

На правах рукописи
УДК 621.57: 536.24: 615.478.5

Белова Ольга Владимировна

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРЕЦИЗИОННЫХ УСТРОЙСТВ
НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ

05.04.06. Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

Автореферат
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2000

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент А.В. Чернышев

Официальные оппоненты: Киселев М.И., д. ф-м. н, профессор, МГТУ им.
Н.Э. Баумана
Сологуб В.Н., к. т. н., НИИСУ г. Москва

Ведущая организация: АО "Импульс", г. Москва

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1565999

Белова О.В. Разработка мет

Защита диссертации состоится "27" марта 2000 г. в 14 час. 30 мин. на заседании специализированного Совета К.053.15.07 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 1070055, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, ф-т "Энергомашиностроение"

МГТУ.

адресу: 107005, Москва, 2-я

15659.99

С.Д. Глухов

ф

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Прецизионные устройства нагрева-охлаждения (ПУНО), являющиеся важнейшим эффективным инструментом для широкого круга исследовательских и диагностических работ в медицине, микробиологии, химии, используются для поддержания заданного температурно-временного режима стандартных микродоз обрабатываемого материала.

После открытия в 1985 г. нового способа деления молекул ДНК, названного полимеразной цепной реакцией (ПЦР), возникла необходимость создания нового оборудования, позволяющего использовать это достижение в условиях мелкосерийного производства или проведения большого объема исследований в микробиологии, эпидемиологии, пищевой и фармацевтической промышленности, сельском хозяйстве, криминалистике.

ПУНО для медико-биологических исследований производятся многими зарубежными и российскими фирмами. В 1991 г. в МГТУ им. Н.Э.Баумана совместно с предприятием "СТМ" было создано автономное программируемое прецизионное устройство нагрева и охлаждения "ЦиклоТемп-106".

Выполнение требований, предъявляемых новыми технологиями, затруднено из-за высокой себестоимости, большой тепловой инерционности и малой вместимости существующих устройств. Поэтому важно еще на этапе проектирования оценить точность поддержания температуры, скорость нагрева и охлаждения на рабочих режимах, рекомендовать схему конструктивного исполнения, теплофизические и конструктивные параметры нового устройства в соответствии с предъявляемыми повышенными требованиями к его рабочим параметрам.

В существующем теоретическом описании прецизионных устройств нагрева-охлаждения, реализующих пневматическую, гидравлическую либо твердотельную схемы рабочего процесса, не учитываются нелинейные нестационарные процессы теплообмена при совместной работе различных элементов устройства. Поэтому актуальным является исследование рабочих процессов с целью повышения эффективности работы прецизионных устройств нагрева-охлаждения, математическое моделирование теплообмена, учитывающее отмеченные особенности, позволяющее рассчитать рабочие параметры при известных параметрах конструкции.

Цель работы

Повышение эффективности ПУНО медико-биологического назначения.

Задачи исследования

- провести теоретические исследования внутренних процессов в ПУНО;
- создание методики расчета ПУНО медикобиологического назначения;
- исследовать тепловое взаимодействие элементов ПУНО на различных режимах работы;
- исследовать влияние конструктивных параметров на рабочие характеристики ПУНО с целью создания высокоэффективного ПУНО.

Научные положения и их новизна

1. Создана пространственная математическая модель теплового взаимодействия элементов термоэлектрического прецизионного устройства нагрева и охлаждения.

Модель впервые позволяет рассмотреть тепловое состояние ПУНО совместно с термоэлектрическим преобразователем и системой теплоотвода на нестационарных режимах работы устройства.

2. Создан метод расчета для определения теплового состояния ПУНО в пространственной постановке, сочетающий в себе конечноэлементную и конечно-разностную дискретизацию и использующий технологию численных расчетов на несогласованных сетках.

Метод впервые позволил решить задачу взаимного влияния отдельных элементов на работу ПУНО в целом на нестационарных режимах работы устройства.

3. Разработана методика расчета целого класса термоэлектрических прецизионных устройств.

Методика впервые позволяет с высокой точностью определять температуру и тепловые потоки в ПУНО на нестационарных режимах работы устройства.

Практическая ценность

Применение разработанной методики расчета и созданного программного обеспечения позволили:

- исследовать влияние конструктивных параметров радиатора и теплоизоляции на рабочие характеристики разрабатываемого устройства (точность поддержания температуры, скорость изменения температуры объекта теплового воздействия, минимальную температуру на режиме захлаживания);
- создать новое эффективное ПУНО для ПЦР-диагностики;
- уменьшить количество экспериментальных исследований при проектировании новых конструкций термоэлектрических ПУНО различного назначения и сократить сроки их разработки.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на научно-технических семинарах в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 1996, 1997, 1998, 1999 гг.). Результаты диссертации внедрены на предприятии “СТМ” (г. Москва), а также использованы при выполнении государственного контракта №6/1 от 24 декабря 1998 г. “Приборы для сиквенирования и анализа ДНК”.

Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 3 статьи, составлен научно-технический отчет "Исследование и расчет динамического режима работы исполнительного устройства блока нагрева и охлаждения многоканального программируемого прецизионного термостата на базе термоэлектрических модулей"- МГТУ. НИИ Э;– Э 2/205; № ГР 01980001196; Инв. № 0298000460. М, 1997. - 160 с.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы. По объему работа состоит из 98 страниц текста, 41 рисунка, 5 таблиц, библиография насчитывает 61 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемого вопроса, поставлены цели работы, сформулированы основные положения, выносимые автором на защиту, их научная новизна и практическая ценность.

В первой главе представлена предложенная автором схема теплового взаимодействия между элементами прецизионного устройства нагрева и охлаждения. Проведен анализ конструктивных вариантов, используемых для нагрева и охлаждения биологических образцов, по критериям повышения скорости подвода и отвода тепла, уменьшения инерционности нагрева и охлаждения, повышения емкости, снижения габаритных размеров для увеличения мобильности, удобства применения автоматизированных процессов управления, эргономичности. Показано, что на сегодняшний день всем перечисленным выше условиям в наибольшей степени удовлетворяет твердотельная схема устройства с применением высокотехнологичных термоэлектрических преобразователей Пельтье. Введено понятие производительности ПУНО и удельной потребляемой мощности.

Проведен анализ наиболее используемых на сегодняшний день моделей расчета устройств с термоэлектрическими преобразователями. Показано, что существующие методы расчета параметров термоэлектрических устройств базируются на интегральных характеристиках объектов и не позволяют определять температуру и тепловые потоки при нестационарных условиях.

Поставлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена теоретическому описанию теплового взаимодействия объекта термостатирования, термоэлектрического преобразователя энергии, системы отвода тепла и теплоизоляции как базовых элементов ПУНО.

Основные допущения для математической модели теплопроводности в твердых телах:

- температура пластины-держателя, непосредственно контактирующей с пробирками или планшетом, является рабочей температурой ПУНО;
- пластина-держатель имеет правильную прямоугольную форму (наличие лунок не рассматривается);
- все рассматриваемые материалы однородны по составу и изотропны по теплофизическим свойствам;
- контакты между отдельными элементами устройства принимаем идеальными;

- теплоотдача с боковых поверхностей пластины, термоэлементов и радиатора не рассматривается;
- для реализации процесса циклического нагрева - охлаждения задается закон изменения вектора плотности тока $\vec{j}$ по направлению и по модулю, который выражается как $\vec{j} = f(\tau)$.

Математическая модель теплообмена и течения в каналах радиатора устройства нагрева и охлаждения строится на следующих допущениях:

- существует доминирующее (маршевое) направление течения, примерно совпадающее с одной из координатных осей;
- вязкой диффузией и теплопроводностью в доминирующем направлении можно пренебречь по сравнению с вязкой диффузией и теплопроводностью в направлении, поперечном маршевому;
- плотность воздуха постоянна и одинакова для всех каналов.

Процессы в пространственной модели описываются уравнением теплопроводности для каждой i - й области Ω_i (рис.1), каждая из которых имеет различные теплофизические свойства, конфигурацию и граничные условия:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial \tau} + \text{div}(-[\lambda]_i \text{grad} T) = S_{T_i},$$

где $T = T(x, y, z, \tau)$ - температура; c_i - теплоемкость; ρ_i - плотность; $[\lambda]_i$ - коэффициент теплопроводности; τ - время; S_{T_i} - источниковый член, учитывающий источники и стоки тепла.

Здесь

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{bmatrix}, \quad \lambda_{xy} = \lambda_{yz}, \lambda_{xz} = \lambda_{zx}, \lambda_{yz} = \lambda_{zy}.$$

При расчете областей Ω_3, Ω_4 в термоэлементах теплофизические свойства представлены в виде эффективных плотности и коэффициента теплопроводности при сохранении эффективного объема $\tilde{V}_i$, $i=3, 4$:

$$[\tilde{\lambda}]_i = [\lambda]_i K_i + [\lambda]_0 (1 - K_i),$$

$$\tilde{\rho}_i = \rho_i K_i + \rho_0 (1 - K_i),$$

где $K_i = \frac{V_i}{\tilde{V}_i}$ - коэффициент преобразования; V_i - объем материала; ρ_i и ρ_0 - плотность материала и воздуха соответственно; $[\lambda]_i$ и $[\lambda]_0$ - коэффициент теплопроводности материала и воздуха соответственно.

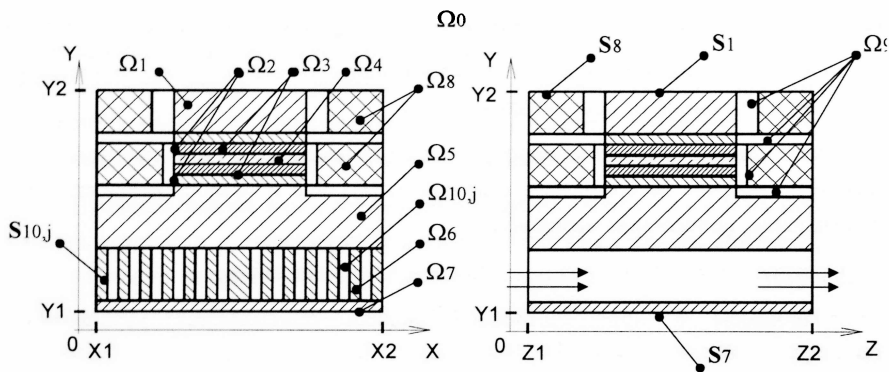


Рис. 1. Схема области для расчета устройства:

- Ω_0 – окружающая среда;
- Ω_1 – термостатируемая пластина;
- Ω_2 – алюминиевые теплопереходы;
- Ω_3 – медные спаи;
- Ω_4 – полупроводниковый слой;
- Ω_5 – радиатор;
- Ω_6 – оребрение;
- Ω_7 – дефиллятор;
- Ω_8 – теплоизоляция;
- Ω_9 – воздушные прослойки;
- Ω_{10j} – каналы охлаждения;
- S_1 – площадь верхней поверхности пластины;
- S_7 – площадь нижней поверхности радиатора;
- S_8 – площадь верхней поверхности теплоизоляции.

Источники и стоки тепла для уравнений теплопроводности:

$$S_{Ti} = 0, \quad i=0, 1, 2, 5-9,$$

$$S_{T3} = \frac{K_3}{\bar{V}_3} \cdot Q_{T3},$$

$$S_{T4} = \frac{K_4}{\bar{V}_4} \cdot (Q_{J4} + Q_{T4}),$$

где Q_{T3}, Q_{T4} - тепло Томсона, выделяемое или поглощаемое на холодном спае термоэлемента ($i=3$) или в полупроводниковых ветвях ($i=4$); Q_{J4} - тепло Джоуля, выделяемое в полупроводниках.

Начальным условием является равномерное распределение температуры по объему

$$T(\Omega_i)|_{\tau=0} = T_0, \quad i=0, 1, 2, 5-9.$$

Граничные условия заданы на всех поверхностях каждой области.

Для области пластины-держателя Ω_1 по поверхности S_1 ($y=Y2$) заданы условия естественной конвекции:

$$(-[\lambda_1] \text{grad} T, \vec{n})|_{S_1} = \bar{\alpha}(T - \bar{T}_f)|_{S_1},$$

где $\bar{T}_f$ - средняя по поверхности S_1 температура окружающей среды; $\bar{\alpha}$ - средний по поверхности S_1 коэффициент теплоотдачи; $\vec{n}$ - нормаль к поверхности пластины на границе с окружающей средой.

Такие же граничные условия на нижней поверхности S_7 дефилятора Ω_7 ($y=Y1$):

$$(-[\lambda_7] \text{grad} T, \vec{n})|_{S_7} = \bar{\alpha}(T - \bar{T}_f)|_{S_7},$$

и на верхней поверхности S_8 теплоизоляции Ω_8 ($y=Y2$):

$$(-[\lambda_8] \text{grad} T, \vec{n})|_{S_8} = \bar{\alpha}(T - \bar{T}_f)|_{S_8}.$$

Для каждого j -го охлаждающего канала Ω_{10j} на границах $S_{10,j}$ с областями $\Omega_5, \Omega_6, \Omega_7$ с воздухом в канале задаются граничные условия для вынужденного теплообмена:

$$(-[\lambda_i] \text{grad} T, \vec{n})|_{S_{10,j}} = \bar{\alpha}_j (T - \Theta_{10,j})|_{S_{10,j}}, \quad i=5, 6, 7,$$

где $\Theta_{10,j}$ - температура охлаждающего воздуха в каналах охлаждения.

На вертикальных поверхностях всего устройства ($x = X1, X2; z = Z1, Z2$) по принятому выше допущению

$$(\vec{q}, \vec{n})|_{S_{0,i}} = 0, \quad i=5, 6, 7, 8, 9.$$

На остальных границах сопряжения поверхностей $(\Omega_1 - \Omega_9)$ заданы условия равенства тепловых потоков:

$$(\vec{q}, \vec{n})|_{S_{k-l}} = (\vec{q}, \vec{n})|_{S_{l-k}}, \quad k \neq l, \quad k, l = 1-9.$$

Для описания вынужденного течения воздуха в j -м канале охлаждения ($j=1, n$) используются:

– уравнение неразрывности в виде уравнения расхода воздуха

$$\rho_j \vec{w}_j S_{fj} = G_j,$$

где ρ_j - плотность воздуха ; $\vec{w}_j$ - вектор скорости; S_{fj} - площадь поперечного сечения канала; G_j - расход;

– уравнение конвективно-диффузионного переноса

$$\frac{\partial(\rho_j c_{pj} \Theta_j)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_j \vec{w}_j c_{pj} \Theta_j)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_j \cdot \frac{\partial \Theta_j}{\partial z} \right) = 0,$$

где Θ_j - температура воздуха; c_{pj} - изобарная теплоемкость воздуха; λ_j - коэффициент теплопроводности воздуха.

Краевые условия: на входе в канал

$$\Theta_j|_{S_{10}} = \Theta_{0j}|_{S_{10}}, \quad \vec{w}|_{Z1} = \vec{w}_0;$$

на стенках канала :

$$\Theta_j = \Theta_j(\tau, x, y, z), \quad w_j = 0.$$

В качестве начальных условий для охлаждающего воздуха задается скорость потока во входном сечении

$$w_j(0) = w_0$$

и распределение температуры

$$\Theta_j(0, \Omega_{10,j}) = \Theta_{0j}.$$

Граничные условия на границах сопряжения со стенками j -го канала:

$$\bar{\alpha}_j(\bar{T}_j - \Theta_j) = -\left(\bar{\lambda}_j \frac{\partial \bar{T}_j}{\partial n}\right)\bigg|_{S_{10,j}},$$

где средний по поверхности коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}_j$ определяется с помощью безразмерного числа Нуссельта:

$$\bar{\alpha}_j = \overline{Nu}_j \frac{\lambda_j}{d_j}.$$

Для решения задачи теплообмена на границах каналов охлаждения был разработан эффективный метод численного решения уравнений энергии для воздуха в каналах в сопряжении с уравнением теплопроводности для рабочего участка амплификатора, использующий технологию численных расчетов на несогласованных сетках. При этом каждый канал разбивается на контрольные объемы, боковой поверхностью которых служат границы каналов. Для каждого контрольного объема определяется коэффициент теплоотдачи, а из решения задачи теплопроводности находится средняя температура стенки.

Тепловой поток от стенок радиатора к воздуху определяется при известной температуре стенки T_{w_j} в результате решения системы уравнений для воздуха,

$$Q'_j = \alpha_j(\Theta_j - T_{w_j})S_b.$$

Тепловой поток со стороны воздуха к стенкам определяется при решении уравнения теплопроводности для боковых стенок канала

$$Q''_j = \alpha_j(T_{b_j} - \Theta_j)S_b,$$

причем, из условий сопряжения

$$Q'_j + Q''_j = 0.$$

По представленной математической модели автором была создана методика расчета температурного поля и тепловых потоков в тепловой системе нагрева - охлаждения на различных режимах работы.

Автором разработаны алгоритм и программное обеспечение для расчета нестационарного пространственного теплового состояния термоэлектрического устройства нагрева - охлаждения с большими несимметричными градиентами температур. Главной отличительной особенностью разработанного программного обеспечения, является построение разностных схем непосредственно из выражений для теплового баланса, что обеспечивает точное соблюдение интегрального теплового баланса для численного решения.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований серийно выпускаемого термоэлектрического устройства "ЦиклоТемп-106" и разработанного устройства "ЦиклоТемп-107" на стадии стендовых испытаний.

Основными задачами эксперимента являются:

- определение производительности устройств на режиме циклирования;
- проверка принятых допущений и определение точности расчетов теплового состояния устройств по предложенным упрощенной и уточненной моделям.

При сравнении расчетных и экспериментальных данных были использованы результаты совместных исследований МГТУ им. Н.Э. Баумана и предприятия "СТМ" (г. Москва).

Из проведенных экспериментальных исследований устройств "ЦиклоТемп-106" и "ЦиклоТемп-107", а также сравнения с ними соответствующих расчетных значений, следуют выводы:

- повышении производительности работы ПУНО невозможно за счет использования принципа геометрического подобия, поскольку увеличение емкости устройства значительно повышает инерционность конструкции;
- повышение производительности работы ПУНО возможно за счет выбора схемы работы устройства и подбора оптимальных конструктивных параметров;
- разработанный упрощенный метод расчета позволяет исследовать температуру и тепловые потоки, а также определять производительность ПУНО, при этом погрешность определения температуры составляет не более 10 % на режиме циклирования (рис.2) и 12 % на режиме захлаживания (рис.3).

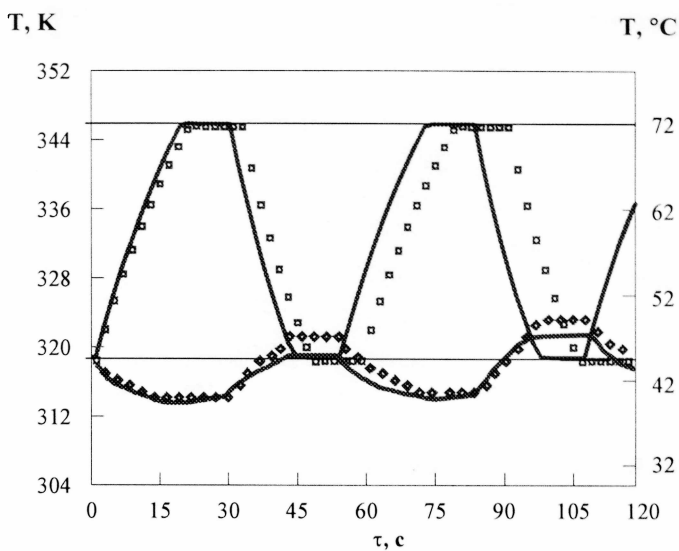


Рис.2. Изменение температурного профиля по циклу.

1) температура пластины-держателя:

- - расчет по предложенной пространственной модели;
- □ □ - экспериментальные данные;

2) температура в центре радиатора:

- - расчет по предложенной пространственной модели;
- ♦ ♦ ♦ - экспериментальные данные;

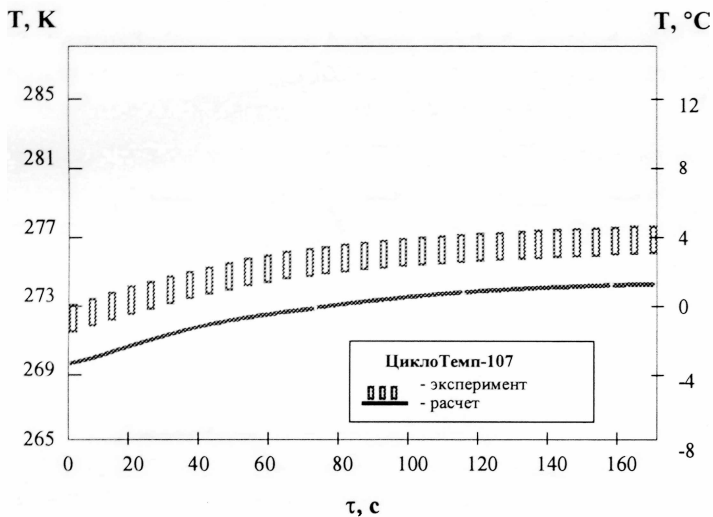


Рис.3. Температура захлаживания.

В четвертой главе рассмотрены результаты теоретического исследования теплового взаимодействия между элементами термоэлектрического устройства нагрева и охлаждения для двух различных конструктивных исполнений с помощью прямого численного моделирования методом контрольного объема (рис.4, 5).

Проведено исследование влияния изоляции рабочего участка, длины ребер радиатора и расхода охлаждающего воздуха в каналах на рабочие характеристики устройства. Даны рекомендации для повышения эффективности спроектированного устройства "ЦиклоТемп-107".

Основные выводы и итоги работы.

1. Проведенные экспериментальные исследования устройств "ЦиклоТемп-106" и "ЦиклоТемп-107" показали, что повышение эффективности работы ПУНО возможно за счет выбора схемы работы устройства и подбора оптимальных конструктивных параметров. С другой стороны, повышении производительности работы ПУНО невозможно за счет использования принципа геометрического подобия, поскольку при увеличении емкости устройства неизбежно увеличение размеров, что ведет к недопустимой для устройств данного назначения инерционности.

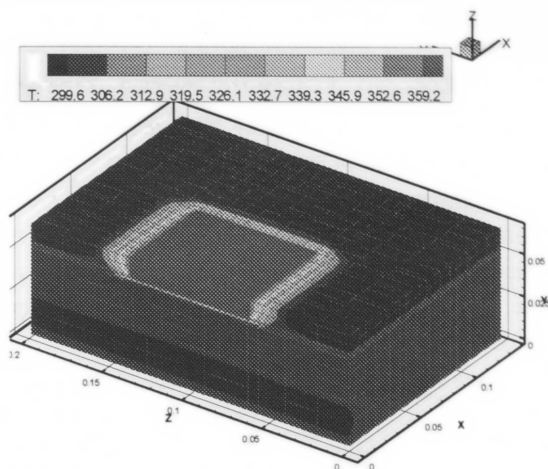


Рис.4. Температурное поле при циклировании.

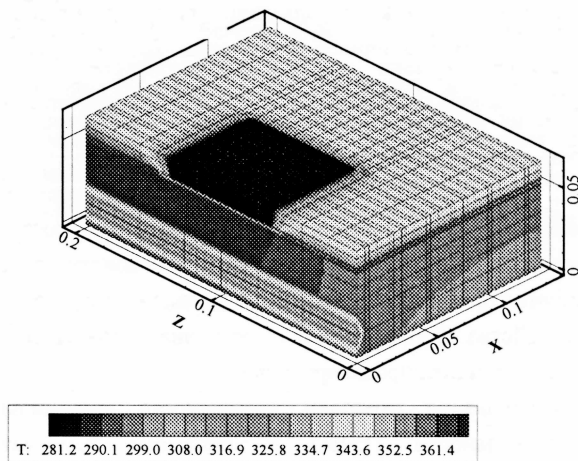


Рис.5. Температурное поле при захлаживании.

2. Для сравнения эффективности лабораторных ПУНО предложено ввести понятия:

- производительности устройства, равной отношению объема обрабатываемого биоматериала к суммарному времени выполнения задаваемой пользователем программы;
- удельной мощности, равной отношению подводимой мощности к объему обрабатываемого материала;
- температуры захлаживания, равной минимально возможной температуре держателя пробирок с биоматериалом на режиме стационарного охлаждения.

3. Разработана математическая модель нестационарных процессов нагрева и охлаждения в прецизионном термоэлектрическом ПУНО. При этом термоэлектрические источники и граничные условия, записываются в дифференциальной форме, что значительно снижает число вводимых ограничений и позволяет учитывать нелинейность теплофизических свойств полупроводниковых материалов и граничных условий в каналах радиатора.

4. Разработан упрощенный метод расчета температуры и тепловых потоков в ПУНО, который может быть использован при проектировании термоэлектрических устройств различного назначения. Для лабораторных ПУНО погрешность расчета составляет не более 5% на режиме циклирования и 12 % на режиме захлаживания. Для малоинерционных устройств погрешность расчета уменьшается.

5. Разработан метод расчета ПУНО в пространственной постановке, позволяющий с высокой точностью определять тепловое состояние устройств нагрева и охлаждения различного назначения и конструктивного исполнения на различных режимах работы. Использование разработанной методики расчета устройства "ЦиклоТемп-107" позволило снизить затраты на его создание на ранних стадиях проектирования.

6. Теоретические исследования показали возможность значительного увеличения производительности ПУНО и снижения температуры захлаживания за счет изменения конструктивных параметров устройства.

7. На основании проведенных исследований совместно с предприятием "СТМ" разработано и изготовлено лабораторное ПУНО для проведения ПЦР-диагности "ЦиклоТемп-107".

8. Экспериментальное сравнение рабочих параметров устройства "ЦиклоТемп-107" и существующего устройства "ЦиклоТемп-106" показало повышение производительности (по двухтемпературной программе 20 циклов 45°C-94°C) на **120%** (с $4.8 \cdot 10^{-6}$ дм³/сек до $11.0 \cdot 10^{-6}$ дм³/сек); снижение удельной подводимой мощности на **24 %** (с $6.6 \cdot 10^{-3}$ Вт/ дм³ до $5.0 \cdot 10^{-3}$ Вт/ дм³); снижение температуры захлаживания с +4°C до - 4° (при температуре в помещении равной 20°C).

Публикации по теме диссертации:

1. Чернышев А.В., Прокофьев А.В., Белова О.В. К вопросу разработки, исследования и производства комплекта оборудования для ПЦР диагностики // Матер. I-ой Всероссийской научно-практической конференции по применению ПЦР. – Сочи, 1996. – С. 118.
2. Белова О.В., Чернышев А.В. К вопросу разработки и исследования высокопроизводительного оборудования для ПЦР-диагностики // Матер. II-ой Всероссийской научно-практической конференции по применению ПЦР. – М., 1996. – С. 100.
3. Чернышев А.В., Белова О.В. Разработка, расчет и проектирование пневмоэлетромеханического и электровакуумного оборудования. Термостатирующие устройства. Мет. ук. - М.: Изд-во МГТУ, 1998. - 75 с.
4. Чернышев А.В., Белова О.В. Метод решения сопряженной задачи конвективного теплообмена на примере термостатирующего устройства // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. - 1998. - № 4. - С. 77-87.