

*На правах рукописи*

**ФЕФЕЛОВ АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**УЛУЧШЕНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ И ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРОВ  
БОЛЬШОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Рязань – 2008

**Работа выполнена** на кафедре промышленной электроники ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

**Научный руководитель:** кандидат технических наук,  
доцент **Улитенко Александр Иванович**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор **Степанов Владимир Анатольевич**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент **Басов Вадим Александрович**

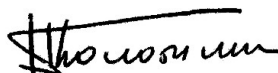
**Ведущая организация:** ОАО «Рязанский завод металлокерамических приборов»

Защита диссертации состоится 23 декабря 2008 года в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Автореферат разослан « 22 » ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.211.03  
д.т.н. проф.



Б.И. Колотилин

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

Обеспечение заданного теплового режима является одной из важнейших задач, требующих решения при проектировании электровакуумных и газоразрядных приборов большой и средней мощности. Наличие устойчивой тенденции к уменьшению массы и габаритов устройств существенно усложняет разработку для них систем охлаждения. Массогабаритные показатели и энергопотребление последних часто сопоставимы, а иногда и превосходят аналогичные показатели охлаждаемых приборов. Во многих случаях можно говорить о том, что проектируемые системы охлаждения существенным образом определяют не только внешний вид разрабатываемого оборудования, но и его потребительские характеристики. В связи с этим актуальной остается задача поиска новых конструктивных решений и разработки методов расчета, позволяющих уменьшить массу, габариты и энергопотребление проектируемых систем охлаждения.

### **Цель работы и задачи исследований**

Целью настоящей диссертационной работы является улучшение массогабаритных показателей электровакуумных и газоразрядных приборов большой и средней мощности. Работа направлена на повышение надежности работы и улучшение эксплуатационных параметров приборов вакуумной и плазменной электроники. В связи с этим в ней поставлены следующие задачи:

- установление вида критериальной зависимости, описывающей условия конвективного теплообмена в теплообменниках с каналами в виде плоского зазора в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re$ , соответствующем ламинарному режиму течения;
- повышение точности расчета методом граничных элементов полей температур в отдельных узлах электронных приборов;
- разработка методики расчета двухконтурных жидкостных систем охлаждения мощных электронных приборов и устройств, позволяющей минимизировать их массогабаритные показатели;
- создание высокоэффективных систем охлаждения газоразрядных лазеров.

### **Методы исследований**

При решении поставленных задач использовались методы дифференциального и интегрального исчисления. При проведении моделирования на ЭВМ использовались математический пакет программ MathCad и среда программирования Delphi.

### **Научная новизна**

1. Определены закономерности теплообмена между теплоносителем и стенкой плоского канала при наличии продольных градиентов температуры и плотности теплового потока в стенке.

2. Разработаны методики вычисления с заданной точностью квазисингулярных интегралов, входящих во вторую формулу Грина, применительно к решению трехмерных неосесимметричных задач теплопроводности в узлах электронных приборов.

3. Предложена методика теплового расчета систем двухконтурного жидкостного охлаждения электронных приборов, выполненных на основе теплообменников с каналами в виде плоского зазора, позволяющая определить значения основных параметров системы охлаждения, соответствующих минимальным массогабаритным показателям комплекса «теплообменник-насос внутреннего контура».

### **Практическая значимость результатов работы**

1. Установлено критериальное соотношение, описывающее процессы конвективного теплообмена в теплообменниках с каналами в виде плоского зазора, при существенном отличии условий теплообмена на стенках каналов от граничных условий  $T_c = const$  и  $q_c = const$ , где  $T_c, q_c$  - температура и плотность теплового потока на стенке соответственно;

2. Создано программное обеспечение по расчету с применением метода граничных элементов трехмерных неосесимметричных задач теплопроводности в элементах электронных приборов, основанное на предложенных методах вычисления квазисингулярных интегралов;

3. Разработаны принципы проектирования систем двухконтурного жидкостного охлаждения, с теплопередающим трактом на основе теплообменников

с каналами в виде плоского зазора, позволяющие оптимизировать массогабаритные показатели и уровень энергопотребления системы охлаждения;

4. Разработана оптимизированная по массогабаритным показателям и уровню энергопотребления двухконтурная жидкостная система охлаждения аргонового лазера с рассеиваемой мощностью 25 кВт;

5. Разработана полностью герметичная система жидкостно-воздушного охлаждения волноводного CO<sub>2</sub>-лазера с мощностью тепловыделения 30 Вт, предназначенного для эксплуатации на подвижных объектах;

6. Разработана схема проточного нагрева деионизованной воды, предназначенной для финишной очистки деталей электронных приборов, позволяющая снизить энергопотребление водонагревателя в 3,7 раза.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Использование предложенного критериального соотношения

$$\ln \left[ \frac{\text{Nu}}{(\text{Pr}/\text{Pr}_c)^{0,1447}} \right] = 6,273X^2 - 26,414X + 29,936$$

позволяет проводить расчет параметра Нуссельта Nu в каналах в форме плоского зазора со средней погрешностью 1,35% в диапазоне чисел Рейнольдса  $\text{Re} < 2100$  и Прандтля  $\text{Pr} < 300$ . Здесь  $H$  – величина зазора,  $L$  – длина канала,  $\text{Re}$ ,  $\text{Pr}$  – значения критериев Рейнольдса и Прандтля, рассчитанные по средней температуре теплоносителя в ядре потока,  $\text{Pr}_c$  – значение критерия Прандтля, рассчитанное при средней температуре стенки канала,  $X = \ln \left[ 7,93(H/L)^{0,0565} \text{Re}^{0,0609} \text{Pr}^{0,0552} \right]$ .

2. Применение разработанных методик вычисления квазисингулярных интегралов снижает погрешность вычислений значений температуры вблизи определяющих границ расчетной области с 20% до 0,02 % при использовании для вычисления интегралов квадратурных формул Гаусса с 6-ю узлами.

3. Разработанная методика расчета двухконтурных систем жидкостного охлаждения с одновременным учетом масс теплообменника и насоса позволяет существенно минимизировать массогабаритные показатели теплопередающего тракта (со 100 кг до 57 кг в применении к системе охлаждения аргонового лазера ЛГН-512 с мощностью тепловыделения 25 кВт).

4. Автономная система жидкостно-воздушного охлаждения с возвратно-поступательным движением теплоносителя обеспечивает передачу тепловых потоков до 30 Вт под действием температурного напора в жидкостном теплопередающем тракте не более 5 °С при уровне энергопотребления не более 4 Вт и полной герметичности жидкостной магистрали теплопередающего тракта.

#### **Достоверность результатов исследований**

Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением данных численного моделирования с известными аналитическими решениями и результатами экспериментов, практической апробацией результатов диссертационной работы, подтвержденной актами внедрения.

#### **Реализация результатов работы**

Разработанные принципы проектирования нашли практическое применение в ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и на предприятиях отрасли (ОАО «Рязанский завод металлокерамических приборов», НПЦ «Мера» ОАО «Плазма», ЗАО «Лазервариоракурс»), что подтверждается актами внедрения.

#### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались на 8-м Всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» (ФГУП «НПО «Орион», Москва, 2007).

#### **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 8 печатных работ (из них три работы в журналах из перечня ВАК), в том числе подана заявка на изобретение № 2007103619/12(003902), по которой получено решение о выдаче патента на изобретение.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 210 страницах машинописного текста, содержит 94 рисунка и 2 таблицы. Список литературы состоит из 76 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности темы, сформулированы основные задачи исследований, дано краткое содержание работы по главам, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации проведен краткий аналитический обзор состояния проблемы обеспечения заданного теплового режима работы оборудования. Рассмотрено влияние температуры на надежность электронных приборов. Описаны основные физические механизмы отвода тепловых потоков и рассмотрены реализуемые на основе этих механизмов основные типы систем охлаждения. При этом особое внимание уделено системам теплоотвода на основе механизмов кондуктивного и конвективного теплообмена и, в частности, системам жидкостного охлаждения. Отмечена необходимость разработки методики расчета таких систем, позволяющей минимизировать массогабаритные показатели проектируемых электровакуумных и газоразрядных приборов.

При анализе теплового режима проектируемого оборудования в ряде случаев возникает необходимость в проведении численного моделирования полей температур в отдельных узлах устройств. В работе проведен краткий сравнительный анализ метода конечных разностей, метода конечных элементов и метода граничных элементов (МГЭ), получивших наиболее широкое распространение. Отмечена перспективность использования МГЭ в задачах расчета полей температур в условиях сложной геометрии расчетной области и наличия сильных местных градиентов температуры. Одновременно отмечено наличие проблемы, связанной с обеспечением приемлемой точности расчетов этим методом значений температуры вблизи границ расчетной области.

По результатам проведенного анализа сформулированы основные цели настоящей диссертационной работы.

**Вторая глава** диссертации посвящена разработке принципов проектирования систем охлаждения с теплопередающим трактом на основе жидкостных магистралей. Как правило, такие системы включают в себя жидкостные или воздухоохлаждаемые теплообменники, насосы, соединительные магистрали и

резервуары с запасом теплоносителя. Важной частью расчета и оптимизации таких систем является анализ с использованием критериальных соотношений тепловых режимов основных элементов теплопередающего тракта: рубашки охлаждения прибора и рекуперативного теплообменника. В отличие от рубашки охлаждения, где обычно справедливы граничные условия (ГУ) 2-го рода, правильное определение типа ГУ в каналах теплообменника представляет собой более сложную задачу. В частности, как показывает анализ, условия теплообмена в них существенно отличаются от обычно используемых условий  $T_c = const$  и  $q_c = const$ . Данное обстоятельство, в свою очередь, вызвало необходимость более детального изучения процессов теплообмена в плоских каналах большой протяженности. Такая форма каналов способствует реализации наиболее приемлемого соотношения между коэффициентом теплоотдачи и площадью поверхности теплообмена в условиях жесткого ограничения по гидравлическому сопротивлению и массогабаритным показателям теплообменника. Кроме того, к достоинствам таких каналов следует отнести их высокую технологичность и доступность для проведения механической очистки.

Анализ геометрии и условий теплообмена в каналах рассматриваемых теплообменников позволяет выделить характерную область, содержащую весь комплекс полей искомых физических величин и соответствующих ГУ (см. рисунок 1).

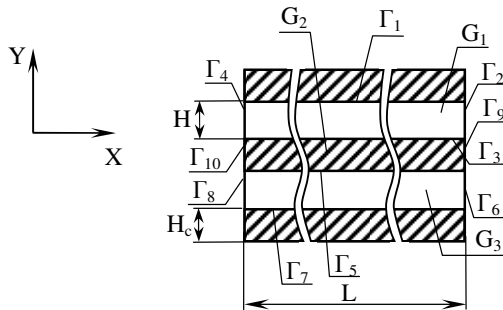
Математическая формулировка решаемой задачи при ламинарном режиме течения теплоносителей может быть записана в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho c_p \left( V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ \Delta T_c = 0 \\ \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right) + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( \mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) \right] - \\ - \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) - 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( \mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right) \right] = \rho \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} (\Delta \psi) - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} (\Delta \psi) \right) \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\Gamma_4} = T_{\text{вх},1}, \quad T_{\Gamma_6} = T_{\text{вх},2} \\ (\partial T / \partial n)_{\Gamma} = 0, \quad T \in \Gamma_2, \Gamma_8, \Gamma_9, \Gamma_{10} \\ \lambda (\partial T / \partial n)_{\Gamma} = \lambda_c (\partial T_c / \partial n)_{\Gamma}, \\ T = T_c, \quad T \in \Gamma_1, \Gamma_3, \Gamma_5, \Gamma_7, \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \psi = 0, \quad \psi \in \Gamma_3, \Gamma_7 \\ \psi = -\dot{m} / (\rho b), \quad \psi \in \Gamma_1, \Gamma_5, \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} = 0, \quad \psi \in \Gamma_2, \Gamma_8 \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0, \quad \psi \in \Gamma_2, \Gamma_8. \end{array} \right.$$

где  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $c_p$ ,  $\dot{m}$  – плотность, вязкость, удельная теплоемкость при постоянном давлении и массовый расход теплоносителя соответственно,  $\psi$  – функция тока,  $b$  – ширина канала (размер канала по оси  $z$ ),  $\lambda_c$  – теплопроводность материала стенок каналов,  $T_{\text{вх},1}$ ,  $T_{\text{вх},2}$  – температуры теплоносителей на входах в каналы горячего и холодного контуров,  $\Delta$  – оператор Лапласа в двухмерном случае.



**Рисунок 1 - Схематичное изображение характерной области теплообменника:**  $G_1, G_3$  – каналы;  $G_2$  – теплообменная пластина;  $\Gamma_1 - \Gamma_{10}$  – границы расчетных областей;  $H, H_c$  – высота канала и толщина теплообменной пластины соответственно;  $L$  – длина канала теплообменника.

Тестирование программы, разработанной на основе представленной математической модели, показало хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных: значения температур горячего и холодного теплоносителей на выходах из каналов теплообменника, полученные в результате расчетов, отличались от данных эксперимента не более чем на  $0,5 \div 1,5$  °C.

Дальнейшие исследования были направлены на получение критериального соотношения, описывающего процессы теплообмена в каналах в виде плоского зазора. Хорошее совпадение экспериментальных данных с данными численного моделирования позволило выполнить этот этап исследований на ЭВМ.

Обработка полученных данных методом теории подобия показала, что в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re < 2100$  и Прандтля  $Pr < 300$  особенности теплообмена в каналах рассматриваемой формы могут быть описаны критериальным соотношением

$$\ln \left[ \frac{Nu}{(Pr/Pr_c)^{0,1447}} \right] = 6,273X^2 - 26,414X + 29,936,$$

позволяющим рассчитывать коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  со средней погрешностью 1,35%.

Корректность анализа условий теплообмена, выполняемого на основе критериальных соотношений во многом определяется точностью вычисления средних температур рабочих жидкостей и поверхностей теплообмена. В последнем случае точность определения средней температуры, зависит от полноты информации о ее распределении по рассматриваемой поверхности. Задача о нахождении распределения температуры в твердом теле может быть эффективно решена с помощью МГЭ.

В трехмерном случае математическая формулировка задачи о распределении температуры в твердом теле с учетом ГУ 1-го, 2-го и 3-го рода имеет вид:

$$\begin{cases} \nabla^2 T(M) = 0, & M \in V \\ T(p) = const, & p \in S_i, i = \overline{1, I_1}, - \text{ГУ1,} \\ Q(p) = const, & p \in S_i, i = \overline{1, I_2}, - \text{ГУ2,} \\ \alpha [T_{\text{ж}} - T(p)] = -\lambda (\nabla T, \mathbf{n}(p)), & p \in S_i, i = \overline{1, I_3}, - \text{ГУ3,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ,  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$ ,  $\bar{V}$  - замыкание области  $V$ ,  $S_i$ ,

$i = \overline{1, I}$  - поверхности, которыми образовано тело ( $I = I_1 + I_2 + I_3$ ),  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи с поверхности  $S_i$ ,  $T_{\text{ж}}$  - температура жидкости, омывающей поверхность  $S_i$ ,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала объекта,  $Q(p)$  - плотность теплового потока через поверхность  $S_i$ .

Наличие фундаментального решения уравнения Лапласа в виде функции  $\omega(M, M_0) = 1/r(M, M_0)$ , где  $r(M, M_0)$  - расстояние между точками  $M$  и  $M_0$  рассматриваемого тела в декартовой системе координат, дает возможность после введения на поверхности рассматриваемой области сетки из  $N$  плоских треугольных граничных элементов (ГЭ) записать интегральный аналог первого уравнения системы (1) через вторую формулу Грина в виде

$$\theta(M)T(M) = \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{n=1}^{N_i} (q_{i,n} I_{i,n} - T_{i,n} I_{i,n}^*) \right], \quad (2)$$

где  $I$  - число поверхностей, которыми представляется тело,  $N_i$  - количество ГЭ  $i$ -й поверхности,  $\theta(M) = 2\pi$ , если  $M \in S_i$ , и  $\theta(M) = 4\pi$ , если  $M \in V$ ,

$$I_{i,n} = \int_{S_{i,n}} \omega(p, M) dS_{i,n}(p), \quad I_{i,n}^* = \int_{S_{i,n}} \omega^*(p, M) dS_{i,n}(p), \quad q_{i,n} = (\nabla T(\xi_{i,n}), \mathbf{n}(p)),$$

$p \in S_{i,n}$ ,  $\xi_{i,n}$  - узловая точка ГЭ (точка пересечения медиан треугольника)

$\omega^*(p, M) = (\nabla \omega^*(p, M), \mathbf{n}(p))$ ,  $\mathbf{n}(p)$  - вектор внешней единичной нормали к поверхности ГЭ,  $S_{i,n}$  - площадь  $n$ -го ГЭ  $i$ -й поверхности.

При численной реализации МГЭ квазисингулярный характер поведения фундаментального решения уравнения Лапласа при  $r(p, M) \rightarrow 0$  затрудняет численное интегрирование входящих во вторую формулу Грина интегралов, содержащих функции  $\omega(p, M)$  или  $\omega^*(p, M)$ . В связи с этим возникает потребность в разработке соответствующих методик расчета указанных интегралов.

*Методика расчета интегралов, содержащих  $\omega(p, M)$ .* В системе координат, связанной с треугольным ГЭ с номером  $n$  (см. рисунок 1) рассматриваемый интеграл после соответствующих преобразований может быть представлен в виде (индекс « $i$ » опущен)

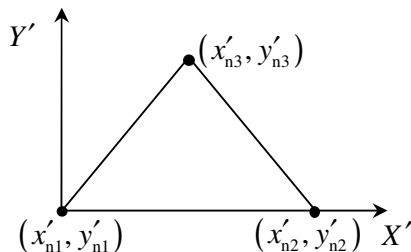
$$I_n = y'_{n3} \int_0^1 \ln \left| \frac{(x'_{n2} - x') - (x'_{n2} - x'_{n3})s + \sqrt{((x'_{n2} - x') - (x'_{n2} - x'_{n3})s)^2 + (y'_{n3}s - y')^2 + z'^2}}{x'_{n3}s - x' + \sqrt{(x'_{n3}s - x')^2 + (y'_{n3}s - y')^2 + z'^2}} \right| ds \quad (3)$$

или  $I_n = y'_{n3} (I_{n1} - I_{n2})$ , где  $I_{n1} = \int_0^1 \ln[f_1(s)] ds$ ,  $I_{n2} = \int_0^1 \ln[f_2(s)] ds$ , а  $f_1(s)$  и  $f_2(s)$

определяются следующими выражениями:

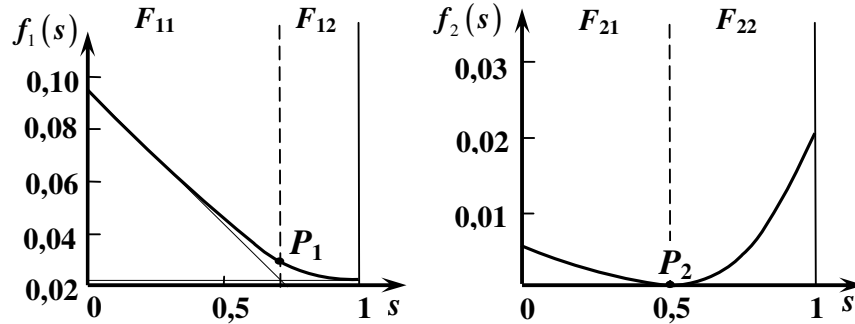
$$f_1(s) = (x'_{n2} - x') - (x'_{n2} - x'_{n3})s + \sqrt{((x'_{n2} - x') - (x'_{n2} - x'_{n3})s)^2 + (y'_{n3}s - y')^2 + z'^2},$$

$$f_2(s) = x'_{n3}s - x + \sqrt{(x'_{n3}s - x)^2 + (y'_{n3}s - y)^2 + z'^2}.$$



**Рисунок 2 - Положение треугольного граничного элемента с номером  $n$  в связанной с ним системе координат  $O'X'Y'Z'$ .**

Характер изменения функций  $f_1(s)$ ,  $f_2(s)$  на интервале интегрирования представлен на рисунке 3.



**Рисунок 3 - Характер изменения функций  $f_1(s)$ ,  $f_2(s)$  на интервале интегрирования**

Гладкость поведения функций  $f_1(s)$ ,  $f_2(s)$  в областях  $F_{11}$ ,  $F_{12}$ ,  $F_{21}$ ,  $F_{22}$  позволяет эффективно аппроксимировать их в этих областях многочленами второй степени и представить интегралы  $I_{n1}$ ,  $I_{n2}$  в виде

$$\begin{aligned}
 I_{n1} &= \int_0^{s_1} [\ln(|f_1(s)|) - \ln(|p_{11}(s)|)] ds + \int_0^{s_1} \ln(|p_{11}(s)|) ds + \\
 &+ \int_{s_1}^1 [\ln(|f_1(s)|) - \ln(|p_{12}(s)|)] ds + \int_{s_1}^1 \ln(|p_{12}(s)|) ds, \\
 I_{n2} &= \int_0^{s_2} [\ln(|f_2(s)|) - \ln(|p_{21}(s)|)] ds + \int_0^{s_2} \ln(|p_{21}(s)|) ds + \\
 &+ \int_{s_2}^1 [\ln(|f_2(s)|) - \ln(|p_{22}(s)|)] ds + \int_{s_2}^1 \ln(|p_{22}(s)|) ds,
 \end{aligned}$$

где  $s_1$ ,  $s_2$  - абсциссы точек  $P_1$  и  $P_2$ .

Вычисление значений интегралов  $I_n$ , проведенные с использованием описанной методики показали уменьшение погрешности вычисления  $I_n$  на 3 порядка величины.

*Методика расчета интегралов, содержащих  $\omega^*(p, M)$ .* Рассмотрим сначала внутреннюю задачу, т.е. задачу о вычислении значения температуры в какой-либо точке внутри области  $V$ , ограниченной образующими поверхностями рассматриваемого узла электронного прибора. В декартовой системе координат

O'X'Y'Z', связанной с ГЭ с номером  $n$ , выражение для рассматриваемого интеграла после некоторых преобразований будет иметь вид

$$I_n^* = \pm z' y'_{n3} \int_0^1 \frac{1}{(y'_{n3}s - y')^2 + z'^2} \times \left( \frac{(x'_{n2} - x') - (x'_{n2} - x'_{n3})s}{\sqrt{[(x'_{n2} - x') - (x'_{n2} - x'_{n3})s]^2 + (y'_{n3}s - y')^2 + z'^2}} - \frac{x'_{n3}s - x'}{\sqrt{(x'_{n3}s - x')^2 + (y'_{n3}s - y')^2 + z'^2}} \right) ds. \quad (4)$$

Представим интеграл  $I_n^*$  в виде  $I_n^* = \bar{I}_n^* + \delta(r_{n\xi}/l_n)$ , где  $\bar{I}_n^*$  - значение интеграла, вычисленного с применением квадратурной формулы Гаусса с числом узлов  $N$  на интервале интегрирования,  $\delta(r_{n\xi}/l_n)$  - ошибка интегрирования,  $r_{n\xi}$  - расстояние от точки  $\chi$  расчетной области до узловой точки (точки пересечения медиан)  $\xi$   $n$ -го ГЭ,  $l_n$  - длина наибольшей стороны ГЭ.

Рассматривая (2) при условии, что на всех участках поверхности  $S$  тела задано одинаковое значение температуры  $T_0$ , для любой точки области  $V$  получим

$$4\pi = - \sum_{n=1}^{N_{ГЭ}} \left[ \bar{I}_n^* + \delta(r_{n\xi}/l_n) \right], \quad (5)$$

где  $N_{ГЭ}$  - общее число ГЭ поверхности  $S$ .

Представим  $\delta(r_{n\xi}/l_n)$  в виде  $\delta(r_{n\xi}/l_n) = p(r_{n\xi}/l_n)^k$ , где  $p$  - некоторый неизвестный параметр. Из (5) найдем, что

$$p = - \left( 4\pi + \sum_{n=1}^{N_{ГЭ}} \bar{I}_n^* \right) / \sum_{n=1}^{N_{ГЭ}} \left( \frac{l_n}{r_{n\xi}} \right)^k.$$

Теперь выражение (2) в случае произвольного распределения температур по поверхности тела может быть записано в виде

$$4\pi T(\chi) = \sum_{i=1}^I \left\{ \sum_{n=1}^{N_i} \left[ q_{i,n} I_{i,n} - T_{i,n} \left( \bar{I}_{i,n}^* + p \left( l_n / r_{n\xi} \right)^k \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Значение показателя степени  $k$ , установленное опытным путем оказалось равно 4.

В случае решения внешней задачи методика расчета в целом аналогична рассмотренной ранее для внутренней задачи. Отличие заключается в выражении для параметра  $p$ , которое теперь принимает вид

$$p = - \sum_{n=1}^{N_{\Gamma\Omega}} \overline{I_n^*} / \sum_{n=1}^{N_{\Gamma\Omega}} \left( \frac{l_n}{r_{n\zeta}} \right)^k. \quad (7)$$

Расчеты значений температуры, проведенные в задачах, имеющих аналитическое решение, показали, что при использовании разработанных методик вычисления квазисингулярных интегралов погрешность вычислений значений температуры вблизи определяющих границ расчетной области снижается на три порядка величины.

Проведенные теоретические исследования послужили отправным моментом при разработке методики проектирования систем двухконтурного жидкостного охлаждения, позволяющей минимизировать их массогабаритные показатели. Поиск оптимального соотношения основных параметров системы охлаждения проводится на основе установленных в ходе разработки методики зависимостей массы, габаритного объема и КПД от потребляемой мощности для 92 марок центробежных насосов. В частности, в диапазоне мощностей насосов от 250 Вт до 5,5 кВт зависимость массы насоса от его мощности имеет следующий вид:

$$M_{\text{нас}} = 0,109 N_{\text{нас}}^{0,7462}.$$

Параметры задачи о поиске минимума массогабаритных показателей: мощность тепловыделения прибора, его основные геометрические размеры, максимально допустимая температура охлаждаемой поверхности  $T_{\text{пр, max}}$ , максимально допустимый уровень энергопотребления системы охлаждения, массовый расход, движущий напор и температура воды, поступающей во внешний контур системы охлаждения, максимально возможная длина теплообменника – считаются заданными. Далее, задаваясь некоторым (заведомо большим) значением площади поверхности теплообмена, подбираем необходимую величину массового расхода воды в горячем контуре, выдерживая при этом минимально возможную величину зазора в каналах. Далее рассчитываем суммарную массу комплекса «теплообменник-насос» и полученное значение сравниваем с таким, найденным на предыдущем шаге расчетов. При переходе к следующему шагу расчетов значение площади поверхности теплообмена последовательно уменьшаем. При этом необходимая величина массового расхода теплоносителя горячего контура, а также мощность и масса насоса, будут расти. По достиже-

нии минимума суммарной массы комплекса «жидкостный теплообменник-насос внутреннего контура» расчеты останавливаем.

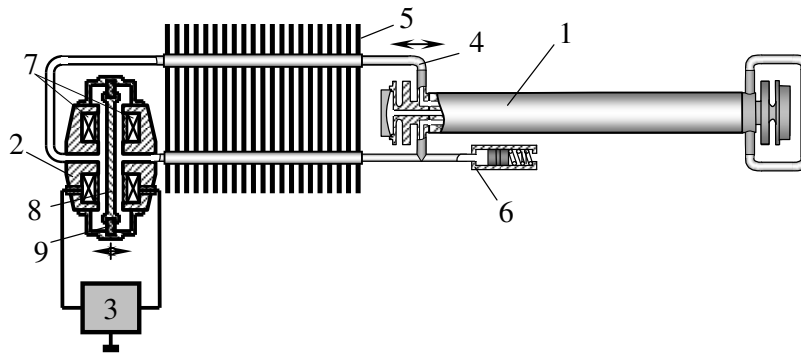
**В третьей главе** диссертации описаны результаты применения разработанных в главе 2 методик при конструировании систем охлаждения, предназначенных для решения конкретных задач.

Рассмотрены этапы проектирования системы двухконтурного жидкостного охлаждения аргонового лазера ЛГН-512 с мощностью тепловыделения 25 кВт. Параметры системы охлаждения, рассчитанные с использованием описанной в главе 2 методики минимизации массогабаритных показателей комплекса «жидкостный теплообменник-насос внутреннего контура», позволили разместить основные элементы системы в моноблоке размерами 680×640×280 мм. Общая масса системы охлаждения с моноблоком составила 57 кг, суммарное энергопотребление двух насосов «Агидель» - 800 Вт.

Приведено детальное описание этапов проектирования принципиально новой конструкции автономной системы охлаждения волноводного CO<sub>2</sub>-лазера с мощностью тепловыделения 30 Вт. Сравнительный анализ возможных вариантов конструкции теплообменника активного элемента, проведенный с привлечением математического аппарата МГЭ, изложенного в главе 2, привел к выполнению его корпуса в виде сплошного керамического цилиндра с тремя цилиндрическими сквозными каналами, расположенными в диаметральной плоскости, центральный из которых заполняется активной средой, а два крайних используются для прокачки охлаждающей жидкости.

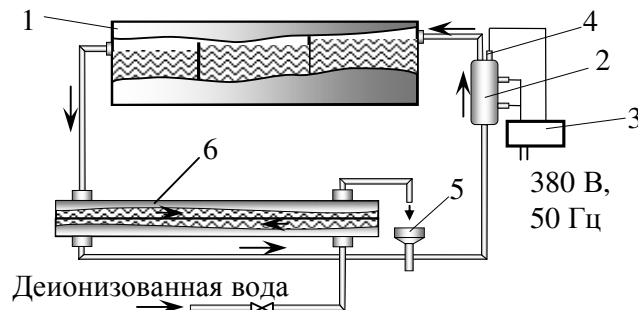
Общий вид сконструированной с учетом проведенных исследований жидкостно-воздушной системы охлаждения представлен на рисунке 4.

Прокачка теплоносителя внутреннего контура системы охлаждения в возвратно-поступательном режиме, что обеспечивается соответствующим конструктивным исполнением насоса (электромагнитного нагнетателя), позволяет обеспечить надежную герметизацию жидкостного участка теплопередающего тракта при одновременном снижении массы насоса и потребляемой им мощности. Результаты испытаний системы охлаждения показали, что при частоте колебаний поршня 0,3 Гц температура оболочки разрядного капилляра составила 36,8 °С. При этом, уровень энергопотребления системы составил 4 Вт. Термическое сопротивление жидкостного теплопередающего тракта оказалось равным 5°С.



**Рисунок 4 - Конструкция жидкостной системы охлаждения волноводного  $\text{CO}_2$ -лазера с возвратно-поступательным режимом движения теплоносителя:** 1 - активный элемент лазера со встроенным теплообменником; 2 - двухкамерный нагреватель; 3 - импульсный источник питания; 4 - жидкостная магистраль; 5 - воздушный радиатор; 6 - компенсатор теплового расширения жидкости; 7 - кольцевые электромагниты; 8 - якорь (поршень); 9 - амортизатор

Рассмотрены результаты применения разработанных критериальных соотношений и программ для проектирования энергосберегающей системы проточного нагрева деионизованной воды, используемой в технологическом процессе финишной очистки деталей электронных приборов. Исследование технологического процесса позволило предложить следующую схему нагрева деионизованной воды (см. рисунок 5).



**Рисунок 5 - Энергосберегающая схема проточного нагрева деионизованной воды:** 1 – ванна каскадного типа; 2 – электронагреватель; 3 – блок питания с системой терморегулирования; 4 – термочувствительный элемент; 5 – слив, 6 – теплообменник.

Снижение энергопотребления на нагрев воды с 16,3 кВт до 4,4 кВт, достигнута за счет использования тепловой энергии отработанной воды, которая с выхода ванны 1 поступает в горячий контур пластинчатого теплообменника 6,



где она, двигаясь в противотоке с холодной водой, передает ей запасенное тепло.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем.

1. Определены закономерности теплообмена между теплоносителем и стенкой плоского канала при наличии продольных градиентов температуры и плотности теплового потока в стенке, предложено критериальное соотношение, позволяющие проводить расчет процессов теплообмена в теплообменнике с каналами в виде плоского зазора с погрешностью определения критерия  $Nu$  1,35% в диапазоне чисел  $Re < 2100$  и  $Pr < 300$ .

2. Разработаны методики вычисления квазисингулярных интегралов от фундаментального решения уравнения Лапласа и его нормальной производной, позволяющие снизить с 20% до 0,02 % погрешность вычислений значений температуры вблизи определяющих границ расчетной области при использовании для вычисления интегралов квадратурных формул Гаусса с 6-ю узлами.

3. Разработана методика расчета систем двухконтурного жидкостного охлаждения электронных приборов с теплопередающим трактом на основе теплообменников с каналами в виде плоского зазора, позволяющая минимизировать массогабаритные показатели комплекса «прибор - система охлаждения».

4. Разработана система жидкостного охлаждения аргонового лазера ЛГН-512, обеспечивающая при массе 57 кг и энергопотреблении на прокачку теплоносителя 800 Вт отвод и рассеяние теплового потока мощностью 25 кВт.

5. Разработана полностью герметичная система жидкостно-воздушного охлаждения  $CO_2$ -лазера, предназначенного для эксплуатации на подвижных объектах, обеспечивающая отвод и рассеяние теплового потока мощностью 30 Вт при энергопотреблении 4 Вт и термическом сопротивлении теплопередающего тракта  $5^\circ C$ .

4. Разработана энергосберегающая система нагрева деионизованной воды, предназначенной для промывки деталей электронных приборов, позволяющая снизить уровень энергопотребления электронагревателя в 3,7 раза.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Фефелов А.А. Применение математического аппарата метода граничных элементов для решения задач теплопроводности // Вестник рязанской государственной радиотехнической академии. – 2005. - Вып. 16. – С. 117 – 120.

2. Фефелов А.А. Разработка методики реализации метода граничных элементов и использование разработанного алгоритма триангуляции поверхности для решения задач теплопроводности // Научное приборостроение: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА – 2006. – С. 83 – 90.

3. Улитенко А.И., Фефелов А.А. Высокоэффективный жидкостный теплообменник с плоскими каналами // Современные наукоемкие технологии. – 2007. – №10. – С. 24 – 27.

4. Улитенко А.И., Фефелов А.А. Критериальное уравнение для пластинчатого теплообменника с гладкими каналами без турбулизаторов // Современные наукоемкие технологии. – 2007. – №11. – С. 29 – 33.

5. Фефелов А.А., Улитенко А.И., Маннанов А.Ф. Решение методом граничных элементов задачи о распределении температуры в призматическом стержне при заданных граничных условиях первого и третьего рода // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета.– 2007. – Вып. 21. – С. 81 – 85.

6. Фефелов А.А. Применение математического аппарата метода граничных элементов при решении задачи Дирихле в системах, не обладающих аксиальной симметрией // Тезисы докладов 8-го всероссийского семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики», ФГУП «НПО «Орион», Москва, 2007.

7. Фефелов А.А. Оценка квазисингулярных интегралов при численной реализации метода граничных элементов в трехмерных неосесимметричных задачах теплопроводности // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета. – 2008. – Вып. 23. – №1. – С. 24 – 30.

8. Заявка № 2007103619/12(003902), Российская Федерация, МПК А 01 J 9/04 (2006.01). Устройство для охлаждения молока / А.И. Улитенко, А.А. Фефелов (РФ); заявители Улитенко А.И., Фефелов А.А.; Заявл. 30.01.2007; приоритет 30.01.2007.

**ФЕФЕЛОВ АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**УЛУЧШЕНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ И ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРОВ  
БОЛЬШОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 22 ноября 2008 г. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага ксероксная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 51 экз. Заказ №

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ