

Воздействующие факторы и теплофизические задачи при конструировании ВТ

к.т.н. Никаноров А.В.

Содержание лекции

- Воздействующие факторы
- Влияние температуры
- Виды теплообмена
- Тепловые расчеты конструкции
 - Аналитические методы
 - Метод конечных элементов
- Виды систем охлаждения, применяемые в ВТ

Воздействия на ВТ

Внешние

Естественные

Условия
применения на
объекте

Внутренние

Тепловые

Механические

Электромагнитные

Воздействующие факторы

Факторы внешнего и внутреннего воздействия – сокращенный перечень (по степени влияния на ВТ)

Воздействующие Факторы

Теплофизические

Механические

Электромагнитные

Химические

Биологические

Специальные

- **ГОСТ 26883-86 Внешние воздействующие факторы. Термины и определения**
- **ГОСТ 21964-76 Внешние воздействующие факторы. Номенклатура и характеристики**

Факторы внешнего воздействия



Принцип Ландауэра

В любой вычислительной системе, независимо от её физической реализации, при потере 1 бита информации выделяется теплота в количестве по крайней мере W джоулей:

$$W = k_B * T * \ln 2,$$

Где: k_B — константа Больцмана,

T — абсолютная температура вычислительной системы в кельвинах.

При $T = 300$ К энергия $W \approx 2,7 \times 10^{-21}$ Дж.

- Принцип Ландауэра определяет теоретический минимум тепла, производимого идеальной вычислительной машиной. Для сегодняшних компьютеров, неэффективных в плане расхода энергии, он имеет чисто академическое значение, ведь тепловыделение реальных схем оказывается намного больше рассчитанного «по Ландауэру» (в миллион раз).

Влияние температуры на работоспособность ВТ

Увеличение
удельной
выделяемой
тепловой
энергии

Степень
интеграции
элементов

Скорости
переключения

Плотность
упаковки

Значительная часть потребляемо
ВТ электрической энергии
превращается в **тепловую**, что
повышает температуру конструкции.

Влияние температуры на работоспособность ВТ

Большинство компонентов ВТ имеют **температурно-зависимые свойства**:

- с увеличением температурного градиента уменьшается уровень допустимых помех;
- с увеличением абсолютной температуры увеличивается интенсивность отказов компонентов.

Для обеспечения **надежности** и **помехоустойчивости** разработчики комплектующих элементов определяют и указывают в ТУ рабочие и максимально допустимые температуры.

Причины снижения работоспособности из-за изменения температуры

Повышение температуры вызывает:

- **Изменение зазоров** (уменьшение сигналов, заклинивание);
- **возрастание электропроводности** в деталях (появление токов утечки);
- **снижение индуктивности насыщения в магнитных материалах** (уменьшение сигнала);
- **химические реакции в полупроводниковых структурах** (возможно их разрушение).

В полупроводниках при колебаниях температуры **изменяется плотность и подвижность носителей тока, смещаются переходы.**

Резисторы имеют как положительный, так и отрицательный **температурный коэффициент сопротивления.**

Конструктивно-технологические дефекты:

даже в диапазоне рабочих температур **токи утечки через малые дефекты в окисле кремния могут вызывать локальный перегрев, из-за которого усилится реакция поглощения и разрушится пленка окисла.**

Теплообмен в ВТ. Основные понятия

Процесс передачи тепловой энергии – **теплообмен**.

Температурный (тепловой) режим - пространственно-временное распределение температуры в конструктивном модуле (КМ).

Задачи анализа сложны, поэтому будем рассматривать **только стационарный режим**.

- Элементы:
 - выделяющие теплоту – **источники**,
 - поглощающие – **стоки**.

**Выделяемая
активными элементами
тепловая энергия
может передаваться:**

**другим активным
элементам, имеющим
более низкую
температуру,**

***пассивным* элементам
(деталям конструкции),**

**отводиться в
окружающую среду.**

- Тепловой режим называется **нормальным**, если **температура компонентов не превышает допустимую**.
- **Нормальный режим** обеспечивается разработкой **системы отвода тепловой энергии** как для конструкции в целом, так и для ее элементов.

Зависимость теплового режима

Температура окружающей среды

Мощность

Условия теплообмена

ИСТОЧНИКОВ

СТОКОВ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ, в т.ч.
мощность системы принудительного отвода
тепла;

размеры

форма

взаимное расположение
элементов конструкции

теплофизические параметры
материалов конструктивных
элементов

Способы отвода тепла

Кондукцией
(теплопроводностью)

Естественной
конвекцией

Принудительной
конвекцией

Конвекцией

Излучением



Кондукция

- передача теплоты посредством взаимодействия молекул тела или соприкасающихся тел.

Если два участка тела или соприкасающиеся тела имеют разную температуру, возникает поток теплоты в сторону меньшей температуры.

Кондукция может также происходить:

в жидкой или газообразной среде,

а также между телом и средой, если нет движения среды или между телом и средой есть прослойка – пленка неподвижной среды.

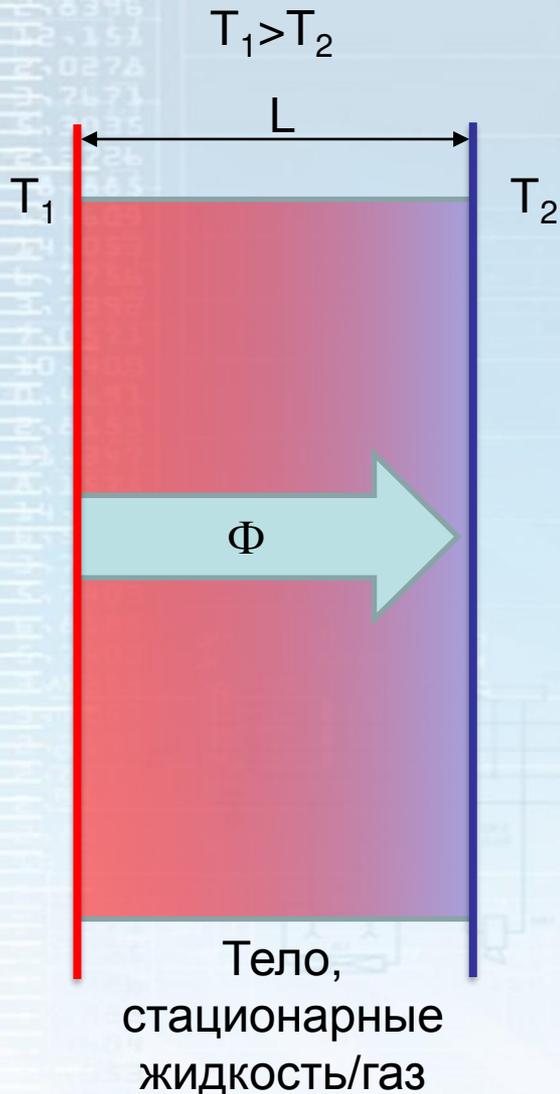
Тепловое сопротивление между изотермическими поверхностями i и j

$$R_{i,j} = \frac{1}{\lambda} \int_{l_i}^{l_j} \frac{1}{S(l)} dl$$

λ - коэффициент теплопроводности материала Вт/(м К), S – площадь поверхности, L – нормаль к изотермической поверхности, являющейся их координатами.

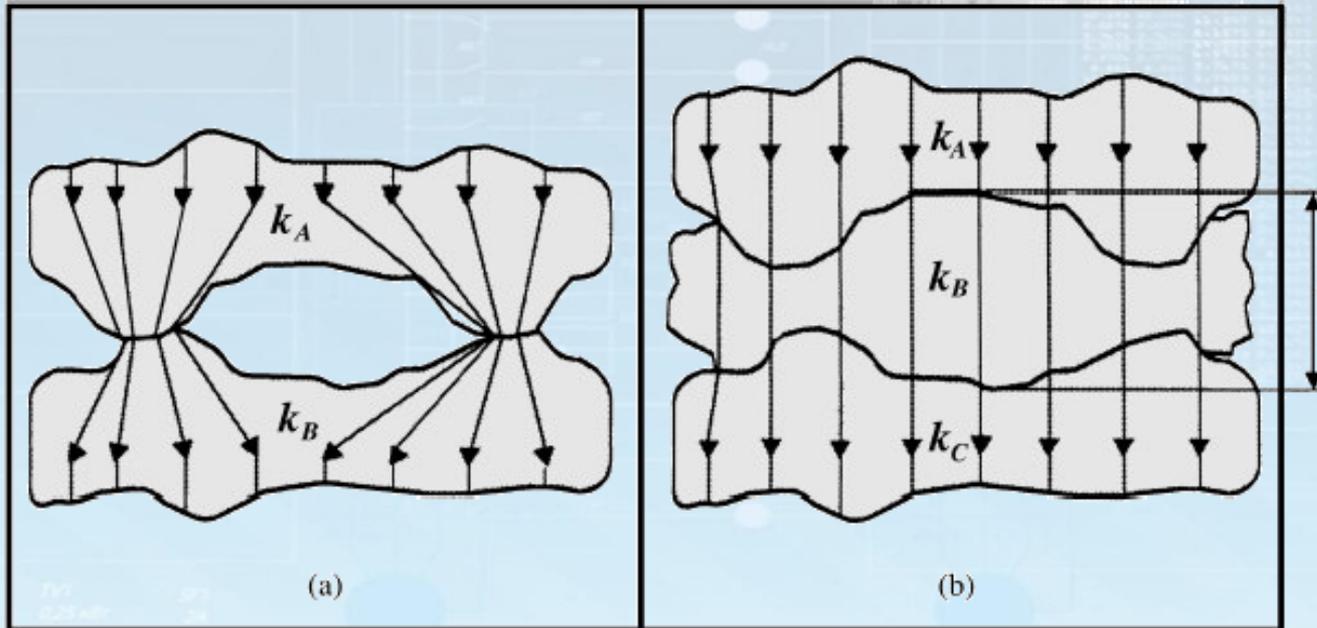
Кондукция – закон Фурье

$$\Phi = \lambda \cdot (T_1 - T_2) \cdot S / L \text{ [Вт]}$$



- Количество тепла Φ за единицу времени, отданное посредством теплопроводности через площадку площадью S на границе раздела тел, перпендикулярную тепловому потоку, пропорционально разности температур этих тел
- L – расстояние между гранями
- λ - коэффициент теплопроводности - количество теплоты, отдаваемое с 1 м^2 поверхности за единицу времени при единичном температурном напоре $[\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$.

Структура поверхности соприкасающихся тел

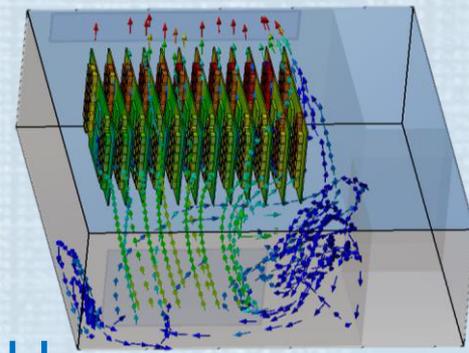


Площадь поверхности **эффективного контакта** снижается при повышении шероховатости.

Требуется:

- снижать шероховатость поверхности
- использовать теплопроводные пасты

Конвекция



- Перенос теплоты связан с движением жидкой или газообразной среды, соприкасающейся с твердым телом – элементом конструкции.
- Тепловая энергия передается как между твердым телом и средой, так и в самой среде.

Конвекция:

- Естественная – обусловлена свободным движением среды за счет разности плотностей холодной и нагретой областей.
- Вынужденная (принудительная) – за счет движения среды под действием вынуждающих сил.

Конвекция - закон **Ньютона-Рихмана**:

$$\Phi_c = \alpha_c \cdot (T_1 - T_2) \cdot S \quad [\text{Вт}]$$

где Φ_c – тепловая энергия, передаваемая от тела к среде (и наоборот);

S – **площадь** тела, находящаяся в контакте со средой.

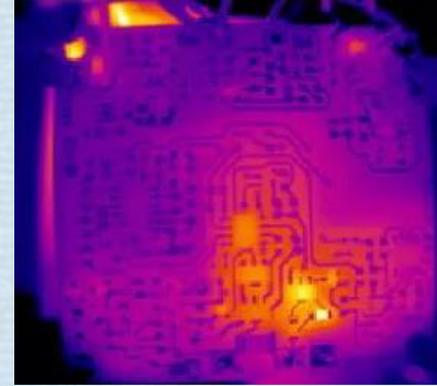
α_c – **коэффициент теплообмена конвекцией** между **поверхностью** тела и средой, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, зависит:

- от **теплофизических** и **кинематических параметров** среды,
- от **формы, размеров** элементов конструкции
- от **их ориентации** относительно потоков среды.

Выражения α для естественной и вынужденной конвекции для характерных случаев применения в ВТ можно найти в справочниках

Теплообмен излучением

Тепловая энергия излучается электромагнитными волнами в инфракрасном диапазоне длин.



По закону Стефана-Больцмана излучаемая в пространство энергия

$$\Phi = \varepsilon \cdot C_0 \cdot S \cdot T^4$$

ε - степень черноты тела;

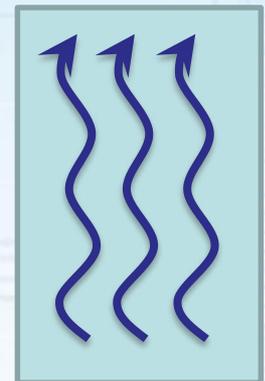
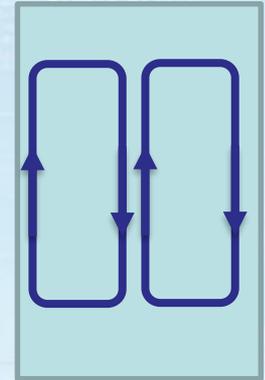
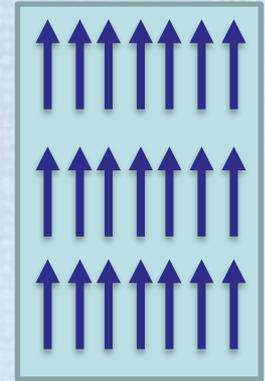
$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

S – площадь излучающей поверхности тела;

T - температура тела.

Передача тепла

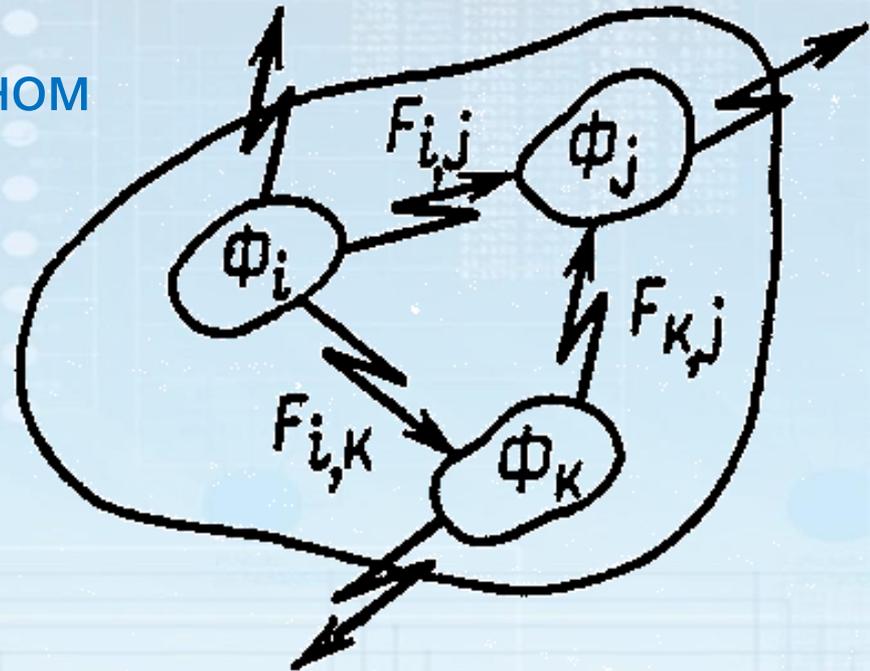
- **Кондукция.** Тепло перемещается через материал.
- **Конвекция.** Тепло переносится движением жидкости или газа.
- **Излучение.** Тепло переносится световым, радиоволновым и другими типами излучения.



Принципы суперпозиции температурных полей

Конструкция ВТ – система многих тел, т.е. **источников и стоков теплоты**, находящихся **во взаимном теплообмене** друг с другом и с окружающей средой.

Возникает задача определения температуры каждого или некоторого тела (элемента конструкции).



Принцип суперпозиции позволяют **упростить** анализ сложных условий теплообмена и построение тепловых моделей КМ.

Принцип суперпозиции температурных полей

Если **мощности источников и стоков** тепловой энергии и **тепловые коэффициенты не зависят от температуры**, то в соответствии с принципом суперпозиции суммарный наведенный перегрев тела из-за теплообмена с остальными телами находят как алгебраическую сумму каждого перегрева.

Учитывая **температуру окружающей среды T_c** и **собственный перегрев тела**, основываясь на законе Фурье ($\Delta T = \Phi R$)

$$T_{\text{итог}} = T_c + \sum \Delta$$

$$\theta_j = \theta_c + \sum_{i=1}^n F_{ij} \Phi_i - \sum_{k=1}^m F_{kj} \Phi_k$$

где n и m – число элементов конструкции, являющихся источниками и стоками для тела j .

Принцип местного влияния

Любое местное возмущение температурного поля является локальным и не распространяется на отдаленные участки поля.

Источники тепловой энергии в объеме конструкции ВТ:

- распределены неравномерно
- имеют различные геометрические размеры
- состоят из материалов с различными теплофизическими свойствами.

Однако, если выделяемая источниками тепловая энергия одинакова, то на основании принципа местного влияния можно утверждать, что на некотором удалении от них каждый наводит одинаковый перегрев.

На границе элемента или нескольких элементов из разных материалов может резко измениться температурный градиент,

но на некотором расстоянии от границ эти неоднородности практически не влияют на температурное поле.

Расстояние, на котором конфигурация тела не влияет на характер теплового поля, принимают равным наибольшему размеру этого тела.

Определение теплового сопротивления типовой конструкции

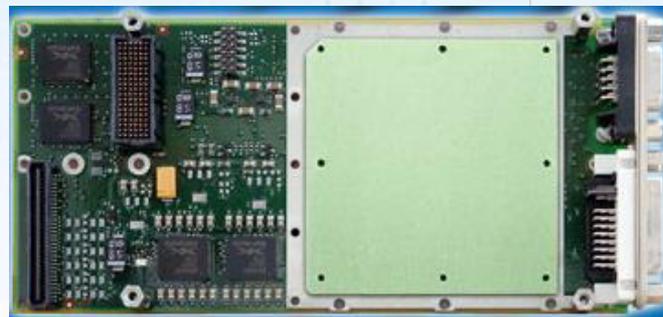
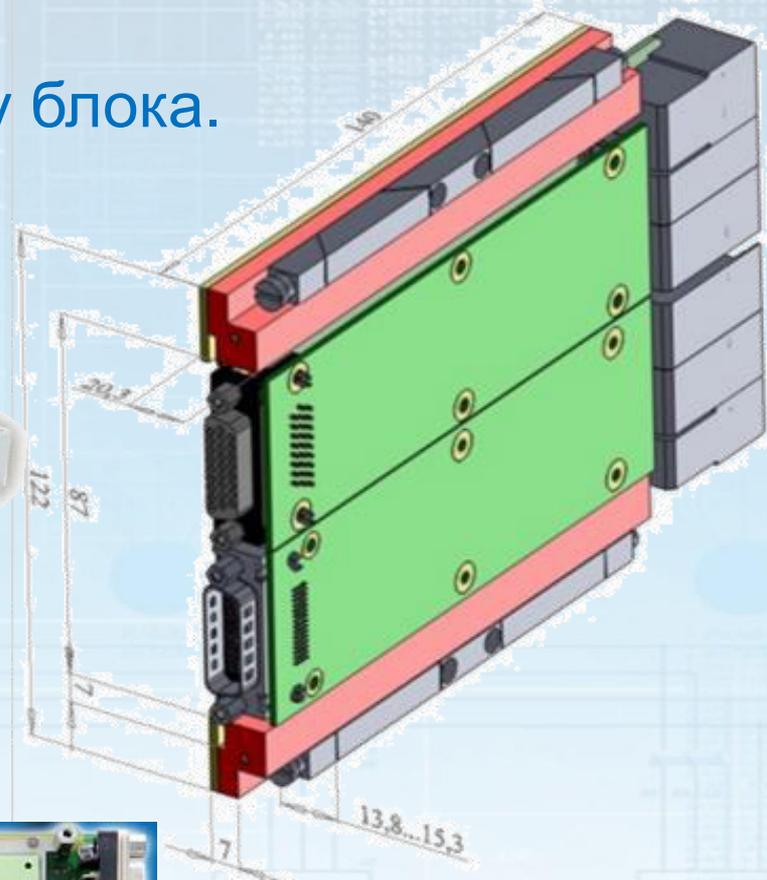
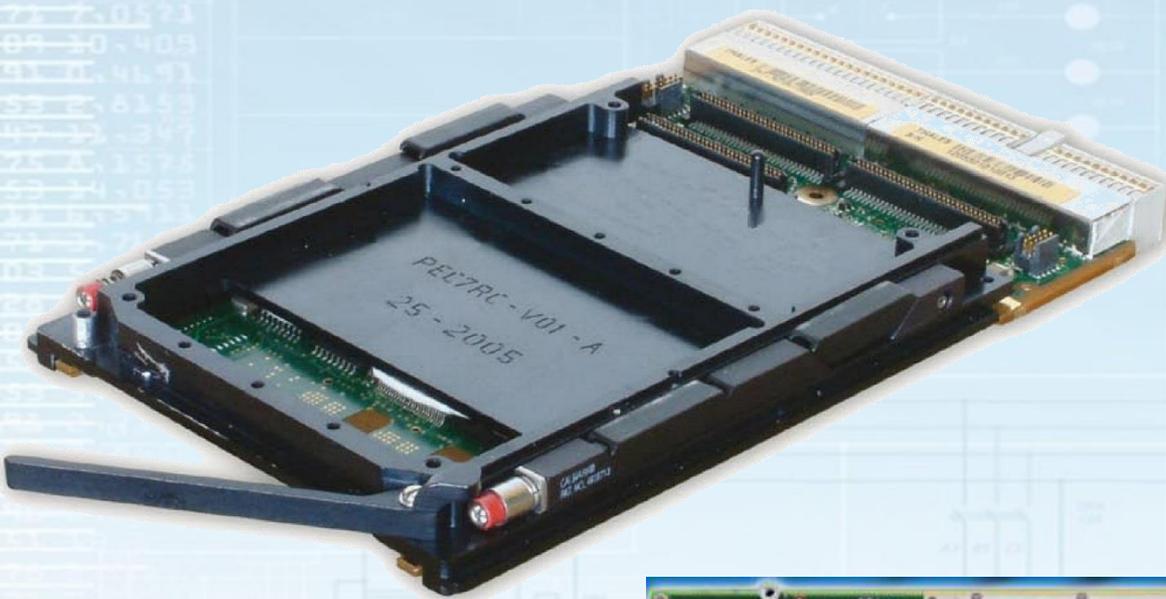
Благодаря конструктивной унификации типовые конструкции ВТ характеризуются регулярностью в одном, двух или трех направлениях.

В них можно выделить некоторый элементарный объем (ячейку), повторяя который в соответствующих направлениях, получим необходимую конструкцию.

Регулярные конструкции можно считать анизотропными телами, имеющими неодинаковые коэффициенты теплопроводности по основным геометрическим направлениям, которые равны соответствующим коэффициентам элементарной ячейки ($\lambda_x = \lambda_{яx}$, $\lambda_y = \lambda_{яy}$, $\lambda_z = \lambda_{яz}$).

Подход снижает размерность задачи и позволяет рассчитывать тепловое сопротивление аналогичных конструкций.

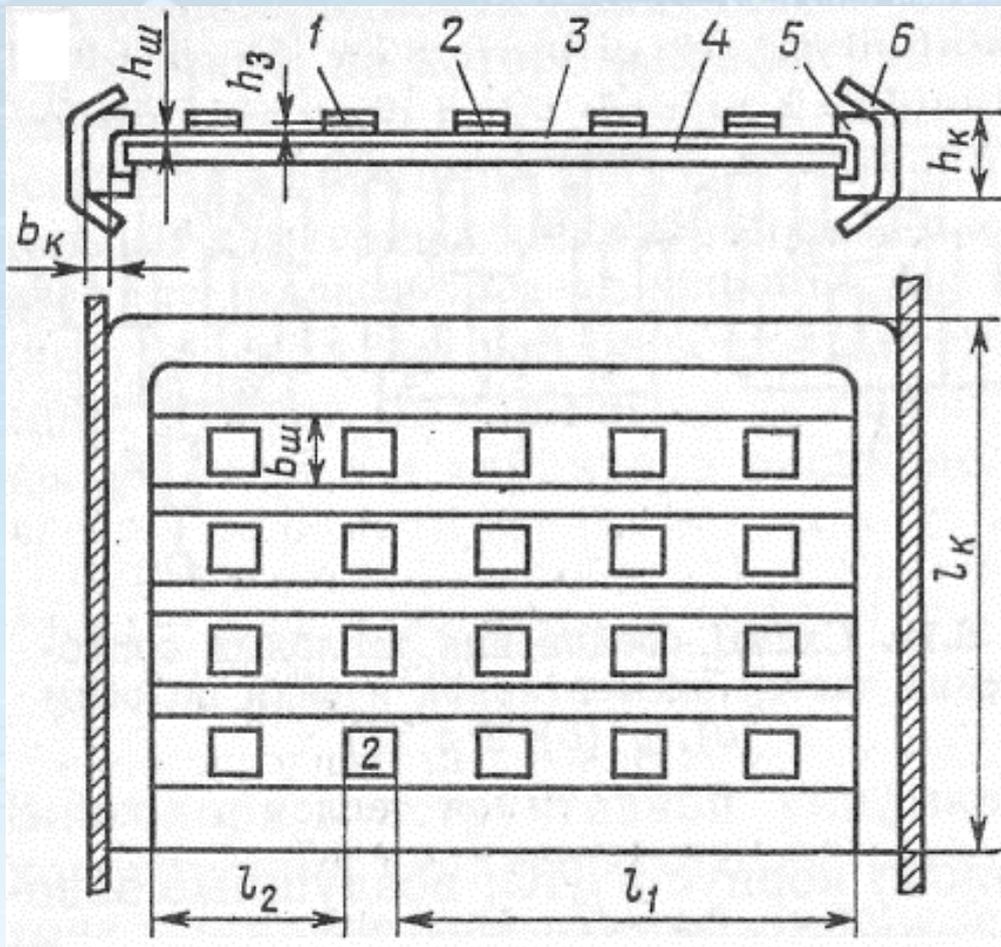
При проверочных расчетах температуры элемента конструкции возникает задача определения теплового сопротивления от этого элемента до стока теплоты., например от интегральной схемы (ИС) к корпусу блока.



Тепловое сопротивление от ИС к корпусу блока

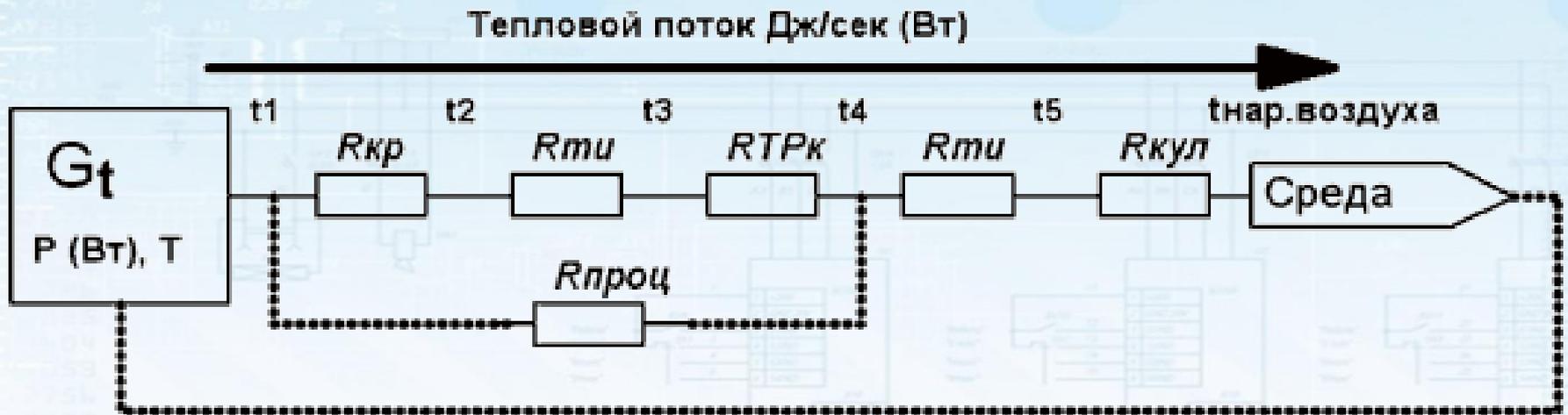
Субблок с теплопроводящими шинами, который вставляется по направляющим в блок

- 1 – корпус ИС;
- 2 – зазор между ИС и шиной; R_z
- 3 – теплопроводящая шина; $R_{ш}$
- 4 – плата;
- 5 – каркас субблока; $R_{ст}$
- 6 – направляющая блока. R_k



Электротепловая аналогия

Электрический параметр	Тепловой параметр
электрическое сопротивление $R_э$	тепловое сопротивление R_T
разность потенциалов U	температурный перегрев Δt
электрический потенциал j	температура t
электрический ток I	тепловой поток Φ
электрическая емкость C	теплоемкость C



1 – корпус ИС;

2 – зазор между ИС и шиной;

3 – теплопроводящая шина;

4 – каркас субблока;

5 – направляющая блока.

R_3 – тепловое сопротивление теплопроводящего материала зазора;

$R_{ш1}, R_{ш2}$ – тепловые сопротивления шин;

$R_{к1}$ – тепловое сопротивление контакта шина - каркас субблока;

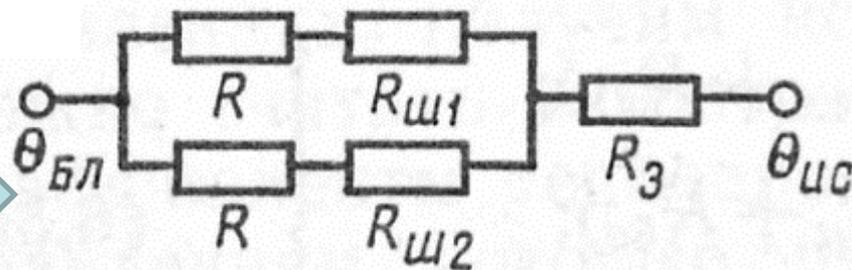
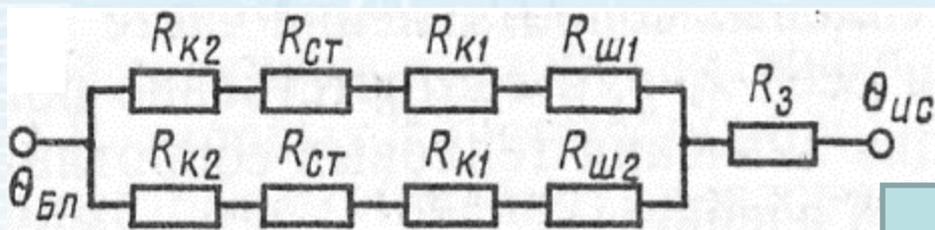
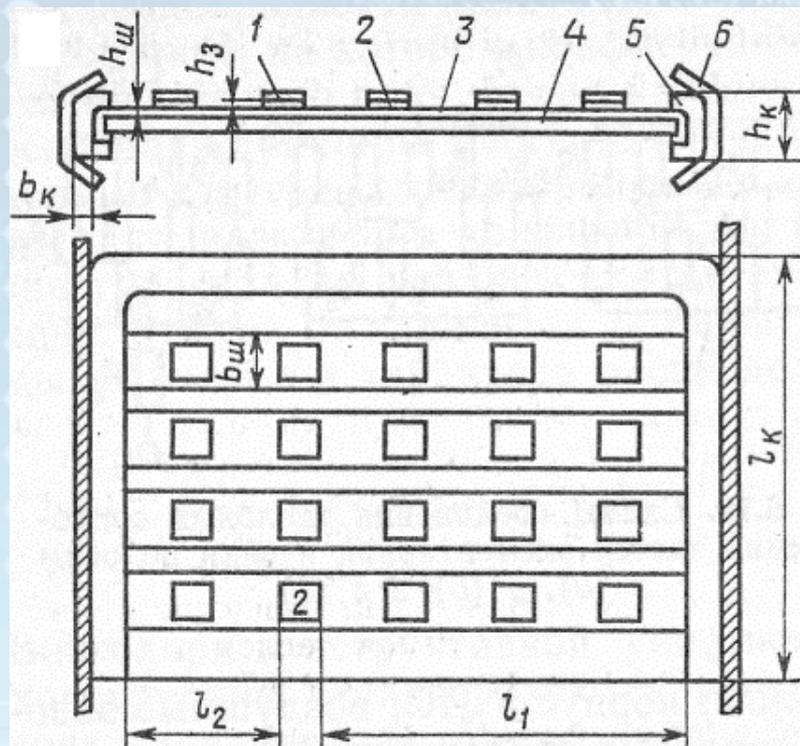
$R_{СТ}$ – тепловое сопротивление стенки каркаса субблока;

$R_{к2}$ – тепловое сопротивление контакта каркас субблока – корпус блока.

Тепловое сопротивление от ИС к корпусу блока

Субблок с теплопроводящими шинами, который вставляется по направляющим в блок

- 1 – корпус ИС;
- 2 – зазор между ИС и шиной; R_3
- 3 – теплопроводящая шина; $R_{ш}$
- 4 – плата;
- 5 – каркас субблока; $R_{ст}$
- 6 – направляющая блока. $R_к$



$$R = R_{к1} + R_{ст} + R_{к2}$$

Результирующее тепловое сопротивление

$$R_{\Sigma} = R_3 + (R_{\text{ш1}} + R) (R_{\text{ш1}} + R) / (R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}} + 2R)$$

Тепловые сопротивления:

$$R_3 = h_3 / (\lambda_3 S_K) ;$$

$$R_{\text{СТ}} = b_K / (\lambda_{\text{СТ}} S_{\text{СТ}}) ;$$

$$R_{\text{ш1}} = l_1 / (\lambda_{\text{ш}} S_{\text{ш}}) ;$$

$$R_{\text{ш2}} = l_2 / (\lambda_{\text{ш}} S_{\text{ш}}) ;$$

$$R_{\text{К1}} = 1 / (\alpha_{\text{К1}} S_{\text{К1}}) ;$$

$$R_{\text{К2}} = 1 / (\alpha_{\text{К2}} S_{\text{К2}})$$

где λ_3 , $\lambda_{\text{ш}}$, $\lambda_{\text{СТ}}$ - коэффициенты теплопроводности материала, заполняющего зазор, теплопроводящей шины и каркаса субблока; S_K - площадь корпуса; $S_{\text{ш}}$ - площадь поперечного сечения теплопроводящей шины; $S_{\text{СТ}}$ - площадь сечения каркаса субблока в направлении, ортогональном к тепловому потоку; $S_{\text{К1}}$, $S_{\text{К2}}$ - половина площади контактов шина - каркас субблока, каркас субблока - корпус блока. α - удельная тепловая проводимость контакта

Тепловые модели конструкций ВТ

Основное требование к модели:

- ❑ *модель должна быть адекватна изучаемому процессу*
- ❑ *и реализуема математически.*

Конструкция ВТ - система многих тел с неравномерно распределенными источниками и стоками тепловой энергии. Температурное поле имеет сложный характер, зависящий от распределения источников и стоков тепловой энергии, геометрии элементов конструкции и их теплофизических свойств.

При разработке тепловых моделей используют два приёма:

- *упрощение элементов конструкций;*
- *идеализация протекающих теплофизических процессов.*

Два подхода к разработке тепловых моделей

- ❖ Упрощение элементов конструкций – замена сложной формы нагретой зоны более простой.

Широко используется понятие эквивалентная нагретая зона, когда сложная по форме изотермическая поверхность КМ с неравномерно распределёнными источниками теплоты заменяется изотермической поверхностью в виде прямоугольного параллелепипеда с равномерно распределёнными источниками энергии.

Эта замена обычно выполняется на основе принципа усреднения или местного влияния.

- ❖ **Идеализация процессов теплообмена.**

- Учитываются только способы передачи теплоты, которые вносят **существенный** вклад в теплообмен.
- Теплообмен описывается системой неоднородных нелинейных алгебраических уравнений.

Подходы к разработке тепловых моделей

Альтернативный подход:

- ✓ КМ (вся конструкция в целом) представляется в виде *однородного анизотропного тела с неравномерно распределенными источниками теплоты.*
- ✓ Теплообмен описывается дифференциальными уравнениями в частных производных 2-го порядка.

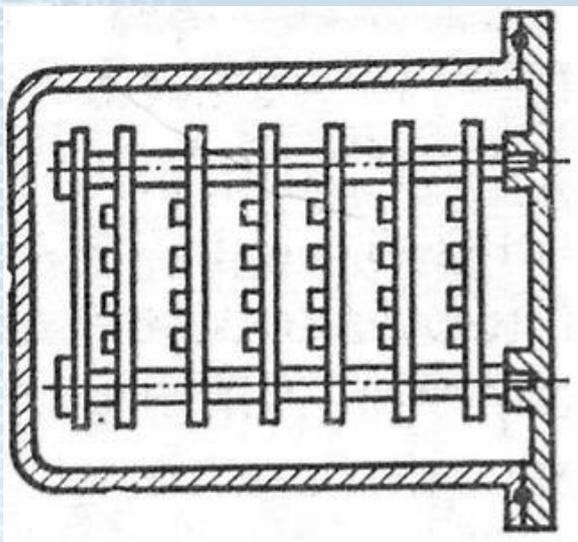
Упрощение элементов конструкции и идеализация тепловых процессов должны быть таковы, чтобы обеспечивалась адекватность модели.

Методика получения тепловых моделей конструкций ВТ

1. По результатам анализа конструкции определяем требуемую степень её детализации.
2. Выявляем существенные способы отвода теплоты.
3. Составляем
 - Или схему соединения тепловых сопротивлений.
 - Или композицию однородных анизотропных тел, имеющих разные теплофизические параметры.
4. Получаем математическую модель и исследуем её.

Тепловая модель, использующая понятие эквивалентная нагретая зона

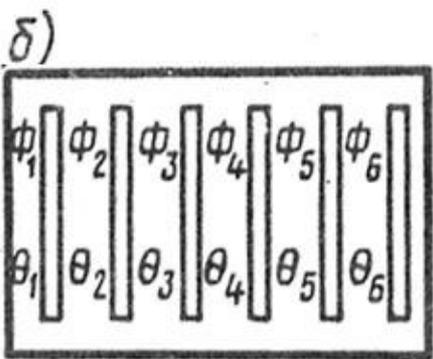
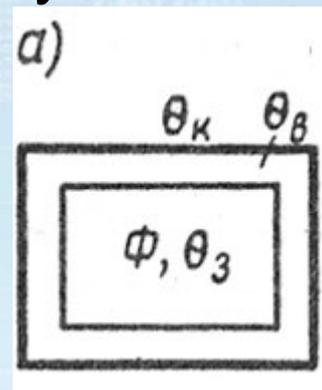
Точность модели определяется степенью детализации конструкции.



Одноблочный корпус

1. В качестве нагретой зоны можно рассматривать весь пакет субблоков (модель *a*).

Результат - можно определить среднеповерхностную температуру нагретой зоны.



Если эта температура значительно отличается от температуры субблока, расположенного в центре пакета, т. е. будет признано, что результаты исследования не обеспечивают требуемой точности, то в качестве нагретой зоны может рассматриваться сам субблок (модель *б*).

Анализ способов передачи тепловой энергии. Построение тепловых схем

Выполним указанный анализ на примере модели (а).

- Считаем, что существенны все три вида переноса тепловой энергии.
- Тепловая энергия Φ , выделяемая пакетом субблоков:
 - передается конвекцией воздуху, находящемуся внутри корпуса ($R_{зв}$),
 - кондукцией по элементам крепления и монтажа ($R_{зк.т}$);
 - излучением к корпусу вычислителя ($R_{зк.л}$).
- От воздуха тепловая энергия конвекцией передается к корпусу ($R_{вк}$)
- и корпусом рассеивается в окружающую среду за счет всех трех механизмов передачи энергии ($R_{кс}$).

Получение уравнений теплового баланса

Эти уравнения являются математической моделью процессов теплообмена.

Они **составляются на основе закона сохранения энергии и выражения** $\Phi_i = \sigma_{i,j} (\theta_i - \theta_j)$

Число уравнений определяется количеством нагретых зон.

Для модели (а), уравнений теплового баланса три:

- для пакета субблоков,
- воздуха внутри корпуса
- корпуса.

Уравнения для модели (а) имеют вид:

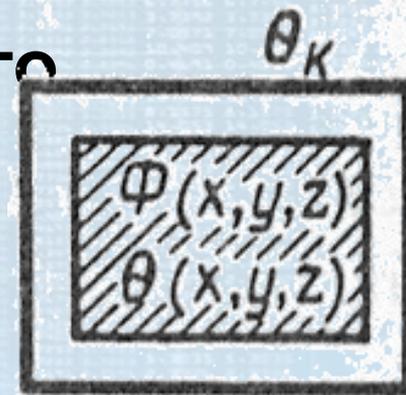
$$\Phi = \sigma_{зв} (\theta_з - \theta_в) + (\sigma_{зк.т} + \sigma_{зк.л}) (\theta_з - \theta_к);$$

$$\sigma_{зв} (\theta_з - \theta_в) = \sigma_{вк} (\theta_в - \theta_к);$$

$$\Phi = \sigma_{кс} (\theta_к - \theta_с).$$

Уравнения нелинейны, решаются методом итерации.

Тепловая модель в виде однородного анизотропного тела



Свойства такого тела характеризуются эффективными значениями

коэффициентов теплопроводности и теплоемкости.

Тепловые процессы описываются дифференциальным уравнением в частных производных :

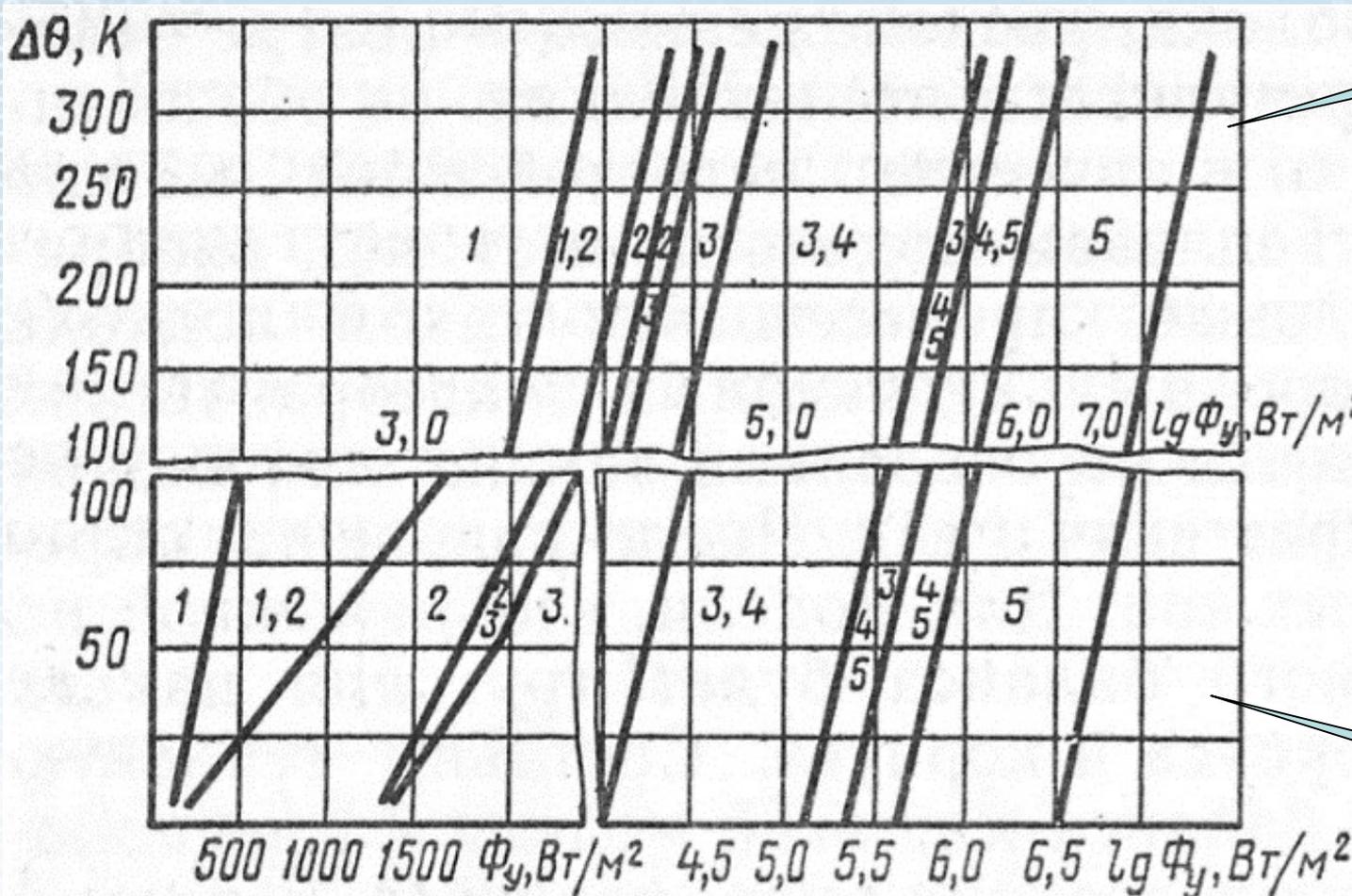
$$\lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = F(\Phi_y, C),$$

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - эффективные коэффициенты теплопроводности по осям x, y, z ; Φ^y - удельная мощность внутренних источников теплоты; C - эффективный коэффициент теплоемкости.

Это дифференциальное уравнение решается с учетом нелинейных условий на границе нагретого тела, что является сложной задачей.

Выбор способа охлаждения ВТ

- решают на **начальной стадии** проектирования конструкции.
- Для этого используют следующую номограмму.



Элементы

- 1 – естественное воздушное;
- 2 – принудительн. воздушное;
- 3 – принудительн. жидкостное;
- 4 – естественное испарительное;
- 5 – принудительн. испарительное

Блоки

Методика выбора способа охлаждения

1. Рассчитываем минимальное значение допустимого перегрева (К) нагретой зоны $\Delta\theta_{\text{доп}} = \theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{остах}}$

где $\theta_{\text{доп}}$ - допустимая температура нагретой зоны,
 $\theta_{\text{остах}}$ - максимальная температура окружающей среды,

2. Расчетная поверхность нагретой зоны (м)²

$$S_3 = 2[L_1L_2 + (L_1 + L_2)L_3K_3]$$

где L_1, L_2 – горизонтальные размеры корпуса, м; L_3 – высота корпуса, м, K_3 – коэффициент заполнения, равный отношению объема функциональных и монтажных элементов внутри корпуса к его внутреннему объему.

Для блоков при жидкостном и испарительном охлаждении S_3 рассчитывают по геометрическим размерам охлаждаемой поверхности, находящейся в контакте с теплоносителем.

3. Находим величину удельной мощности нагретой зоны (Вт/м²):

$$\Phi_y = \Phi / S_z$$

где Φ - мощность, рассеиваемая блоком или элементом, Вт.

4. Затем определяем зону, в которой лежит точка с координатами $\Delta\theta_{доп}$ и Φ_y .

5. Если точка попадает в зону с несколькими возможными способами охлаждения, то для уточнения рассчитываем тепловой режим.

Основные проектные теплофизические задачи

Задача 1. Расчет требуемого расхода хладагента при принудительном охлаждении.

Дано: рассеиваемая мощность, геометрические размеры, допустимая температура работы комплектующих элементов, температура окружающей среды, конвекционные элементы.

Задача 2. Оценка допустимого значения тепловой энергии, которая может быть отведена, и, возможно, ее распределения. Задача возникает, если используется КМ со стандартными средствами обеспечения теплового режима.

Задача 3. Определение температур нагретых зон для конструкции с естественным охлаждением.

Дано: выделяемая тепловая энергия, конструктивное решение в целом.

Задача 4. Проверочного характера. Определение температуры некоторого элемента, находящегося в наихудших условиях теплообмена.

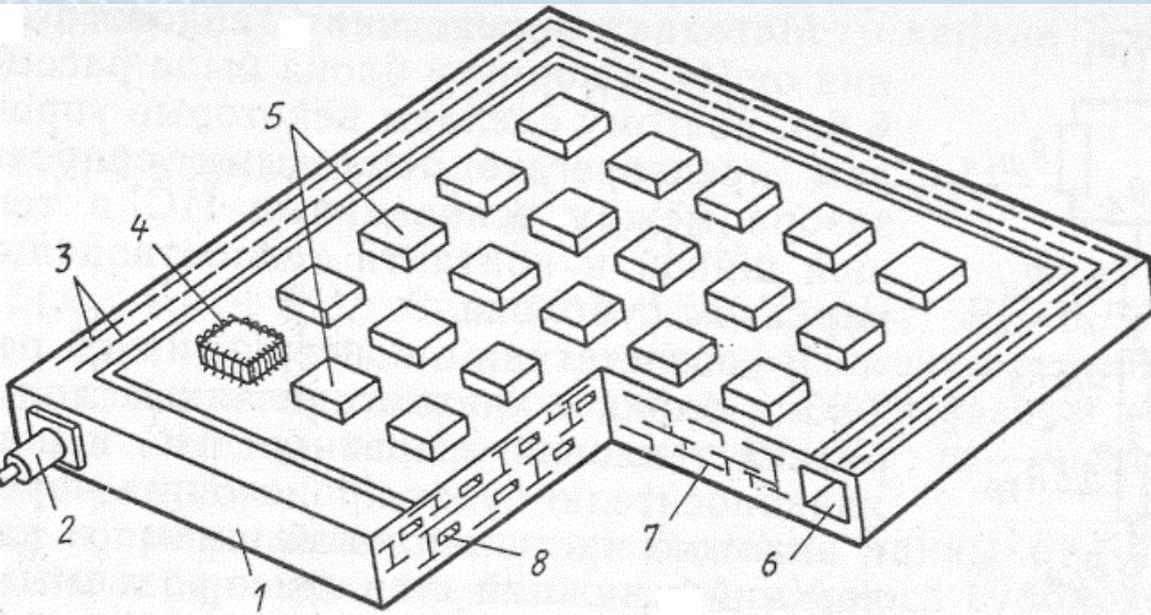
Виды систем охлаждения, применяемые в ВТ

- Естественное воздушное
- Воздушное принудительное
- Кондукционное
- Жидкостное (в том числе, криосистемы)
- Испарительное (в том числе, тепловые трубки)
- Иммерсионное

- **Комбинация различных систем охлаждения**

Примеры конструкций с жидкостным охлаждением

1. Многокристальный керамический модуль

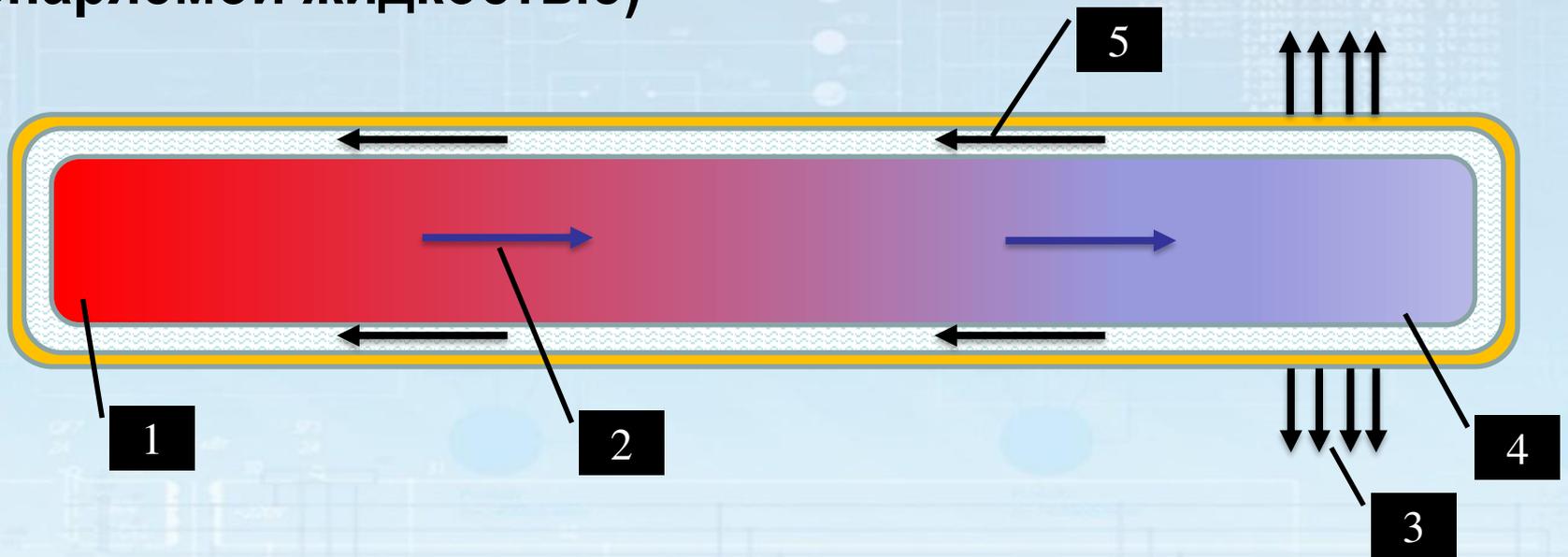


Толщина охлаждающей секции – 1 мм.
Микроканалов – 29.
Рассеиваемая мощность – до 400 Вт при объемном расходе охлаждающей жидкости 1 л/мин.

- 1 – многослойная подложка из окиси алюминия;
- 2 – жидкостный соединитель;
- 3 – контактные площадки;
- 4 – проволочные соединения;
- 5 – кристаллы;
- 6 – распределительный канал для охлаждающей жидкости;
- 7 – межсоединения;
- 8 – микроканалы для охлаждающей жидкости

Тепловые трубки

- основа конструкции испарительной системы охлаждения (замкнутая полость с фитилем и испаряемой жидкостью)



- 1 – тепловая энергия воспринимаемая, зона испарения (испарительная часть);
- 2 – поток пара;
- 3 – тепловая энергия отводимая в окружающую среду;
- 4 – зона охлаждения (конденсационная часть);
- 5 – возврат конденсированной жидкости



Принцип работы тепловой трубы

- ❖ При **нагревании зоны испарения** тепловой трубы (ТТ) происходит **поглощение большого количества тепловой энергии**, определяемой теплотой парообразования используемой жидкости.
- При этом **давление в зоне испарения повышается.**
- ❖ **Пар под избыточным давлением**, а с ним и **тепловая энергия**, **поступают в зону охлаждения** (конденсационную часть).
 - ❖ **Стенки конденсационной части ТТ имеют более низкую температуру**, что приводит к **конденсации пара**, уменьшению его давления и выделению тепловой энергии.
 - ❖ **Испарение происходит при постоянной температуре** и пар сохраняет эту температуру до встречи с более холодной поверхностью, что обуславливает высокую осевую теплопроводность ТТ и минимальный перепад температуры по ее длине.

Способы возврата
конденсированной жидкости
к области испарения



При наличии циркуляционного насоса происходит испарительное охлаждение с интенсивной прокачкой теплоносителя

Тепловые трубы с капиллярными структурами

Капиллярный эффект проявляется в материале (фитиле) с малыми сообщающимися порами и хорошей смачиваемостью.

Возникающие между жидкостью и стенками **силы поверхностного натяжения** заставляют **жидкость двигаться в сторону испарительной части**.

Капиллярные структуры изготавливают из спекаемых частиц, тканых сеток, стеклянных волокон, сочетания продольных, спиральных и других канавок или путем комбинации указанных структур.

ТТ с капиллярными структурами имеют

- достаточно простую конструкцию,
- их работа не требует затраты внешней энергии
- и мало зависит от сил гравитации.

Факторы, влияющие на характеристики ТТ

Основными факторами, влияющими на теплоотводящую способность ТТ, являются

- геометрические размеры ТТ, в том числе площади испарительной и конденсационной зон,
- их ориентация,
- размеры фитиля и ячеек сетки в капиллярных структурах,
- коэффициент теплопроводности материала стенок ТТ,
- а также такие теплофизические свойства жидкости как:
 - теплота парообразования;
 - коэффициент поверхностного натяжения;
 - плотность и вязкость;
 - коэффициент теплопроводности.

Указанные свойства жидкости, а следовательно и характеристики ТТ, зависят от температуры, поэтому конкретная жидкость будет наиболее эффективно работать в определенном температурном диапазоне.

Эффективность тепловых труб

по сравнению с жидкостными системами охлаждения, характеризуются:

- более высокой способностью отвода тепловой энергии,
- лучшей технологичностью
- высоким постоянством температуры по длине (площади)
- более низкой стоимостью изготовления и эксплуатации.

Удельная отводимая тепловая энергия рассмотренного выше многокристального модуля с жидкостным охлаждением равна примерно 4 Вт/см^2 , в то время как для близкого по конструкции и размерам многокристального модуля с испарительным охлаждением фирмы IBM эта величина составляет порядка 9 Вт/см^2 .

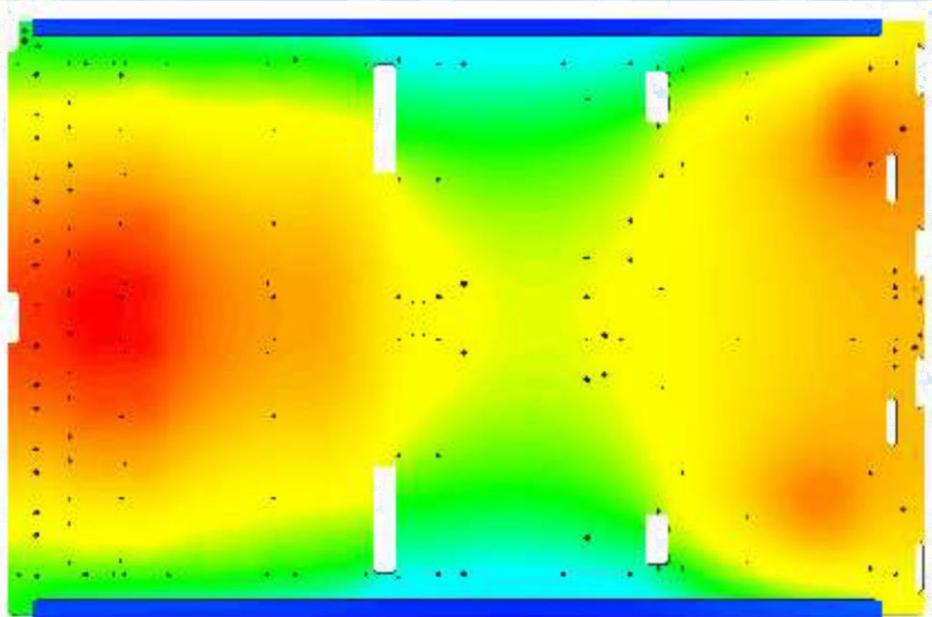
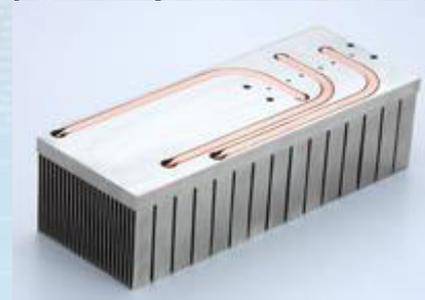
Контурные тепловые трубки (КТТ)

Высокоэффективные пассивные теплопередающие устройства, работающие по замкнутому испарительно-конденсационному циклу и использующие капиллярное давление для прокачки теплоносителя

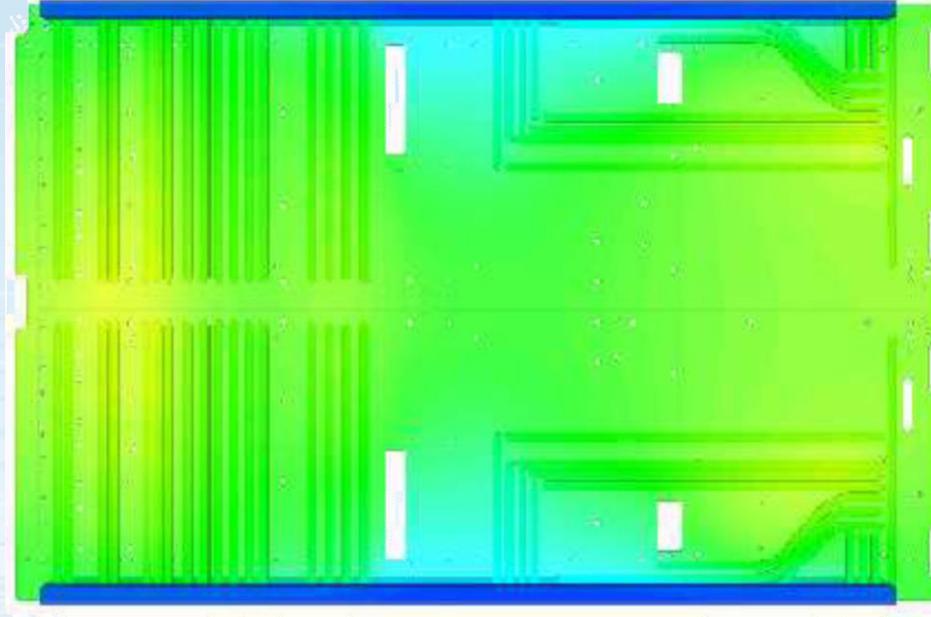


Высокотеплопроводные стенки NiK

- High thermal conductivity (NiK) алюминиевые радиаторы
- Тепловые трубки интегрируются в стенку.
- Теплопроводность достигает 500..800 Вт/м*К



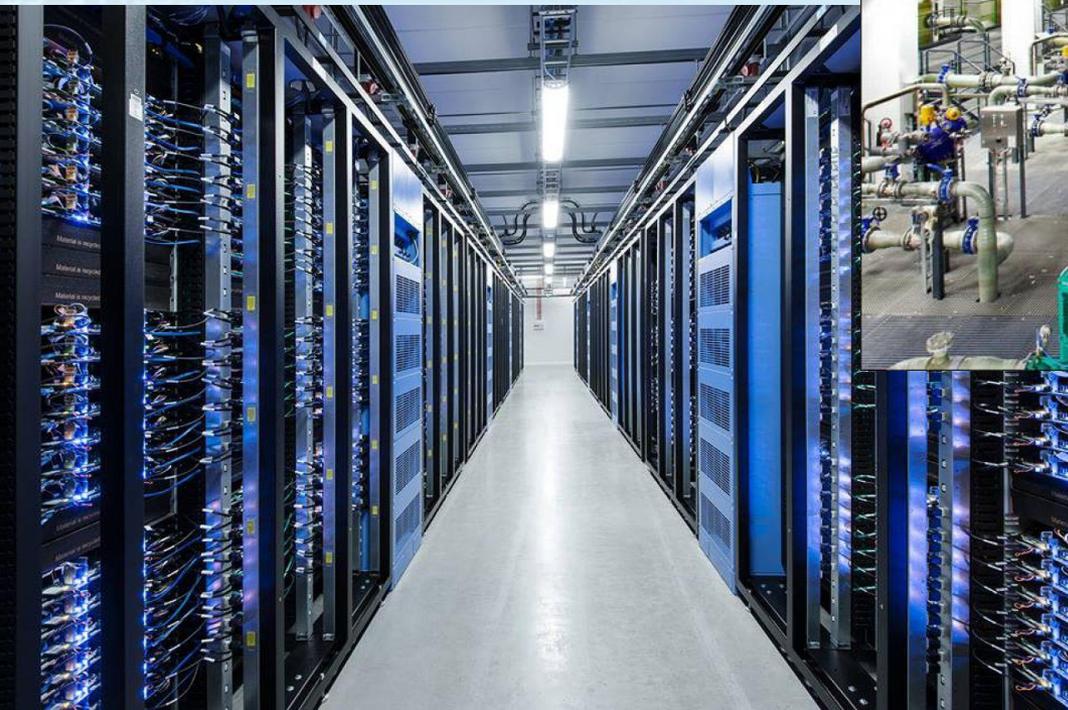
Температурный профиль
алюминиевой пластины



Температурный профиль
NiK пластины

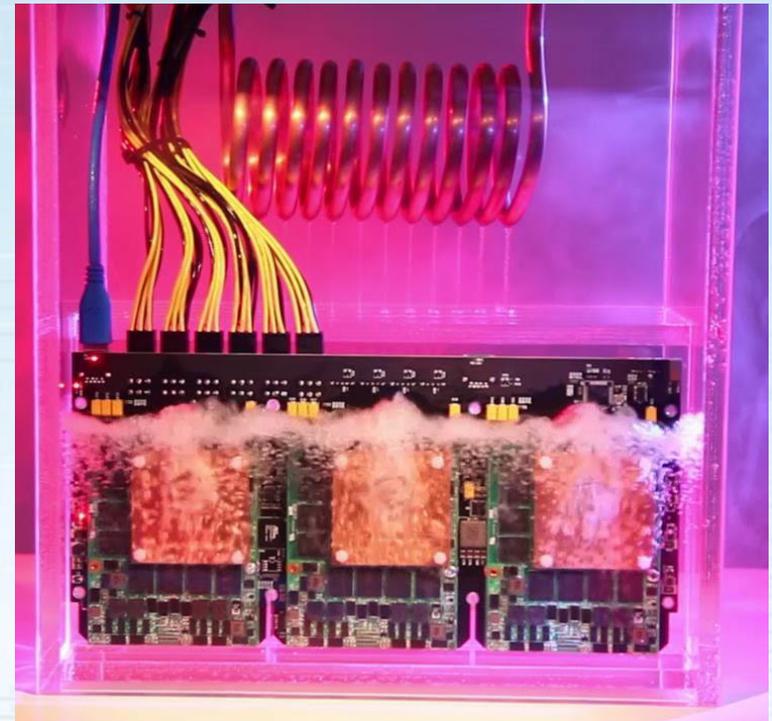
Энергоэффективность ЦОД

- До 40..60% энергозатрат ЦОД – системы охлаждения



Иммерсионное жидкостное охлаждение

- Метод прямого погружения в жидкий хладагент (диэлектрическая ванна).
- Эффективность выше чем воздушное охлаждение в 4000 раз.
- Два подхода:
 - Простое охлаждение
 - Двухфазное охлаждение
- Решение для ЦОД – до сотен кВт на стойку.



Иммерсионное жидкостное охлаждение

- **Преимущества**
 - Высокая плотность серверов
 - Повышенная отказоустойчивость за счет тепловой инерционности охлаждающей жидкости
 - Снижение затрат (при классическом охлаждении ЦОД - до 40% энергозатрат идет на системы охлаждения)
 - Снижение шума
- **Недостатки**
 - Большие разовые затраты на переоборудование ЦОД
 - Угроза утечек
 - Проблема реализации оптических линий связи

Литература

- Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. - М.: Энергия, 1971. - 248 с.