

Автореферат
0-76

проф. Гушаку У.Т.
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. № 000002

ОСТАПЕНКО Леонид Сазонович

УДК 620.171.32/172.251:536.581.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТАНОВОК И МЕТОДОВ
АЗОТНОГО ПРОГРАММНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

Специальность 05.04.03 - машины и аппараты
холодильной и криогенной техники и систем
кондиционирования

xv 1121
ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
Бібліотека

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1987

Работа выполнена в Одесском технологическом институте холодильной промышленности.

Научный руководитель - доктор технических наук,
доцент ЧЕПУРЕНКО В.П.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
ДЕЙНЕГА В.Т.;
кандидат технических наук,
доцент ОНИЩЕНКО В.П.

Ведущая организация - Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского.

Защита состоится "23" февраля 1987 г. в 14.00 часов на заседании специализированного совета К 068.27.01 при Одесском технологическом институте холодильной промышленности по адресу: 270057, г.Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " _____ " 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
к.т.н., доцент

Р.К. Никульшин

Актуальность проблемы.

В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года отмечена необходимость повышения прочностных характеристик конструкционных материалов.

Одним из главных направлений научно-технического прогресса в машиностроении является повышение долговечности и надежности машин и аппаратов, эксплуатирующихся в экстремальных климатических условиях.

Исследования механических свойств материалов и конструктивных элементов в режимах, адекватных их рабочим условиям, позволяют вскрыть дополнительные резервы прочности и надежности машин и конструкций.

Регламентируемые стандартами требования к установкам, в которых осуществляются теплопрочностные испытания в ряде случаев не соблюдаются из-за несовершенства криостатов и установок программного охлаждения и нагрева. Поэтому повышение качества техники климатических испытаний, в частности, средств, улучшающих метрологические показатели установок для теплопрочностных испытаний, является актуальной технической задачей.

Целью настоящей работы является создание установок для теплопрочностных испытаний на основе исследований характеристик температурных полей в объектах как в стационарном, так и в нестационарном режимах теплообмена.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести теоретические исследования температурных полей объектов при наличии источников (стоков) тепловой энергии в условиях нестационарного теплообмена и термостатирования и на этой основе оптимизировать тепловые и геометрические характеристики установок программного нагрева и охлаждения;
- доказать адекватность реального физического объекта и принятой математической модели;
- разработать методики исследования средствами вычислительной техники температурных полей объектов при термостатировании и программном охлаждении и нагреве;
- спроектировать и создать опытные образцы установок для

21.111	11	0.333	
21.114	1219	121.9	
6991	2.188-10 ⁻³	2.188-10 ⁻²	
	-3.815-10 ⁻⁴	-8.01	W

температурных испытаний с использованием составленных программ расчета температурных полей в испытываемых объектах.

Методы исследований. При решении поставленных задач в работе использовались теоретические и экспериментальные методы тепломассообмена, методы математической физики и теории оптимального управления.

Основные научные результаты. В результате решения прямых и обратных задач теплопроводности для объектов, отдельные части которых подвергаются переменным тепловым воздействиям с учетом зависимости от температуры коэффициентов, характеризующих теплофизические свойства самих объектов и сред:

- исследовано влияние геометрических характеристик испытательных установок и испытываемых объектов, а также темпов изменения их температуры и интенсивности теплообмена между ними и охлаждающей либо греющей средой на температурные поля в испытываемых объектах при наличии концевых теплопритоков;

- предложены и исследованы методы повышения равномерности температурных полей объектов испытаний, разработаны технические средства для термостатирования и программных тепловых воздействий в широком диапазоне изменения режимных параметров;

- разработаны методики оптимизации средствами вычислительной техники тепловых и геометрических параметров установок для низкотемпературного термостатирования и программных нагрева и охлаждения.

Научные положения

I. Начиная с некоторого минимального размера криостата, равного удвоенной длине участка распространения краевых эффектов в испытываемых объектах в виде панелей из конструкционных материалов, дальнейшее увеличение размеров криостата не влияет на величину упомянутого участка, которая может быть представлена в виде зависимости от коэффициента теплопроводности, толщины панели, температуры в середине ее и коэффициента теплообмена внутри криокамеры.

Длина распространения краевых эффектов уменьшается в 2-4 раза при одновременном сокращении энергетических затрат и уменьшении неравномерности температурного поля исследуемого участка

объекта за счет теплоизоляции упомянутого участка и концентрации теплоотвода за его пределами.

2. Раздельное регулирование температуры среды по зонам или участкам объекта при его программном охлаждении позволяет обеспечить равномерность температурного поля на ограниченном участке объекта и сократить длину распространения краевых эффектов. Обеспечить такое регулирование можно с помощью ряда типоразмеров модульных устройств для нагрева и охлаждения.

Практическую ценность работы составляют:

- инженерные методики и программные средства, обеспечивающие проектирование и создание установок для теплопрочностных испытаний, обладающих улучшенными эксплуатационными качествами;
- установка низкотемпературного термостатирования и модульное устройство для программных нагрева и охлаждения, созданные на основе применения инженерных методик проектирования;
- разработка и совершенствование методов уменьшения градиентов температур в испытываемых объектах при температурных испытаниях.

Новизна и оригинальность принятых технических решений подтверждены авторскими свидетельствами.

Реализация результатов работы. Работа выполнялась на кафедре холодильных установок Одесского технологического института холодильной промышленности в соответствии с координационным планом научно-исследовательских работ высших учебных заведений, включенных в целевую комплексную программу "АСНИ" (автоматизированные системы научных исследований) Минвуза УССР, и внедрена в рамках НИР (№ гос. регистрации ОІВЗ.0032600, Инв. № 0285004825І, 1985 г.).

Основные научные результаты диссертационной работы внедрены при разработке и создании новых типов установок: установки для низкотемпературного термостатирования образцов материалов и модульного устройства для программных температурных испытаний конструктивных элементов.

Апробация работы. Результаты выполненных исследований докладывались на 49 (1980 г.), 50 (1981 г.), 52 (1983 г.) и 55 (1986 г.) научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников Одесского технологиче-

ского института холодильной промышленности.

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 6 печатных работ, получено 9 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, изложенных на 124 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 134 наименований, приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и задачи, изложены основные научные и практические результаты.

В первой главе рассмотрено влияние экстремальных климатических условий эксплуатации различного оборудования на его прочность и надежность.

Многообразие теплонапряженных конструкций, а также условий их применения обуславливает широкий спектр установок для температурных испытаний, различающихся по виду воспроизводимых нагрузок, диапазону изменения имитируемых климатических факторов, условиям и интенсивности теплообмена между испытываемым объектом и средой.

Здесь же рассмотрены основные направления исследований в области создания установок для теплопрочностных испытаний, в том числе:

- разработка, создание и исследование унифицированного оборудования на базе модулей-блоков;
- улучшение эксплуатационных характеристик установок для температурных испытаний;
- совершенствование методов и средств автоматизации эксперимента, сбора и обработки данных, в том числе с применением ЭВМ;
- улучшение метрологических показателей температурных испытаний, связанных как с качеством средств автоматизации, так и с совершенством холодильных, криогенных и нагревательных установок с точки зрения обеспечения в испытываемых объектах температурных полей, адекватных условиям реальной эксплуатации.

На основе рассмотрения известных конструкций температурных камер для тепло- и хладопропрочностных испытаний образцов материалов и конструктивных элементов отмечается, что одним из распространенных их типов являются камеры с двухсторонним выводом захватов, которые служат источником теплопритоков в камеру и неравномерности

температурного поля в объекте испытаний, искажающей имитируемые условия.

Несмотря на то, что перепады температур в испытываемых объектах в большинстве случаев превышают величину допуска на точность термостатирования, установленную ГОСТ III50-75, 22706-77, до сих пор отсутствуют систематические исследования температурных полей в объектах при одноосном растяжении-сжатии в различных режимах испытаний и при различном исполнении установок для температурных испытаний.

До настоящего времени не разработаны методики расчетов, которые связывали бы температурные режимы объектов при двухстороннем выводе захватов, их теплофизические и геометрические характеристики с конструктивными решениями температурных камер с учетом метрологических показателей испытаний.

Для программных температурных испытаний в установках с двухсторонним выводом захватов отсутствуют расчетные методы, позволяющие определять количество и размеры зон независимого регулирования температуры, а, следовательно, основные геометрические и теплотехнические параметры установки и конфигурацию автоматизированной системы научных исследований.

Указанные проблемы и определяют цель работы и задачи исследований.

Вторая глава посвящена получению и реализации математической модели теплообмена объекта, частично расположенного в теплоизолированной камере (рис. I).

При составлении математической модели учитывались особенности взаимного расположения камеры и испытываемого объекта, а также характер теплообмена на различных его участках. Внутри камеры, включающей участок, ограниченный теплоизоляционными ограждениями, объект охлаждается конвективным путем при программном охлаждении и низкотемпературном термостатировании или нагревается при программном нагреве конвективным путем или излучением.

Теплообмен между наружным участком объекта и окружающей средой осуществляется конвективным путем, а с окружающими предметами излучением. Если пренебречь теплопритоками от слоя теплоизоляции камеры к среднему его участку, то исследуемый объект может быть представлен как среда, в которой процессы теплопроводности нестационарны и одномерны.

Так как при низкотемпературном термостатировании температура

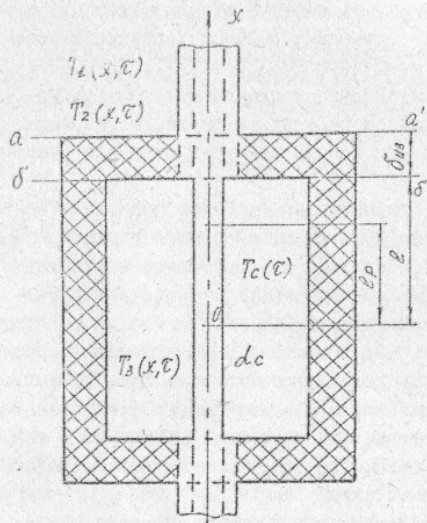


Рис. 1

объекта может принимать значения от 4 до 273 К, а при термостатировании диапазон температур испытаний, определяемый программой испытаний конкретного объекта, как правило, более широк (до 600 К и более), то теплофизические характеристики материалов (теплопроводность и теплоемкость), а также коэффициенты теплообмена при этом изменяются довольно существенно - на 30-40 %.

Поэтому при постановке краевой задачи теплопроводности необходимо учитывать зависимость коэффициентов дифференциальных уравнений от температуры, а соответствующая система одномерных нестационарных дифференциальных уравнений записывается в виде:

$$\rho c(T_1) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(T_1) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x}) - \frac{d_0(T_1)}{h} (T_1(x, \tau) - T_0),$$

$$l + \delta_{us} \leq x < \infty, \tau > 0; \quad (1)$$

$$\rho c(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x}), \quad l \leq x \leq l + \delta_{us}, \tau > 0; \quad (2)$$

$$\rho c(T_3) \frac{\partial T_3(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(T_3) \frac{\partial T_3(x, \tau)}{\partial x}) - \frac{d_c(T_c)}{h} (T_3(x, \tau) - T_c(\tau)),$$

$$0 \leq x \leq l, \tau > 0, \quad (3)$$

с граничными

$$\frac{\partial T_3(0, \tau)}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial T_2(l, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_3(l, \tau)}{\partial x}; \quad T_2(l, \tau) = T_3(l, \tau);$$

$$\frac{\partial T_1(l + \delta_{us}, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(l + \delta_{us}, \tau)}{\partial x}; \quad T_1(l + \delta_{us}, \tau) = T_2(l + \delta_{us}, \tau)$$

$$T_1(\infty, \tau) = T_0 \quad (4)$$

и начальными условиями

$$T_1(x, 0) = T_1(x); \quad T_2(x, 0) = T_2(x); \quad T_3(x, 0) = T_3(x). \quad (5)$$

Начальные условия могут быть определены в результате решения соответствующей системы стационарных дифференциальных уравнений теплопроводности, которую легко получить из системы (1)-(5). Ее решения имеют вид:

$$T_1(x) = T_0 + m(T_c - T_0) \operatorname{sh}(m l) B \exp(n(l + \delta_{us} - x)), \quad (6)$$

$$T_2(x) = T_0 + m(T_c - T_0) B \operatorname{sh}(m l) (1 + n(l + \delta_{us} - x)), \quad (7)$$

$$T_3(x) = T_c + n(T_0 - T_c) \operatorname{ch}(m x) B, \quad (8)$$

где $B = \frac{1}{n \operatorname{ch}(m l) + m(1 + n \delta_{us}) \operatorname{sh}(m l)}$,
 $m = \sqrt{\frac{d_c}{\lambda h}}$, $n = \sqrt{\frac{d_0}{\lambda h}}$

Поскольку функция $T_3(x)$ в своей области определения непрерывна и монотонна, то максимальный перепад температур определяется разностью между температурами на краю и в середине интересующего нас зачетного участка кривой $T_3(x)$

$$\Delta T = T_3(l_p) - T_3(0) = n(T_0 - T_c) (\operatorname{ch}(m l_p) - 1) B \quad (9)$$

Для различных образцов материалов получены графические зависимости $\Delta T(T_3(0))$ и $l(T_3(0))$, позволяющие оценивать неравномерность температурного поля при термостатировании, а также решать обратную задачу по определению минимального размера камеры (криостата), обеспечивающего заданную точность поддержания температуры (ΔT) в пределах выделенного участка образца или конструктивного элемента в виде плоской панели, при условии, что захваты расположены на удалении от наружной стенки камеры.

На основе анализа распределения температур в пластинах установлено, что начиная с некоторого минимального размера криостата, равного удвоенной длине участка распространения краевых эффектов, дальнейшее увеличение размеров криостата не влияет на величину упомянутого участка. Минимальная длина криостата, достаточная для поддержания на заданном участке панели длиной $2l_p$ перепада температур не более 2 К, может быть определена по зависимости:

$$2l = 2l_p + l_1 + (C_0 + C_1(h - 0,001) + C_2(d_c - 20)^{b_1} + C_3(\lambda - 17)^{b_2}) 10^{-5} (T_3(0) - 53)^{1,1} \quad (10)$$

$$\text{где } l_1 = 0,33949 - 1,64 \cdot 10^{-4} (200 - \lambda)^{1,4} - [0,0573 - 2,68 \cdot 10^{-5} (200 - \lambda)^{0,4}] \times$$

$$\times (d_c - 20)^{0,3} + [47,6 - 0,021(200 - \lambda)^{1,4}] (h - 0,001)^{0,81} -$$

$$- [7,37 - 3,3 \cdot 10^{-3} (200 - \lambda)^{1,4}] (d_c - 20)^{0,3} (h - 0,001)^{0,84};$$

$$C_0 = -1,169; C_1 = 186 (d_c - 20)^{0,33} - 26,63 (\lambda - 17)^{0,68} - 3,82;$$

$$C_2 = 0,512 - 0,226 \cdot 10^{-3} (200 - \lambda)^{1,4}; C_3 = -0,0835;$$

$$b_1 = 0,33; b_2 = 0,68; n = 1,585.$$

С помощью этой формулы без применения ЭВМ можно определить внутреннюю длину криостата с погрешностью не более 6% в следующих диапазонах изменения величин:

$$17 \leq \lambda \leq 200 \text{ Вт/(м.К)};$$

$$0,001 \leq h \leq 0,006 \text{ м};$$

$$20 \leq d_c \leq 150 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$40 \leq T_3(0) \leq 250 \text{ К}$$

В работе получены соотношения для расчета температурных полей объекта испытаний в зависимости от места его крепления к удлинительным штангам, термического сопротивления в месте контактов их с объектом и отношения площадей поперечного сечения захватов и объекта

$$T_3(x) = T_c + n(T_0 - T_c) ch(mx) B, \quad (11)$$

Причем, если удлинительные штанги с площадью поперечного сечения, равной площади поперечного сечения объекта испытаний, или захваты расположены на удалении от наружной стенки камеры и их влиянием можно пренебречь, то уравнение (11) адекватно уравнению (8). Если удлинительные штанги или захваты соединены с объектом на наружной поверхности камеры, то

$$B = \frac{1}{nch(ml) + m \left(A \frac{F_a}{F_{cr}} + n \left(\frac{\lambda_0 F_a R}{F_{cr}} + \delta_{из} \right) \right) sh(ml)},$$

а если на внутренней поверхности камеры, то

$$B = \frac{1}{nch(ml) + m \left(\frac{\lambda_0 F_a R}{F_{cr}} + A \frac{F_a}{F_{cr}} (1 + n\delta_{из}) \right) sh(ml)}, \text{ где } A = \frac{\lambda_0}{\lambda_{ст}}$$

Использование приведенных выше расчетных соотношений позволяет определять равномерность температурного поля объекта и минимальный размер криостата, при котором будет соблюдена требуемая точность поддержания заданного температурного режима при одном из трех расположений удлинительных штанг относительно объекта испытаний и камеры.

Было исследовано влияние контактных термических сопротивлений и отношения площадей поперечного сечения захватов и объекта на равномерность температурного поля в объекте испытаний.

По итогам выполненных теоретических исследований получены зависимости для определения основных характеристик низкотемпературной установки при условии, что температуры всех точек на заданном участке одинаковы за счет его теплоизоляции. Разработанный способ термостатирования позволяет не только повысить равномерность температурного поля, но и снизить энергетические затраты на термостатирование.

При решении задачи (1)-(5) применялся метод конечных разностей с использованием неявной четырехточечной схемы.

Правильность численного решения задачи проверялась при сравнении результатов расчетов по аналитическим зависимостям (6)-(8) с результатами численного расчета задачи (1)-(5) при условии, что $\tau \rightarrow \infty$. Определены оптимальные шаги численного расчета по времени и координате: $\Delta x \approx 0,005-0,008 \text{ м}$, $\Delta \tau \approx 5-60 \text{ с}$, при которых выполняется достаточно высокая точность: расхождение численного и аналитического решения не более 0,25 К. При этом шаг

расчета по времени может быть взят достаточно большим, что уменьшает время решения задачи на ЭВМ.

Дополнительно для проверки правильности решения нестационарной задачи вычислялись

$$Q_{3,r}'(\ell, \tau) = Q_{3,\kappa}(\tau) - Q_{3,\text{ак}}(\tau), \quad (12)$$

$$Q_{3,r}''(\ell, \tau) = -\lambda h \frac{\partial T_3(\ell, \tau)}{\partial x}, \quad (13)$$

где

$$Q_{3,\kappa}(\tau) = \alpha_c(T_3) \int_0^{\ell} (T_c(\tau) - T_3(x, \tau)) dx,$$

$$Q_{3,\text{ак}}(\tau) = c(T_3) \rho h \int_0^{\ell} \frac{\partial T_3(x, \tau)}{\partial \tau} dx$$

Аналогичные расчеты проведены для $Q_{1,r}'(\ell + \delta_{\text{из}}, \tau)$ и $Q_{1,r}''(\ell + \delta_{\text{из}}, \tau)$

В работе показано, что расхождение между $Q_{1,r}'$ и $Q_{1,r}''$, $Q_{3,r}'$ и $Q_{3,r}''$ в течение двух циклов изменения температуры среды по заданной программе не превышает 1 % от амплитуды колебаний тепловых потоков.

Для определения закона изменения температуры среды в граничных условиях III рода при циклических нагреве и охлаждении и заданном законе изменения температуры середины объекта $T_3(Q, \tau)$ для каждого из участков монотонности минимизировался функционал:

$$\Phi_i' = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \left[\frac{\partial T_3(Q, \tau)}{\partial \tau} - \frac{\lambda(T_3)}{\rho c(T_3)} \frac{\partial^2 T_3(Q, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\alpha_c(T_3)}{\rho c(T_3) h} (T_3(Q, \tau) - T_c(\tau)) \right]^2 d\tau, \quad (14)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ точки, ограничивающие участки монотонности функции $T_3(Q, \tau)$, отличающиеся темпом изменения температуры $\partial T_3(Q, \tau) / \partial \tau$.

Если нагрев осуществляется излучением, а охлаждение конвективным путем, то решение обратной задачи предполагает, наряду с минимизацией функционала (14) для вычисления $T_c(\tau)$, определение закона изменения во времени плотности теплового потока $q(\tau)$.

В результате проведенных теоретических исследований выполнен анализ влияния геометрических характеристик самих объектов и камер установок для их программного нагрева и охлаждения, а также параметров температурных программ, в частности, темпа охлаждения (нагрева) на равномерность температурного поля. Использование мо-

дульного принципа построения установок для тепло-хладопропрочностных испытаний, позволяющего расширить их возможности по выполнению температурных программ, требует постановки и решения обратной задачи теплопроводности по вычислению температуры среды $T_c(x, \tau)$ как функции, минимизирующей функционал:

$$\Phi_i^3 = \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \int_0^{\ell} \left[\frac{\partial T_3(x, \tau)}{\partial \tau} - \frac{\lambda(T_3)}{\rho c(T_3)} \frac{\partial^2 T_3(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\alpha_c(T_3)}{\rho c(T_3) h} (T_3(x, \tau) - T_c(x, \tau)) \right]^2 dx d\tau, \quad (15)$$

где $T_3(x, \tau)$ - целевая функция, удовлетворяющая условию равномерности температурного поля на заданной части своей области определения. Результаты вычисления $T_c(x, \tau)$ являются исходными данными для разбивки всего объекта испытаний на зоны регулирования температуры и определения геометрических и теплотехнических характеристик устройств нагрева и охлаждения для каждой зоны.

В третьей главе приведены и обоснованы методика экспериментальных исследований, конструкции опытных установок и их описание, а также выполнен анализ результатов эксперимента.

Показано, что проверка достоверности математической модели температурного поля в объекте, частично расположенном в теплоизолированной камере, может быть осуществлена на более высоком уровне температур; при этом в качестве охлаждающей среды с температурой $T_c < 273$ К можно использовать воздух с температурой $T_c = 293$ К.

Исследования выполнялись на экспериментальном стенде в виде разомкнутого аэродинамического кольца методом стационарного теплового потока. Теплопритоки со стороны захвата имитировались плоскими нагревателями, выполненными из константановой проволоки $d = 0,17$ мм, которая наматывалась на стеклотекстолитовые пластинки.

Расхождение между экспериментальными результатами и расчетными не превышает 8 % (0,3 К) от диапазона изменения $T_3(x, \tau)$ для плоского алюминиевого образца. Проверка зависимости (10) показала, что расхождение между длинами участков $\Delta \ell$, на которых перепад температур не превышал 2 К, определенных расчетным путем, экспериментально и по формуле (10) не превышает 12 % от длины участка.

Достоверность математической модели и полученных аналитических решений проверялась также на низкотемпературной установке

для термостатирования образцов материалов и конструктивных элементов на базе применения жидкого азота в качестве источника холода. Концы пластины из сплава АК4 крепились в захватах испытательной машины, а средняя часть размещалась внутри низкотемпературной камеры, на одинаковом расстоянии от захватов. Длина обдуваемого азотно-воздушной смесью участка пластины составляла 0,38 м, а длина рабочего участка - 0,12 м. Максимальная разность температур в пределах этого участка ограничивалась 2 К. Испытания проводились при температурах в середине образцов, $T_3(0) = 173, 193, 203, 215$ К. Толщина образцов $h = 0,0015$ м и $h = 0,005$ м. Как следует из сравнения опытных и расчетных данных, абсолютная их разность не превышает 0,3 К.

Четвертая глава посвящена вопросам реализации и внедрения полученных результатов. В ней рассматриваются:

1. Инженерная методика и рекомендации по проектированию установок для низкотемпературного термостатирования образцов материалов и конструктивных элементов при двухстороннем выводе захватов испытательных машин.

2. Методика расчета тепловых характеристик установок для программных нагрева и охлаждения элементов конструкций при их одноосном растяжении-сжатии, в том числе:

- методика проектирования установок для программных охлаждения;
- описание модуля установки для программных нагрева и охлаждения;
- методика теплового расчета модульного устройства для нагрева и охлаждения.

3. Опытно-промышленные установки для тепло- и хладопропрочностных испытаний элементов конструкций, в том числе:

- установка для низкотемпературного термостатирования, с описанием принципиальной схемы и технической реализации самой установки и ее узлов, а также блока управления и системы питания жидким азотом. Здесь же помещены основные технические характеристики и рекомендации по эксплуатации низкотемпературной установки;
- основные технические характеристики и особенности исполнения самого модульного устройства для нагрева и охлаждения и его узлов;
- приведены фотографии и схемы опытно-промышленных установок.

Результаты работы: методика расчета установок для низкотемпературного термостатирования, установка для низкотемпературного термостатирования, а также методика и алгоритм расчета установок

для программного охлаждения, положенная в основу проекта модуля для нагрева и охлаждения, и опытный образец модуля внедрены в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского.

Методика расчета устройств для низкотемпературного термостатирования, программы ЭВМ, а также рекомендации по проектированию криостатов и способ термостатирования внедрены в п/я Г-4736, г. Новосибирск.

Приложения содержат:

- текст программы расчета параметров установок низкотемпературного термостатирования;
- текст программы расчета параметров температурного поля объектов при двухстороннем выводе захватов и граничных условиях 2-го рода (при нагреве) и 3-го рода (при охлаждении);
- документы о внедрении результатов диссертационной работы.

В В О Д Ы

1. Расположение захватов, имеющих большую чем испытываемый объект площадь поперечного сечения, в охлаждаемой зоне криостата или вблизи ее нецелесообразно, поскольку приводит не только к возрастанию теплопритоков, но и к увеличению неравномерности температурного поля в испытываемых объектах в тем большей степени, чем ближе к охлаждаемому участку располагаются захваты и чем больше отношение площадей поперечного сечения захвата и объекта.

2. При усилиях, имеющих место в условиях механических испытаний, возникающие на участках соприкосновения захватов (удлинительных штанг) и объекта, контактные термические сопротивления не оказывают существенного влияния на распределение температур в термостатируемых объектах.

3. Положение удлинительных штанг, выполненных из металла с низкой теплопроводностью, по отношению к испытываемому объекту, выполненному из металла с более высокой теплопроводностью и имеющих равные площади поперечного сечения, оказывает существенное влияние на равномерность температурного поля объекта при его термостатировании, улучшая ее по мере перемещения удлинительных штанг к внутренней полости камеры. Перемещение зоны контакта между испытываемым объектом и удлинительными штангами из-за пределов камеры к внутренней поверхности теплоизоляционных ограждений уменьшает перепады температур вдоль объекта в 2-3 раза.

4. Форсирование циклических температурных испытаний за счет увеличения темпа нагрева (охлаждения) приводит к ухудшению их

метрологических показателей и требует мер компенсации возрастающей неравномерности температурного поля за счет увеличения размеров температурной камеры, когда это возможно, или изменения конфигурации зон нагрева и охлаждения.

5. Длина распространения краевых эффектов при термостатировании объектов с двухсторонними выводами из теплоизолированной камеры определяется сочетанием геометрических критериев и критериев Био, вычисленных по условиям теплообмена как внутри, так и снаружи камеры, и при разности температур до 200 градусов для большинства образцов материалов или конструктивных элементов в виде пластин толщиной до 15 мм составляет не более 0,4 м от внутренней поверхности стенки камеры.

6. Несовпадение экспериментальных и расчетных данных, описывающих температурные поля в анизотропных и изотропных объектах, части которых расположены в средах с различными условиями теплообмена не превышает 8-12 %.

7. Целевая функция в обратной задаче теплопроводности определяется распределением температур в испытываемом объекте при его программном охлаждении, удовлетворяющим метрологическим условиям на температурные испытания и полученным соответствующим выбором интенсивности теплообмена между частью объекта внутри камеры и средой.

Обозначения: T - абсолютная температура, К; c - удельная теплоемкость, Дж/(кг.К); λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м.К); α - коэффициент теплообмена, Вт/(м².К); Q - тепловой поток, Вт; R - термическое сопротивление, м².К/Вт;

ℓ - половина длины камеры, половина длины зачетного (рабочего) участка, м; h - половина толщины объекта, м; δ - толщина теплоизоляции камеры, м; F - площадь сечения, м²; x - текущая координата, м; τ - текущее время, с.

Индексы: а - алюминий; ак - аккумулялированный; из - теплоизоляция камеры; к - конвективный; р - рабочий (зачетный) участок; m - отнесенный к погонному метру; с - охлаждающая среда; ст - сталь; о - окружающая среда; $j = 1, 2, 3$ - индекс, указывающий на принадлежность величины к наружному, проходящему сквозь слой теплоизоляции и внутреннему участку пластины.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. А.с. СССР № 615345 "Газожидкостный контактный теплообменник", И.П. Старчевский, А.И. Гончарук, Л.С. Остапенко, Бюллетень № 26, 1978.

2. А.с. СССР № 630501 "Низкотемпературная установка", И.П. Старчевский, А.И. Гончарук, Т.Н. Балабан, Л.С. Остапенко, А.Б. Коновалов, А.Б. Давиденко и Н.Н. Гниляк. Бюллетень № 40, 1978.

3. А.с. СССР № 688808 "Газожидкостный контактный теплообменник", И.П. Старчевский, А.И. Гончарук, Л.С. Остапенко. Бюллетень № 36, 1979.

4. А.с. СССР № 830079 "Способ термостатирования объекта в кондиционируемом помещении", Л.С. Остапенко, Л.В. Соколова. Бюллетень № 18, 1981.

5. А.с. СССР № 867145 "Установка для температурных испытаний образцов", И.П. Старчевский, Л.С. Остапенко, ДСП. Приоритет от 17.04.80.

6. А.с. СССР № 907378 "Способ охлаждения воздуха", А.И. Гончарук, Л.С. Остапенко. Бюллетень № 7, 1982.

7. А.с. СССР № 985688 "Контактный теплообменник", Л.С. Остапенко, Л.В. Соколова, Т.П. Веретенникова. Бюллетень № 48, 1982.

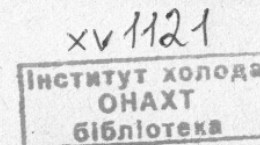
8. А.с. СССР № 1058432 "Устройство для теплопрочностных испытаний элементов конструкций летательных аппаратов", Б.И. Олькин, Т.С. Родченко, Д.М. Акентьев, Г.В. Лилеев, Л.С. Остапенко, ДСП. Приоритет от 9.04.82.

9. А.с. СССР № 1146526 "Устройство для температурного воздействия при исследовании образца", Л.С. Остапенко, Л.В. Соколова, О.В. Парижский. Бюллетень № 11, 1985.

10. Старчевский И.П., Гончарук А.И., Остапенко Л.С. Особенности разработки установок азотного охлаждения. Респ. межвед. науч.-техн. сб. Холодильная техника и технология, Киев, Техника, 1981, вып. 32, с. 51-54.

11. Метод расчета энергозатрат для низкотемпературных испытаний образцов на усталостную прочность. Остапенко Л.С., Гончарук А.И., Соколова Л.В. и др. Респ. межвед. науч.-техн. сб. Киев: Техника, 1981, вып. 32, с. 54-59.

12. Остапенко Л.С., Старчевский И.П. Исследование теплообмена в низкотемпературных камерах для обеспечения заданного тем.



пературного режима образца. Изв. вузов. Сер. Энергетика, Минск, 1981, № 12, с. 46-51.

13. Остапенко Л.С., Гончарук А.И., Соколова Л.В. Теплообмен при низкотемпературном термостатировании образцов. Респ. межвед. науч.-техн. сб. Холодильная техника и технология, Киев, Техника, 1982, вып. 34, с. 53-57.

14. Остапенко Л.С., Соколова Л.В. Нелинейная задача теплопроводности при нестационарном тепловом режиме конструкций. Респ. межвед. науч.-техн. сб. Холодильная техника и технология. Киев, Техника, 1985, вып. 40, с. 32-35.

15. Исследовать, разработать и создать модульную систему с термосифонным охладителем для тепло- и хладопрочностных испытаний. Научно-технический отчет, № гос. регистрации 0183.0032600. Инв. № 02850048251, 1985.

1511
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЦЕНТР
ТАХО