

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Есина Ия Васильевна

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА
В ЗАМКНУТОЙ ТРЕХМЕРНОЙ ПОЛОСТИ

Специальность 06.14.04 - "Промышленная теплоэнергетика"

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 1975

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола на кафедре промышленной теплоэнергетики.

Научный консультант:

кандидат технических наук, доцент Ю.А. Короленко

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор И.И. Морозов (г. Челябинск);

кандидат технических наук А.С. Ляликов (г. Томск)

Ведущее предприятие - НИИТ г. Челябинск

Автореферат разослан " ____ " _____ 1975г.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1975г.

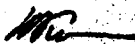
в 15 часов, на заседании Совета по присуждению ученых степеней приборостроительного и энергетического факультетов Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола в ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

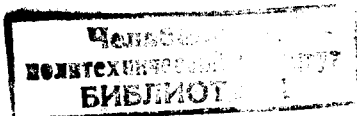
Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 454044, г. Челябинск, 44, проспект им. В.И. Ленина, 76, Ученому секретарю Совета института.

Ученый секретарь Совета

кандидат технических наук



Ю.А. Короленко



Актуальность проблемы. В период развернутого строительства коммунизма, когда в соответствии с программой партии в широких масштабах проводится комплексная механизация и автоматизация производственных процессов, требуется создание новых, более совершенных электронных аппаратов. Развитие электронной промышленности ставит перед инженерами ряд неотложных проблем, важное место среди которых занимают задачи, связанные с расчетом температурных режимов радиоэлектронных приборов. Как известно, 90-95% всех форм энергии в радиоэлектронном аппарате (РЭА) превращается в тепло. Это приводит к повышению температуры прибора в целом и особенно тех его элементов, в которых происходит выделение тепла. Надежная же работа приборов ограничена некоторой максимальной температурой, допустимой для наиболее ответственных элементов. Поэтому важно обеспечить такой тепловой режим, который гарантировал бы надежную работу как отдельных узлов, так и прибора в целом.

Для обеспечения нормального теплового режима аппарата следует выбирать оптимальную систему охлаждения его, определенным образом размещать отдельные части аппарата относительно друг друга, т.е. конструкция прибора во многом определяется его тепловым режимом. Кроме того, умение рассчитать в процессе проектирования температуры отдельных частей прибора позволит более точно производить расчеты электрических и магнитных цепей, что позволит обосновывать тот или иной вариант конструкции.

Современные РЭА представляют собой систему многих тел с сосредоточенными источниками тепла и состоят из нескольких отдельных зон (областей) самостоятельных в тепловом отношении. Каждая обособленная зона, образующаяся вокруг тепловыделяющего элемента, может быть представлена в виде полости той или иной конфигурации (обычно в форме параллелепипеда или цилиндра), внутри которой расположен нагреватель. Границы полости могут быть либо теплопроводными, либо адиабатными, что определяется положением рассматриваемой зоны внутри РЭА. Теплообмен в таких полостях в большинстве случаев осуществляется свободной конвекцией.

Цель работы. Целью диссертационной работы является исследование характера движения конвектирующей жидкости и закономерностей переноса тепла внутри полостей цилиндрической, либо имеющей форму прямого параллелепипеда, с нагревателем. В связи с этим,

задачи, решаемые в диссертации, сформулированы следующим образом:

- 1) определение качественной модели процесса теплообмена в замкнутых объемах;
- 2) разработка на основе этой модели метода обобщения полученных данных;
- 3) переработка и обобщение результатов исследования с целью получения критериальных зависимостей;
- 4) сопоставление полученных результатов с данными о теплообмене через прослойки классических форм.

Общая методика выполнения исследований. Для исследования свободной конвекции в цилиндрической полости использовался метод численного анализа полной системы уравнений конвективного теплообмена, включающей уравнения движения Навье-Стокса и уравнения неразрывности и энергии. Для полости, имеющей форму прямого параллелепипеда, единственно возможный путь - экспериментальное исследование.

Научная новизна. Исследован характер течения и теплообмен в цилиндрической полости с нагревателем: рассмотрены возможные формы движения и установлены закономерности переноса тепла. Впервые проведено визуальное наблюдение конвективного движения в полости, имеющей форму параллелепипеда, с центрально либо эксцентрично расположенным нагревателем. Для указанных замкнутых объемов получены критериальные уравнения, позволяющие рассчитать количество передаваемого через полость тепла.

Практическая ценность. Полученные критериальные зависимости описывают теплотдачу достаточно широко распространенных в радиоэлектронике нагревателей, таких как конденсаторы, корпуса радиоламп, дроссели, полупроводниковые элементы и т.д. Предварительный расчет теплосъема с названных элементов позволит выбрать наиболее рациональное их размещение.

Апробация работы. Диссертационная работа и отдельные её разделы докладывались и обсуждались на:

научно-технических конференциях Челябинского политехнического института на секции промышленной теплоэнергетики в 1972, 1973, 1974 гг.;

заседании научного семинара теплотехнических кафедр Томского политехнического института в 1971 г.

Публикация. По результатам выполненных исследований автором опубликовано 5 работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, приложения и содержит 119 страниц машинописного текста, 40 рисунков, 3 таблицы и список использованной литературы на 138 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан обзор и анализ работ Леонтьева А.И. и Кирдяшкина А.Г., Бояринцева Д.И., Лякина П.А., Якоба М., Гершуни Г.З., Жуховицкого Е.М., Тарунина Е.Л., Остроумова Г.А., Эмари А.Ф. и Чу Н.С., Макгрегора Р.К., Полежаева В.И., Мулла В. и Рамера А., Лыкова А.В. и Берковского Б.М., Бекманна В. и Крауссольда Х., Львовой Е.М. и Кудрявцева Е.В., Лэндиса и многих других, посвященных исследованию свободно-конвективного теплообмена в прослойках классических форм. Проведенный разбор позволил выбрать наиболее целесообразные методы исследования теплообмена в полостях, типичных для РЗА, а также способы обработки и обобщения опытных данных.

Во второй главе рассматривается задача о движении конвектирующей жидкости и переносе тепла внутри цилиндрической полости с центральным расположенным нагревателем. Холодильником является верхнее основание наружного цилиндра. Сила тяжести направлена вертикально. Боковая и нижняя поверхности являются адиабатными. Температуры нагревателя T_1 и холодильника T_2 постоянны по поверхности. При заданных условиях составляющие скорости u, v, w и температура T жидкости в полости меняются только по высоте и в радиальном направлении. Уравнение движения по координате φ в цилиндрических координатах r, φ, z тождественно равно нулю и

$$\frac{\partial v}{\partial \varphi} = \frac{\partial u}{\partial \varphi} = \frac{\partial w}{\partial \varphi} = \frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0.$$

Таким образом, задача сводится к двумерному виду.

Решение уравнений конвективного теплообмена численными методами может быть сведено к решению уравнений для функции тока Ψ и вихря ζ . Переходя к безразмерным переменным, система уравнений относительно Ψ и ζ может быть записана в следующем виде

$$\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial \varrho}{\partial z} - \frac{1}{\varrho} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial \varrho}{\partial z} - \frac{1}{\varrho^2} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \varrho =$$

$$= -Gz \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial^2 \varrho}{\partial z^2} + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial \varrho}{\partial z} - \frac{\varrho}{\varrho^2} + \frac{\partial^2 \varrho}{\partial z^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{1}{\varrho} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{\rho_2} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = z \varrho + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \quad (3)$$

где

$$\theta = \frac{T - T_2}{T_1 - T_2}, \quad Gz = g\beta(T_1 - T_2) \frac{H^3}{\nu^2}, \quad \rho_2 = \frac{\nu}{\alpha},$$

β, ν, α - теплофизические характеристики конвектирующей среды;

H - высота полости.

При переходе к безразмерному виду в качестве масштабов преобразования выбраны следующие величины: νH - для функции тока,

H^2/ν - времени, H - длины, $T_1 - T_2$ - температуры.

Граничные условия

$$1. z=0, z_n/H < z < R/H; \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0.$$

$$2. z = z_n/H, 0 < z < h/H; \quad \theta = 1, \Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0.$$

$$3. z = h/H, 0 < z < z_n/H; \quad \theta = 1, \Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0.$$

$$4. z=0, h/H < z < 1; \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \Psi = \varrho = 0.$$

$$5. z=1, 0 < z < R/H; \quad \theta = \Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0.$$

$$6. z = R/H, 0 < z < 1; \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0.$$

Здесь z_n, h - радиус и высота нагревателя; R - радиус полости.

Решение уравнений (1-3) было проведено с помощью метода сеток, для чего использовалась центральная явная конечно-разностная аппроксимация производных первого и второго порядка. Точность

аппроксимации составляет $O(\Delta\tau + \Delta z^2 + \Delta z^3) \ln 1/\Delta\tau$. Для вывода уравнений вихря на твердой границе использовалось приближенное граничное условие I-го порядка точности. Уравнение (3) решалось итерационным методом Либмана. Из анализа устойчивости счета, проведенного методом исследования индекса разностной схемы, были получены ограничения на шаги по времени и координатам.

$$\Delta\tau \leq \left[\frac{2}{Pr} \left(\frac{1}{\Delta z^2} + \frac{1}{\Delta z^3} \right) \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$\max \left| \frac{1}{z_i} \frac{\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1}}{2\Delta z} \right| \leq \frac{2}{Pr\Delta z} + \frac{1}{Pr z_i}; \quad (5)$$

$$\max \left| -\frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}}{2\Delta z} \cdot \frac{1}{z_i} \right| \leq \frac{2}{Pr\Delta z}. \quad (6)$$

Чтобы избежать нарушения условия устойчивости (4) при расчете температуры на линии симметрии вместо явного уравнения использовалось неявное. Неявная формула была использована так: сначала явным методом определялось значение температуры на соседнем слое, а затем - неявным, на оси симметрии.

В работе исследовались стационарные процессы конвективного теплообмена. Решение стационарной задачи проводилось методом установления, исходя из нестационарной системы (1-3), когда время неограниченно растёт.

Расчеты выполнялись на сетках 10×42 и 12×30 . Во всех расчетах число Прандтля принималось равным 0,7, число Грасгофа изменялось от 500 до 10^6 . Соотношение размеров нагревателя и корпуса было в пределах $0,5 \leq h/H \leq 0,833$; $0,167 \leq z_0/R \leq 0,7$. При расчетах шаг по координатам принимался одинаковым, т.е. $\Delta z = \Delta Z$. Расчеты проводились на машине М-222.

Результатами расчета являлись поля функции тока температуры и вихря. По этим величинам определялись локальные значения скоростей. По результатам численного решения рассчитывались средние тепловые потоки на горячей и холодной поверхностях, а также число Нуссельта, отнесенное к горячей стенке

$$Nu = \frac{\alpha_n H}{\lambda} = \frac{\bar{Q}_n H}{(T_1 - T_2) \Gamma_n \lambda} = \frac{\left(\frac{z_n}{H}\right)^2 \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + 2 \frac{z_n h}{H^2} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}}{\left(\frac{z_n}{H}\right)^2 + 2 \frac{z_n h}{H^2}}, \quad (7)$$

где \bar{Q}_n - тепловой поток на горячей поверхности.

Расчеты показали, что движение в полости существует даже при малых перепадах температур ($Ge = 500$), хотя, пока $Ge < Ge_{кр}$ на теплоперенос оно влияния не оказывает. Такой режим теплообмена принято называть режимом теплопроводности.

Граничное значение числа Грасгофа, при котором наблюдается увеличение теплопереноса, находится в интервале $4,5 < Gg_{кр} < 5,5$.

Большее значение критерия соответствует большей высоте корпуса и меньшему объему свободного пространства.

В режиме теплопроводности в момент возникновения температурного градиента зарождающееся нестационарное движение всегда двухвихревое - вихри располагаются один над другим. По мере развития движения нижний вихрь усиливается и как бы всплывает, вытесняя верхний, более слабый вихрь, рис.1. Если свободное пространство над нагревателем небольшое, движение в полости перестраивается в одновихревое до наступления стационарности. Если же высота свободного пространства над нагревателем больше высоты нагревателя, то двухвихревое движение наблюдается и в стационарном режиме. Чем ниже нагреватель и больше высота полости, тем позднее происходит перестройка движения.

При $Ge > Ge_{кр}$ увеличивается скорость движения вихрей и начинает возрастать интенсивность теплообмена. Такой режим можно назвать конвективным. В момент зарождения и развития конвекции движение жидкости в полости всегда одновихревое. Жидкость поднимается по горячей поверхности нагревателя и опускается по боковой стенке корпуса. Центр вихря находится на уровне торца нагревателя, если $R/z_n > 2$. Если зазор между корпусом и нагревателем меньше радиуса нагревателя, то в нижней части полости образуется застойная зона. Движения здесь практически нет, циркуляция жидкости наблюдается в верхней части полости, и центр вихря находится выше торца нагревателя.

В режиме развитой конвекции с увеличением Ge вновь наблюдается перестройка движения, сопровождающаяся образованием над

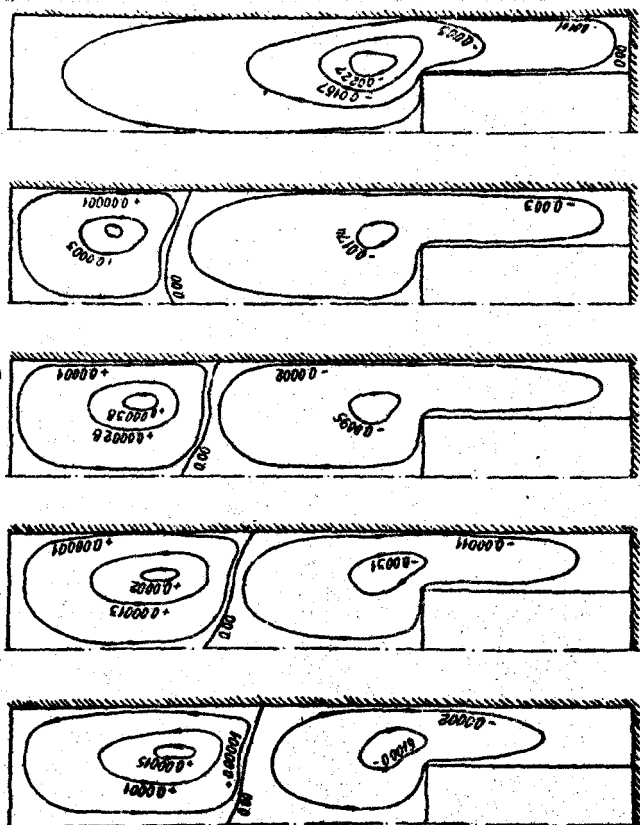


FIG. I

торцевой частью нагревателя второго вихря. Зарождение второго вихря происходит всегда у оси симметрии. При некотором значении числа Грасгофа интенсивность движения на линии симметрии начинает убывать. Дальнейшее увеличение Gr приводит к образованию над нагревателем заторможенного ядра, которое позднее разрушается вихрем обратного направления. Момент зарождения двухвихревого движения зависит от размеров и нагревателя и корпуса.

Возникновение двухвихревого движения обусловлено перестройкой температурного поля. Так, в режиме теплопроводности изотермические поверхности повторяют форму нагревателя. По мере удаления от нагревателя изотермы спрямляются и в верхней части полости занимают горизонтальное положение.

Зарождение в полости конвекции первоначально не вызывает изменения температурного поля. Изотермы также повторяют форму нагревателя и спрямляются по мере удаления от него. С увеличением интенсивности конвективного движения изотермические поверхности у тепловыделяющего элемента располагаются гуще, а в верхней части полости появляется перегиб над острой кромкой нагревателя. По мере роста у изотермических поверхностей верхней части полости появляется экстремум, расположенный над острой кромкой нагревателя. С возникновением экстремума и обнаруживается тенденция к зарождению второго вихря: падение интенсивности движения на оси симметрии, появление заторможенного ядра.

Теплообмен между нагретой и холодной поверхностями существенно зависит от режима движения. В режиме теплопроводности существующее в полости движение влияния на теплоперенос не оказывает. Тепловой поток на нагревателе не изменяется с изменением числа Грасгофа. Возникновение конвективного движения сопровождается увеличением количества переданного через полость тепла.

С изменением режима движения происходит перераспределение плотности теплового потока на теплоотдающих поверхностях. На холодной стенке корпуса пока $Gr < Gr_{кр}$ тепловой поток распределен равномерно. С развитием конвекции тепловой поток становится неравномерным. Максимум теплоотдачи наблюдается у оси симметрии, там, где нагретые струи потока набегает на холодную стенку. Образование вторичных вихрей приводит к смещению максимума от оси симметрии.

В зависимости от распределения теплового потока на нагревателе можно выделить два характерных случая

1. $h/2n > 2$, т.е. горизонтальный размер нагревателя меньше вертикального;

2. $h/2n < 2$, вертикальный размер нагревателя меньше горизонтального.

В первом случае при $Gr < Gr_{кр}$ преобладает тепловой поток с боковой поверхности нагревателя, и возникновение конвекции сопровождается значительным его ростом. На торцевой поверхности градиент температуры и тепловой поток при этом невелики и с увеличением числа Грасгофа происходит их непрерывное уменьшение. Максимум в распределении теплового потока по поверхности нагревателя появляется у острой кромки, там, где пограничный слой меняет направление движения.

Вследствие того, что тепловой поток около острой кромки нагревателя имеет максимум, слои конвектирующей жидкости здесь оказываются более прогретыми, и изотермические поверхности в этой части проходят через экстремум, что и приводит, в конечном итоге, к образованию второго вихря. Т.е. возникновение вторичных вихрей вызвано неравномерностью теплового потока на поверхности нагревателя. Поэтому перестройка одновихревого движения в двухвихревое — характерная особенность конвекции в полости данной конфигурации.

После образования вторичного вихря теплообмен с торца начинает возрастать, т.к. создаются лучшие условия его обтекания.

При $h/2n < 2$ в режиме теплопроводности теплообмен с торцевой поверхности нагревателя больше, чем с боковой. С возникновением конвекции и с ростом интенсивности движения наблюдается увеличение теплового потока и с торцевой и с боковой поверхностей тепловыделяющего элемента. Максимум в распределении теплового потока наблюдается тоже у острой кромки.

Наиболее подробно изучался теплообмен в режиме развитой конвекции. Установлено, что существенное влияние на интенсивность теплообмена в указанном режиме оказывают размеры полости. Для одного и того же корпуса коэффициент теплоотдачи тем больше, чем ниже и уже нагреватель. От одного и того же нагревателя конвекция более интенсивна в полости более широкой и короткой.

Типичные результаты расчетов представлены на рис.2. Полученная зависимость $Nu = f(Gr)$ для режима развитой конвекции выражена уравнением

$$Nu = 0,116 Gr^{0,25 + 0,0075 \lg Gr} \left(\frac{a}{2n}\right)^{0,485} \left(\frac{H}{h}\right)^{0,67} \left(\frac{R}{H}\right)^{0,8} \quad (8)$$

где $a = R - 2n$.

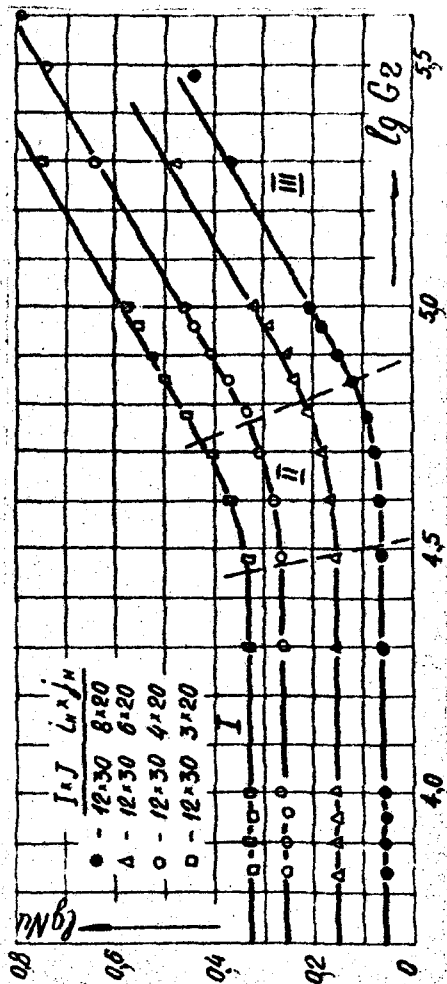


Рис.2. Результаты численного исследования теплообмена

Применение уравнения (8) проверено в пределах

$$4,7 \leq Gr_{Gz} \leq 6,0; \quad 0,5 \leq \eta/\eta_0 \leq 0,833; \quad 0,167 \leq z^*/R \leq 0,7.$$

Из (8) видно, что показатель степени при критерии Грасгофа превосходит значения 0,25, полученного Эмери и Чу на основании теории пограничного слоя, и с увеличением температурного перепада он непрерывно растет.

Непрерывным увеличением показателя степени при критерии можно объяснить и тот факт, что при исследованиях теплообмена свободной конвекцией, проведенных в последние годы, для различных интервалов чисел Релая Ra или Грасгофа с помощью численных методов или экспериментально были получены различные значения показателя степени: 0,279 (Лэндис и Яновец); 0,3 (Гершуни, Дронкина и Сомерскале, Кудрявцев, Львова); 0,315 (Левис, Ньюэл и Шмидт); 0,32 (Полежаев); 0,33 (Клюшников); 0,397 (Ньюэл и Шмидт).

Для проверки надежности метода численного решения уравнений теплообмена проведено экспериментальное исследование, описанное в главе IV.

Последующие две главы посвящены исследованию закономерностей свободно-конвективного теплообмена в полости, имеющей форму прямого параллелепипеда, с расположенным внутри нагревателем. Боковые поверхности и верхнее основание корпуса теплопроводны. Сила тяжести направлена вертикально. Полость трёхмерная.

В начале с помощью метода масштабных преобразований по известным дифференциальным уравнениям, описывающим изучаемое явление, устанавливался вид критериальных связей, свойственных для данного процесса. Если пренебречь влиянием высоты столба жидкости в прослойке на давление ($P \rightarrow const$), то для стационарного свободно-конвективного теплообмена в трёхмерной полости справедливо

$$Nu = F(Gz; Pr; \frac{x}{l_0}; \frac{y}{l_0}; \frac{z}{l_0}; \frac{T}{T_0}), \quad (9)$$

где x, y, z — текущие координаты.
 l_0 — линейная характеристика, изменение которой существенно влияет на характер процесса;
по величине l_0 рассчитываются критерии Nu и Gr .

Для выявления этого размера, а также с целью изучения структуры конвективного течения в полости указанной конфигурации было проведено визуальное наблюдение процесса. Овиднение конвективных токов проводилось с помощью табачного дыма, вводимого в исследуемую полость через аспирационное устройство. Полость была ограничена прозрачным корпусом, выполненным из органического стекла. Для ввода дыма в корпусе высверлено три отверстия: в одной из верхних вершин, в ребре параллелепипеда у нижнего основания и внизу боковой грани. При визуальном исследовании использовалось одно какое-либо отверстие, остальные замазывались пластилином. Тепловыделяющие элементы, устанавливаемые вовнутрь, были изготовлены двух форм: цилиндрической и полушарической. Устанавливались они либо в центре полости, либо эксцентрично. Температура нагревателей во время опытов изменялась от 40°C до 90°C , число Грасгофа от 10^5 до $6 \cdot 10^6$. Наблюдения проводились в строго стационарном режиме. Наблюдаемые конвективные токи фотографировались.

В момент ввода в полость дыма выявляется течение, направленное от вершины угла нижнего основания вдоль боковых поверхностей. Струйки вводимого дыма устремляются не к нагревателю непосредственно, а стремятся прежде вдоль стенки к области, удаленной от нагревателя на наименьшее расстояние. Происходит как бы оттеснение струйки от диагоналей к осям симметрии и вдоль диагонали появляется несколько заторможенный участок, вытянутый в форме лепестка. По мере растекания дыма по объему "лепесток" уменьшается, но не исчезает вовсе. Поднимающийся нагретый воздух равномерно смывает боковую поверхность тепловыделяющего элемента. В верхней части нагревателя происходит отрыв струек и дальнейшее движение их осложняется торможением при подходе к корпусу. При соприкосновении с холодной поверхностью корпуса струйки тока меняют направление движения на 90° . В верхней плоскости струйки начинают совершать колебательное движение между диагоналями. В результате, чтобы сохранить неразрывность, струйка опускается по боковой поверхности не прямолинейно, а совершая волновое движение в плоскости стенки (рис.3).

Таким образом, циркуляционный контур четко выражен. Нагретый воздух поднимается по горячей поверхности нагревателя, обгибает его торцовую часть, отрывается от нагревателя и подходит к корпусу. Омывая корпус, воздух охлаждается, опускается по боковой поверхности и вновь устремляется к нагревателю. Однако структура

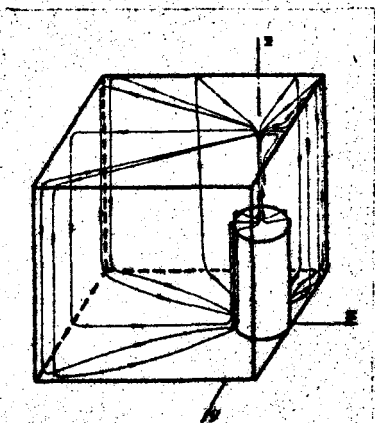


Рис. 3

развивающегося движения много сложнее простого течения по циркуляционному контуру. Сложность геометрии полости обуславливает возникновение локальных эффектов, не наблюдаемых ранее ни в одной пролойке. Особенности типа "лепесток", колебательное и волновое движение обнаружены во всех рассмотренных случаях. Следовательно, условия для возникновения этой общности создаются корпусом прямоугольной формы и не зависят ни от формы, ни от размеров нагревателя.

При эксцентрично расположенном нагревателе воздух, поднимающийся от нагревателя, достигнув корпуса, движется вдоль верхнего основания параллелепипеда к боковым поверхностям. Струйки тока, которые подходят к стороне, удаленной от нагревателя, начинают опускаться. Струйки же тока, которые подходят к плоскости, касающейся тепловыделяющего элемента, сворачивают вдоль верхнего ребра параллелепипеда и начинают опускаться близ угла. Опускающаяся струйка течет вдоль нижнего ребра параллелепипеда и вновь подходит к нагревателю. Это происходит потому, что воздух, поднимающийся от нагревателя, проходит до боковой поверхности корпуса

незначительное расстояние и не успевает достаточно охладиться. При соприкосновении с боковой гранью струйка попадает в область с большей плотностью, поэтому опускание невозможно и её отклоняет в угол.

При эксцентрично расположенном нагревателе сохраняется особенность тила "лепесток" хотя форма и размеры его несколько иные. Лепестки образуются вдоль линий, соединяющих вершины углов нижней плоскости корпуса с центром круга, лежащего в основании цилиндра. Они имеют более вытянутую форму, если исходят от наиболее удаленного от нагревателя угла, и меньшие размеры, если от близ лежащего угла.

Основными элементами экспериментальной установки, на которой проводилось количественное исследование свободно-конвективного теплообмена, являются корпус в форме параллелепипеда, выполненный из картона, и цилиндрический нагреватель, установленный на теплоизоляционном основании (рис.4). Было изготовлено несколько типоразмеров корпусов и нагревателей, и в опытах они использовались в различных сочетаниях. Температуры теплообменивающихся поверхностей определялись компенсационным способом с помощью медь-константановых термопар, потенциометра Р-376 кл.0,2 и нуль - гальванометра Герца. Для питания нагревателя использовался постоянный ток от выпрямителя. Мощность замерялась ваттметром Д-576 кл.0,5 с ценой деления 0,25 Вт.

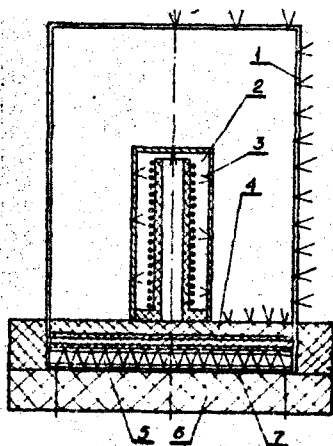


Рис.4

Опыты проводились с центрально и эксцентрично расположенным нагревателем. Замеры мощности и температур велись в строго установленном режиме.

Коэффициент теплоотдачи, отнесенный к поверхности нагревателя, определялся по теплу, переданному через полость конвекцией Q_k .

$$Q_k = P - Q_A - Q_{\text{пот}}, \quad (10)$$

где P - мощность, выделяемая на нагревателе;
 Q_A - тепло, переданное лучеиспусканием;
 $Q_{\text{пот}}$ - потери тепла через основание.

Зная состояние теплообменивающихся поверхностей Q_A определяется по известным соотношениям для системы "тело внутри тела". Для определения $Q_{\text{пот}}$ под основание подкладывался протарированный прежде тепломер.

Результаты экспериментов представлены на рис.5. При анализе опытных данных получено следующее. 1) На режим теплоотдачи существенное влияние оказывают как размеры нагревателя, так и размеры корпуса. В то же время, влияния отношения T/T_0 (T - локальное значение температуры жидкости; $T_0 = T_1 - T_2$). 2) Для теплообмена в исследуемой полости можно выделить два характерных случая: $d_n > h$ и $d_n < h$. В первом случае теплоотдача при прочих равных условиях на 20% выше, чем во втором. 3) Показатель степени при критерии Релея $Ra = Gr \cdot Pr$ не есть величина постоянная. Он растет с увеличением Ra и во всех рассмотренных случаях превосходит значения 0,25, полученного на основании теории пограничного слоя. Таким образом, экспериментально подтверждается вывод, полученный при численном исследовании теплообмена в цилиндрической полости. 4) Экспериментальные данные удовлетворительно аппроксимируются уравнением

$$Nu = 0,39 Ra^{0,25 + 0,0075 \lg Ra} \left(\frac{a}{h}\right)^{0,2} \left(\frac{H}{h}\right)^{-0,1}, \quad (11)$$

где $a = \frac{\delta - d_n}{2}$ - кратчайшее расстояние между корпусом и нагревателем;
 δ - ширина корпуса.

Применение уравнения ограничено интервалами

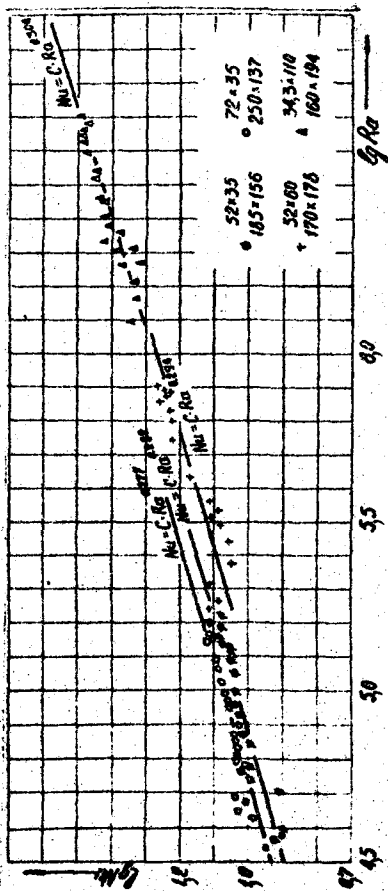


Рис.5. Результаты экспериментального исследования теплообмена в полости с центрально расположенным нагревателем

$$2,8 \cdot 10^4 < Ra < 3,5 \cdot 10^6; \quad 1,24 \leq H/h \leq 4,45; \quad 0,57 \leq a/h \leq 2,83.$$

В качестве определяющего размера выбрана высота нагревателя, определяющей температуры - средняя температура, вычисляемая

$$t_m = \frac{1}{3} (t_{осн.} + t_{корпуса} + t_{нагр.}).$$

Точность измерения составляет ± 14 %

Для упрощения инженерных расчетов с достаточной степенью точности можно принимать значение показателя степени постоянным и для цилиндрической полости и для полости, имеющей форму параллелепипеда, равным в указанных выше интервалах чисел Грасгофа или Рейля 0,29.

5) Теплоотдача от поверхности нагревателя вовнутрь корпуса не меняется до некоторого значения эксцентриситета $e_{пр}$. Пока $e < e_{пр}$, теплообмен может быть описан уравнением (II) (рис.6). Предельное значение эксцентриситета зависит от размеров нагревателя и корпуса и находится в интервале $0,9 \leq e_{пр} \leq 1$, где

$$e = \frac{(b-d_н) - 2a_н}{b-d_н};$$

$a_н$ - кратчайшее при данном расположении нагревателя расстояние между тепловыделяющим элементом и корпусом.

В заключении главы приводятся результаты исследования теплообмена на установке, подобной физической модели, для которой проводились численные расчеты. Полученные данные дают хорошее совпадение с результатами численного исследования процесса.

ВЫВОДЫ

1. На основе критического анализа литературы по свободно-конвективному теплообмену через прослойки различных конфигураций отмечено, что ряд задач, актуальных для инженерной практики изучен недостаточно. К таким задачам относятся вопросы теплообмена в объемах, типичных для радиоэлектроники: полости, имеющие форму цилиндра или параллелепипеда с нагревателем.

2. На основе численного решения системы дифференциальных уравнений свободной конвекции исследован характер течения и теплообмена в цилиндрической полости с нагревателем: рассмотрены

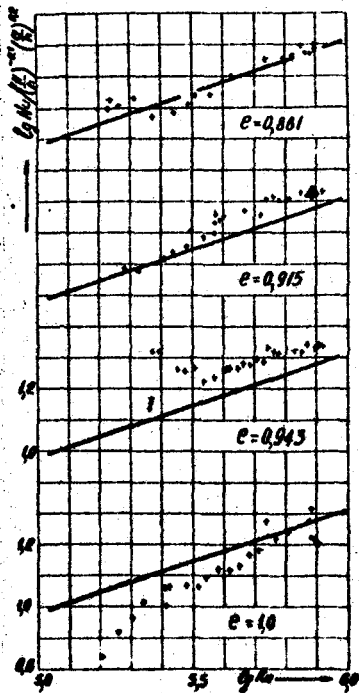


Рис.6. Результаты экспериментального исследования теплообмена в полости с эксцентрично расположенным нагревателем. Сплошная линия соответствует уравнению II.

возможные формы движения и установлены закономерности переноса тепла. Свободно-конвективное движение в замкнутой полости с нагревателем много сложнее простого течения в пограничном слое при неограниченной конвекции, что и обуславливает более интенсивный теплообмен с поверхности нагрева. В результате показатель степени при определяющем критерии Gr или Ra всегда выше значения, рассчитанного на основе теории пограничного слоя. Анализ характеристик теплообмена при различных сочетаниях нагревателя и корпуса позволил установить вид критериальной зависимости:

$$Nu = 0,116 Gr^{0,25+0,0075 \lg Gr} \left(\frac{\alpha}{2\alpha_0}\right)^{0,485} \left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)^{0,67} \left(\frac{R}{H}\right)^{0,8}$$

3. Экспериментальное исследование теплообмена в цилиндрической полости с нагревателем дало результаты, хорошо совпадающие с численным решением, что указывает на надежность полученных результатов.

4. Визуальное исследование теплообмена в полости, имеющей форму параллелепипеда, с центрально либо эксцентрично расположенным нагревателем, позволило установить характер течения в указанном объеме. Помимо основного циркуляционного контура (жидкость поднимается по горячей поверхности и опускается по холодной) обнаружены дополнительные токи, отбрасывающие струйки к осям симметрии в нижнем основании корпуса, и к диагоналям в верхней его плоскости, что приводит к образованию особенностей типа "ленесток", волновое и колебательное движения.

5. Выполнено экспериментальное исследование теплообмена в полости, имеющей форму параллелепипеда, с центрально либо эксцентрично расположенным нагревателем. По результатам опытов отмечено, что влияние эксцентриситета на теплообмен в указанном объеме не обнаруживается до тех пор, пока движущиеся пограничные слои на корпусе и нагревателе могут развиваться свободно. Пока $e < e_{кр}$ передача тепла, как и для случая с центрально расположенным нагревателем, может быть рассчитана по формуле

$$Nu = 0,39 Ra^{0,25+0,0075 \lg Ra} \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^{0,485} \left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)^{0,67}$$

6. Для упрощения инженерных расчетов в формулах (8) и (II) рекомендуется показатель степени принимать постоянным, равным 0,29 в интервале $4,7 \leq Gr \leq 6,0$ - для цилиндрической полости, $2,8 \cdot 10^4 < Ra < 3,5 \cdot 10^6$ - для полости в форме параллелепипеда.

Основное содержание работы опубликовано в следующих статьях:

1. Есина И.В., Короленко Ю.А. К вопросу о свободно-конвективном теплообмене в ограниченном объеме. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". № 110, 1972, Челябинск.

2. Есина И.В., Короленко Ю.А. Экспериментальное исследование свободной конвекции в трехмерном ограниченном пространстве. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". № 122, 1973, Челябинск.

3. Ю.А.Короленко, И.В.Есина. О структуре свободно-конвективного течения в замкнутой трёхмерной полости. ИФЖ, т. XXVI, № 6, 1974.

4. И.В.Есина, Ю.А.Короленко. Свободно-конвективный теплообмен в ограниченном объеме. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". № 141, 1974, Челябинск.

5. И.В.Есина. Численное решение задачи свободно-конвективного теплообмена с осевой симметрией. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". № 160, 1975г.