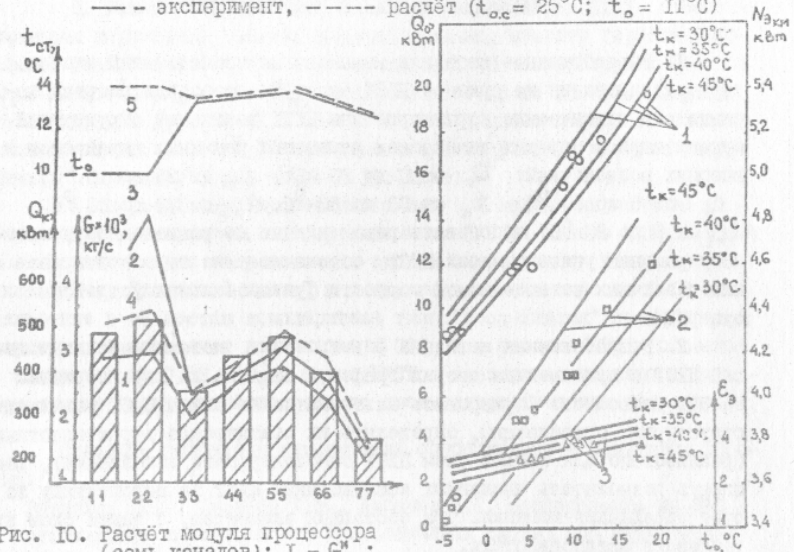


Рис. 10. Расчёт модуля процессора (семь каналов): 1 - $G_k^{\text{н}}$; 2, 3 - G_k и $t_{\text{см}}$ при двух отключённых; 4, 5 - G_k и $t_{\text{см}}$ при всех выключённых каналах
▨ - тепловая нагрузка

Рис. 11. Статистические характеристики компрессора КХТ-14: 1 - Q_o , 2 - $N_{\text{э,км}}$, 3 - $\epsilon_3 = f(t_o)$
□, ○, Δ - эксперимент, - - - расчёт

В данной таблице приведены результаты анализа схем с дросселем постоянного проходного сечения. Знак "+" означает способность данной схемы обеспечить соответствующий показатель качества, а величина Q_0^{min} - минимальную тепловую нагрузку, при которой гарантирована требуемая степень перегрева хладагента на всасывании.

Из полученных данных следует, что схему модифицированной ПХСТ на базе УОХ-32 следует считать рациональной в смысле обеспечения надёжности ее работы, а значит, в определяющей степени и надёжности функционирования объекта термостатирования, что и позволило рекомендовать её к серийному производству как ПХСТ функциональных устройств суперЭВМ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разработанные методики комплексных исследований систем термостатирования на примере ПХСТ суперЭВМ позволили впервые исследовать статические характеристики ПХСТ различной структурной организации в широких диапазонах изменения режимных параметров и внешних воздействий: Q_0 от 0 до 20 кВт, $t_{эл}$ от 25 до 40 °С, t_c от 5 до 30 °С, t_k от 30 до 50 °С, $t_{ср}$ от 20 до 30 °С, $t_{в1}$ от 5 до 30 °С; обосновать рекомендации по рациональному схемному решению универсальной ПХСТ, обеспечивающие термостатирование различных по выделяемой мощности функциональных устройств суперЭВМ.

2. Разработанная методика формирования математических моделей ПХСТ с применением теории графов и анализа их характеристик на ЭВМ позволяет: формировать альтернативные схемы ПХСТ различных структурных организаций, определять их статические характеристики (реализовано для восьми схем ПХСТ одноконтурного исполнения), расширять возможность численных исследований ПХСТ на перспективу за счёт дополнения номенклатуры составных элементов, а также схем их теплового взаимодействия.

3. Достоверность, корректность результатов исследований систем термостатирования на ЭВМ обоснованы анализом адекватности, выполненным в работе и включившим: экспериментальную проверку энергетических и объемных характеристик используемых нагревателей, коэффициентов теплопередачи и гидравлических сопротивлений аппаратов

для условий работы ПХСТ; сопоставление расчётных данных с результатами экспериментальных исследований, проведенных на лабораторном стенде модели ПХСТ и натуральных образцах двух альтернативных схем, в том числе с имитаторами реального объекта термостатирования.

4. Обоснованы критерии по выбору рационального схемного решения универсальной ПХСТ, обеспечивающей термостатирование различных по выделяемой мощности функциональных устройств суперЭВМ. Основой для модифицированной ПХСТ устройств суперЭВМ с выделяемой мощностью 2,0-17,5 кВт была рекомендована стойка охлаждения УОХ-32, включающая в свой состав трехпоточный теплообменник. Дросселирование и регулирование подачи хладагента по системе параллельных испарительных каналов при этом необходимо осуществлять индивидуальными вентилями с запасом по расходу.

5. Рекомендована область режимных параметров ПХСТ, обеспечивающая нормальные условия функционирования объекта термостатирования. Такими параметрами определены: нижний температурный уровень $t_c = 22-30$ °С (при этом $t_{эл}$ изменялось от 25 до 34 °С), верхний температурный уровень $t_k = 35-40$ °С, коэффициент запаса по расходу хладагента $\alpha = 1,3-1,5$ (при этом величину расхода следует удерживать в пределах $0,095 < G_a < 0,130$ кг/с).

6. В результате проведенного анализа данных численного исследования установлено, что традиционная ПХСТ на основе СОХ-32 может использоваться для непрямочных систем охлаждения: рассольного охлаждения, "холодной плиты" и т.д., выделяемой мощности 2-16 кВт. Включение в ее состав доиспарителя типа "вода-хладон" предложенной конструкции позволяет использовать СОХ-32 в составе ПХСТ объектов с мощностью до $0,56 \cdot Q_0^n$. Схема ПХСТ с электрическим пароперегревателем не конкурентноспособна по своим энергетическим затратам.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Резников Г.В., Смирнов Г.Ф., Лобачев С.С. Исследование на ЭВМ статических характеристик теплообменных систем как структурного звена химико-технологической системы // Тез. докл. IV вес. конф.: "Математическое моделирование сложных химико-технологических систем (СХТС-IV)", Кн. I, 10-12 сентября 1985г. - Одесса. - С.80.
2. Альтман Э.И., Лобачев С.С., Резников Г.В., Смирнов Г.Ф. Математическое моделирование на ЭВМ и исследование статических характеристик холодильной установки // Тез. докл. науч.-практ. конф.: Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса,

24-25 декабря 1987 г.- Кишинев. - С. 78.

3. Резников Г.В., Смирнов Г.Ф., Альтман Э.И., Лобачёв С.С. Некоторые подходы к исследованию статических характеристик холодильных систем охлаждения методом численного экспериментирования/Рук. зап. в УкрНИИТИ, № 1932. - Укр9. - 28 с.
4. Лобачёв С.С., Резников Г.В., Смирнов Г.Ф., Альтман Э.И. Моделирование статических характеристик холодильной установки с параллельными парогенерирующими каналами//Тез. всес. науч.-практ. конф.: Пути интенсификации производства с применением искусственного холода в отраслях агропромышленного комплекса, торговле и на транспорте, 24-26 окт. 1989 г., Секция П, Одесса. - С. 17.
5. Смирнов Г.Ф., Альтман Э.И., Лобачев С.С. Математическая модель и алгоритм расчета статических характеристик системы конденсатор - регенеративный теплообменник//Холодильная техника и технология/Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Киев, 1990.- Вып. 50.- С. 23-30.

Условные обозначения

d - диаметр, м; F - площадь поверхности, m^2 ; f - площадь поперечного сечения, m^2 ; G - расход, кг/с; k - коэффициент теплопередачи, $Вт/(m^2 \cdot K)$; L - длина, м; P - давление, Па; Q - тепловой поток, Вт; q - удельный тепловой поток, $Вт/m^2$; r - теплота парообразования, Дж/кг; t - температура, $^{\circ}C$; x - паросодержание; α - коэффициент теплоотдачи, $Вт/(m^2 \cdot K)$; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления; i - удельная энтальпия, Дж/кг; λ - теплопроводность, $Вт/м \cdot K$; ρ - плотность, $кг/m^3$; Θ - среднелогарифмический температурный напор, $^{\circ}C$.

И н д е к с ы

β_c - всасывание; β_x - на входе; β_{yx} - на выходе; β_r - граничный; β_p - выриск; β_c - переохлаждение; k - конденсация, канал; H - наружный, номинальный; O - кипение; O_{cp} - окружающая среда; P - производительность; p_r - приведенный; c - система охлаждения; ck - система каналов; ct - стенка; ε - эквивалентный; ε_l - элемент; Δ - приращение (потери); S - насыщение; w - вода.

СА

