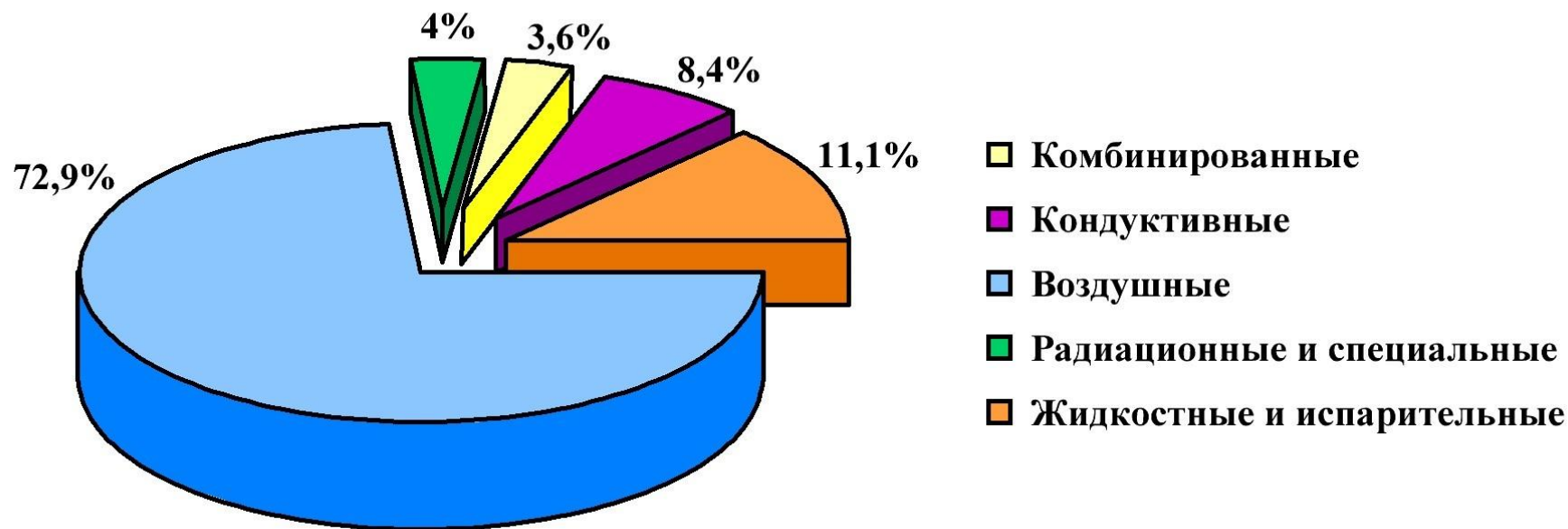


**ЛЕКЦИЯ**  
**Устройства и системы охлаждения**  
**электронных средств**

# Основные способы охлаждения РЭС



## Распространённость систем охлаждения



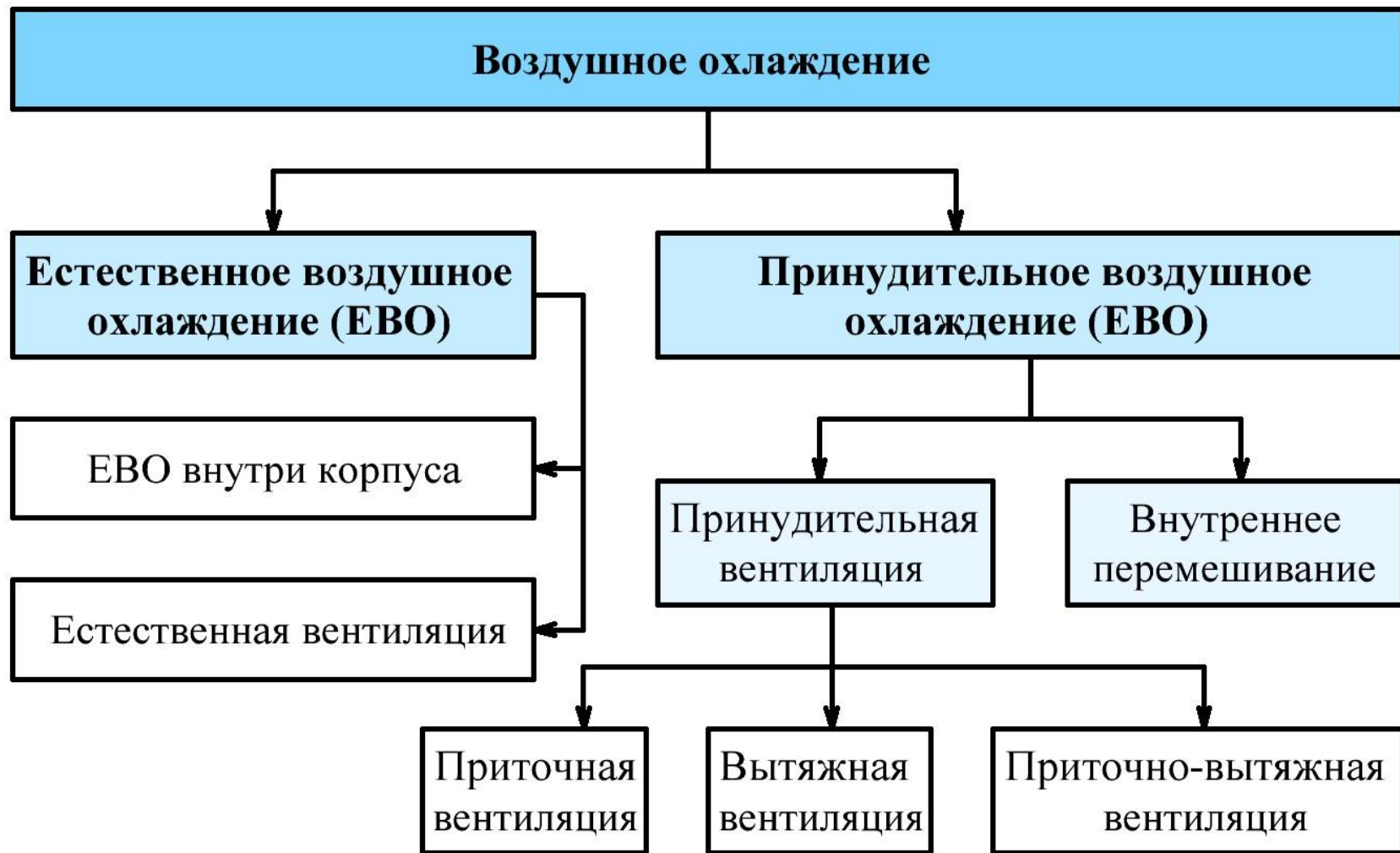
# Показатели эффективности способов охлаждения

Таблица 1 – Эффективность основных способов охлаждения

Вид охлаждения	Плотность теплового потока $P_s$ , Вт/см <sup>2</sup>	Коэффициент теплоотдачи, Вт/м <sup>2</sup> ·°С
Естественное воздушное охлаждение	0,2	2...10
Принудительное воздушное охлаждение	1,0	10...150
Принудительное жидкостное охлаждение	20	300...3000
Испарительное охлаждение	200	500...120000

# Показатели эффективности способов охлаждения

Характер тепловых процессов	Интенсивность теплообмена, Вт/(м <sup>2</sup> К)
Естественная конвекция и излучение	2...10
Вынужденная конвекция в воздухе и газах	10...100
Естественная конвекция в масле и других жидкостях той же плотности	200...300
Вынужденная конвекция в масле и других жидкостях той же плотности	300...1000
Естественная конвекция в воде	200...600
Вынужденная конвекция в воде	1000...3000
Кипение воды	500...45000
Капельная конденсация водяных паров	40000...120000
Конденсация органических паров	500...2000



# Естественное воздушное охлаждение (ЕВО)

- это отвод тепла от охлаждаемого тела в окружающую среду.

- **Естественное воздушное охлаждение внутри корпуса:** тепло от деталей за счет конвективной теплоотдачи и излучения передается герметичному корпусу, а от него таким же способом – в окружающую среду.
- **Естественная вентиляция ЭС** происходит за счет разности плотностей холодного и нагретого внутреннего воздуха. Для прохода воздуха в корпусе имеются вентиляционные отверстия (перфорация), при этом часть тепла отдается воздуху, проходящему через аппарат, часть рассеивается от корпуса в окружающую среду.

# Принудительное воздушное охлаждение (ПВО)

- охлаждение потоком воздуха, объем, и скорость которого определяется специальными устройствами.

- **Внутреннее перемешивание воздуха** вентилятором в объеме герметичного корпуса.
- **Принудительная вентиляция.** Применяется в тех случаях, если интенсивная вентиляция и внутреннее перемешивание не обеспечивают нормальный тепловой режим РЭС.  
**Наружный обдув корпуса.** Применяется для охлаждения герметичных блоков.
- **Локальная принудительная вентиляция** – обдув отдельных, наиболее нагретых, элементов.





# Приточная система воздушного охлаждения

характеризуется тем, что холодный воздух под давлением, создаваемым нагнетателем, поступает в конструкцию, отбирает тепло от элементов и выбрасывает в окружающую среду или поступает в вытяжной воздуховод (коллектор).

## Достоинства приточной системы:

- повышенное давление воздуха на выходе, что способствует улучшению теплообмена;
- на входе могут быть установлены фильтры для защиты от пыли.

## Недостатки приточной системы:

- дополнительный нагрев поступающего воздуха двигателем вентилятора;
- существует возможность образования застойных воздушных зон.

# Вытяжная система воздушного охлаждения

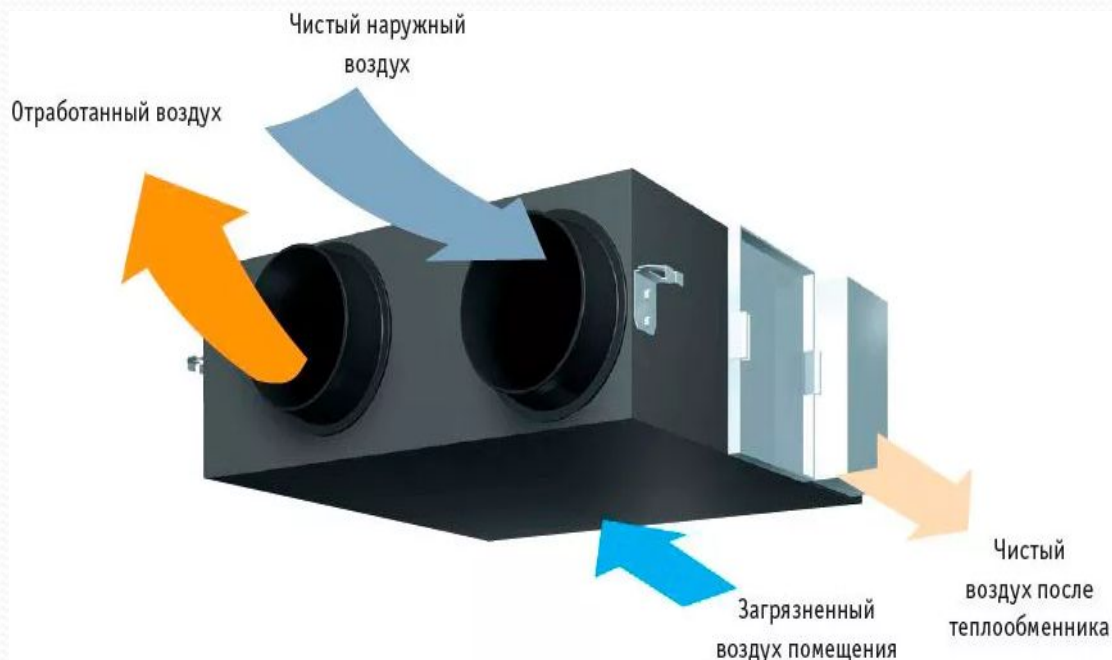
В вытяжной системе вентилятор, устанавливаемый на выходе воздуха, отсасывает воздух создавая под кожухом конструкции некоторое разрежение.

- Преимущества вытяжной системы:
- наиболее мощные источники тепла конструкции могут быть максимально приближены к входным отверстиям;
- тепло, выделяемое электродвигателем вентилятора, не влияет на работу изделия.
  
- Недостатки вытяжной системы:
- из-за наличия разрежения воздух менее эффективен как теплоноситель, пыль активно всасывается внутрь изделия (фильтрация воздуха в данном случае невозможна);
- вентилятор работает в струе горячего воздуха, поэтому его надежность снижается.

# Приточно-вытяжная система охлаждения

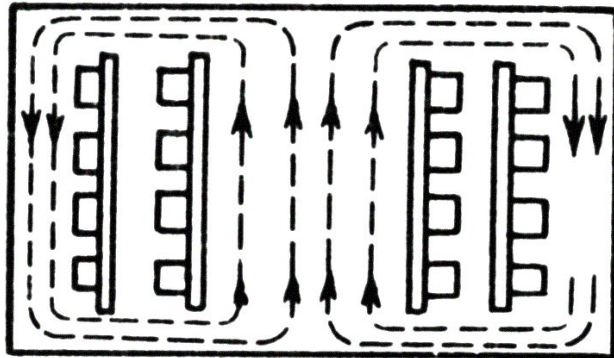
В приточно-вытяжной системе вентиляторы устанавливают на входе и выходе воздуха.

- Преимущества приточно-вытяжной системы:
- утечки воздуха в несколько раз ниже, чем в других системах;
- Недостатки приточно-вытяжной системы:
- значительно проигрывает другим схемам по материальным показателям (масса, габариты, стоимость).

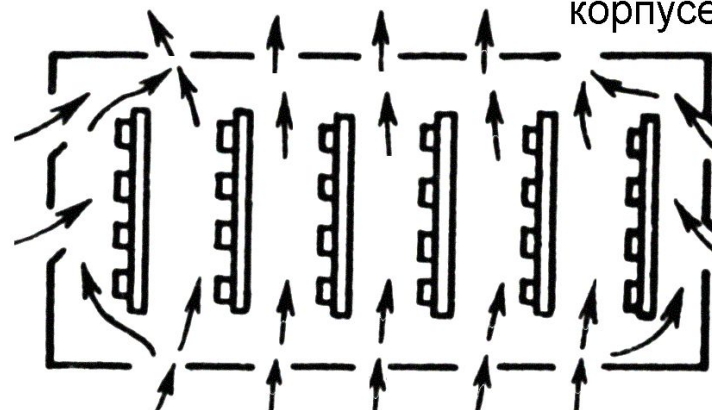


# Воздушные системы охлаждения (аэрогенные системы)

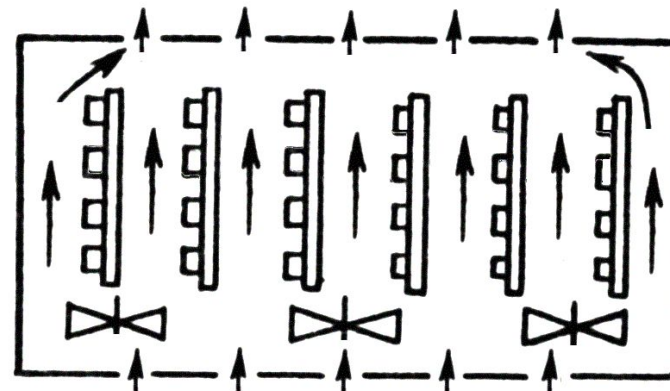
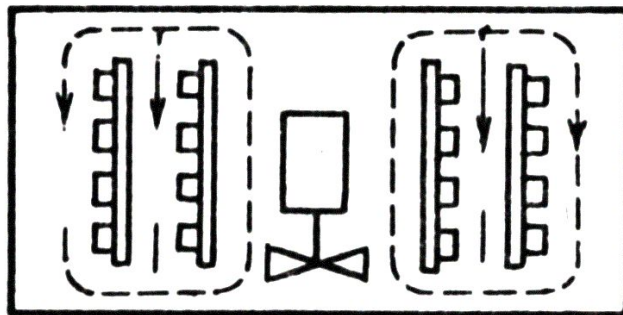
Естественное воздушное в герметизированном корпусе



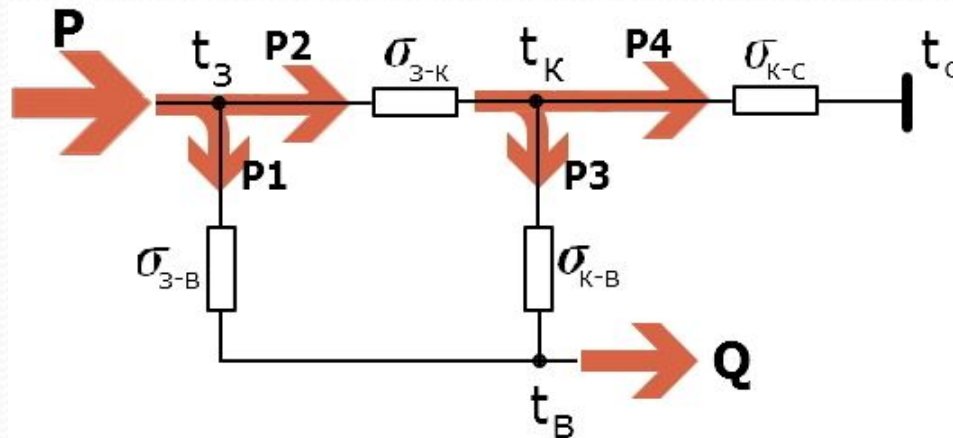
Воздушное в негерметизированном корпусе



Принудительное воздушное в герметизированном и негерметизированном корпусе



# Простая модель блока с ПВО



По тепловой схеме составляются уравнения:

$$P = P_1 + P_2,$$

$$P_2 = P_3 + P_4,$$

В этой системе:

$$P_4 = б_{к-с}(t_k - t_c),$$

$$P_3 = б_{з-в}(t_k - t_v),$$

$$P_2 = б_{з-к}(t_3 - t_k),$$

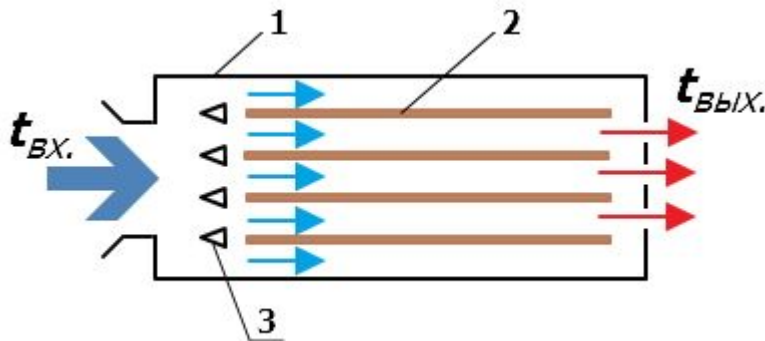
$$P_1 = б_{з-в}(t_3 - t_v),$$

Третье уравнение

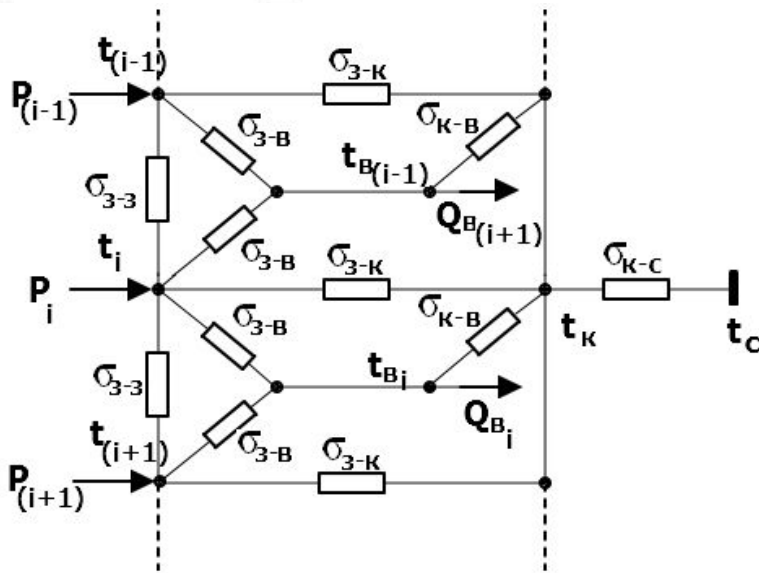
записывается в предположении, что все тепло, кроме рассеиваемого в окружающем пространстве, расходуется на повышение теплосодержания воздушного потока:

$$P - P_4 = б_{вп}(t_{вых} - t_{вх}).$$

# Модель блока с учетом теплообмена в нагретой зоне



- 1 – корпус блока
- 2 – печатные узлы (модули)
- 3 – воздухораспределительное устройство



Фрагмент эквивалентной схемы для трех плат

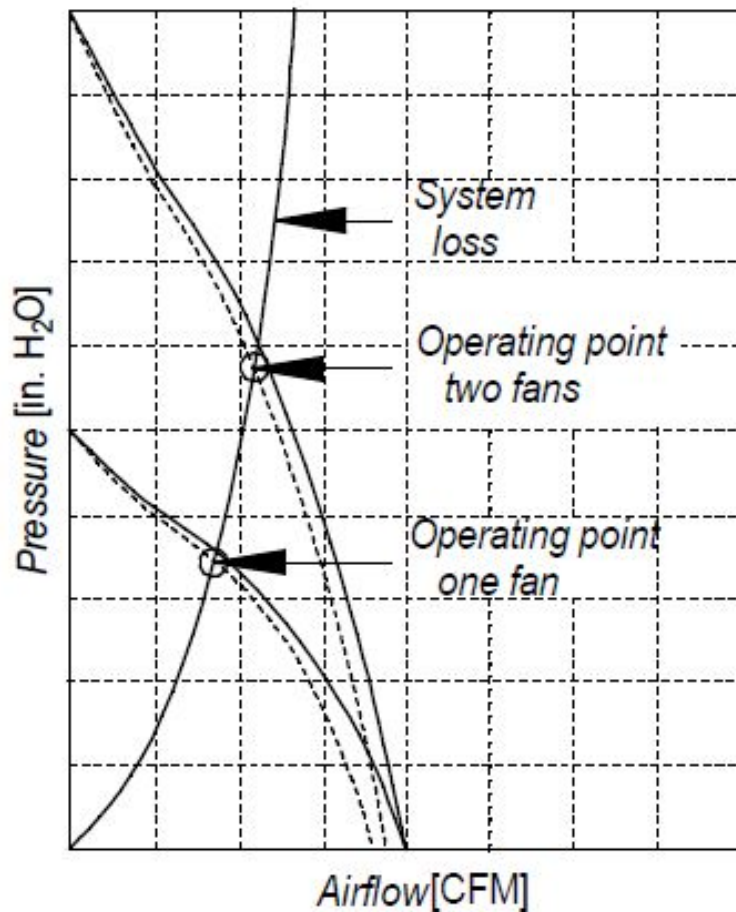
Каждая из трех ячеек отдает тепло воздушному потоку (тепловая проводимость бэ-) кожуху (бз-к), часть тепла с кожуха уносится воздушным потоком (бк-в), оставшаяся часть рассеивается в окружающем пространстве (бк-с). Кроме того, осуществляется взаимный обмен между функциональными ячейками через тепловые проводимости бб.

# Вентиляторы

- Для охлаждения системы используются несколько вентиляторов. Существует несколько способов установки вентиляторов: параллельно или последовательно.
- Параллельно – это когда ставится два вентилятора рядом, а последовательно – это два вентилятора друг за другом.



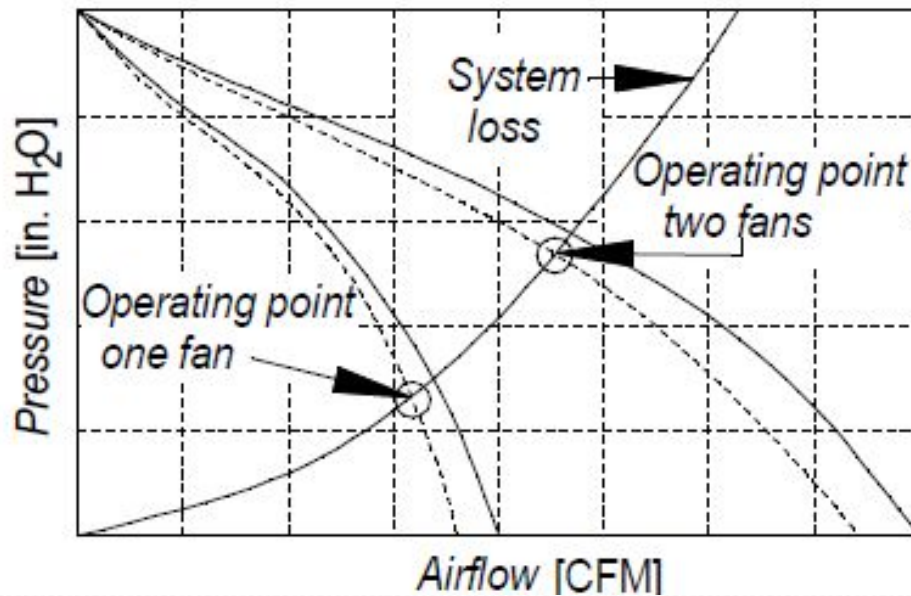
# Последовательное включение вентиляторов



Последовательная установка увеличивает статическое давление и больше подходит к системам с высоким внутренним сопротивлением (например, когда у вас очень плотная установка элементов в корпусе и вентиляционная перфорация не впечатляет).



# Параллельное включение вентиляторов



Параллельная установка больше подходит для систем с низким сопротивлением воздушному потоку и используется для увеличения массового расхода.

# Жидкостное принудительное охлаждение

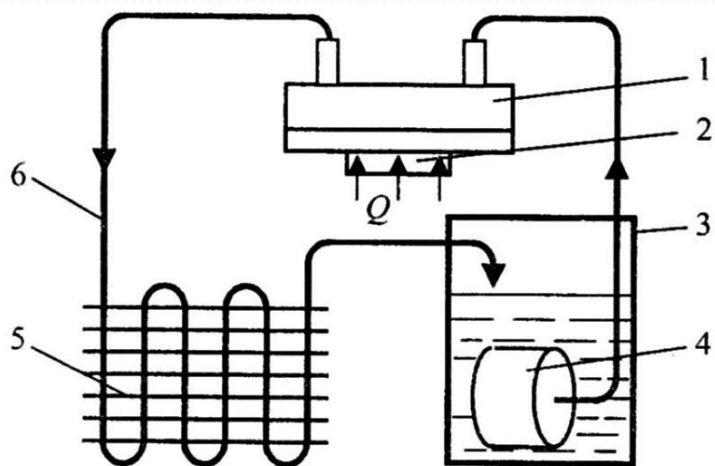


Рис. – Схема системы водяного охлаждения:  
1 – первичный теплообменник; 2 – процессор;  
3 – бак с водой; 4 – насос; 5 – радиатор;  
6 – соединительные шланги

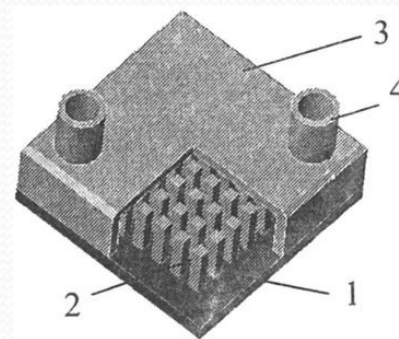
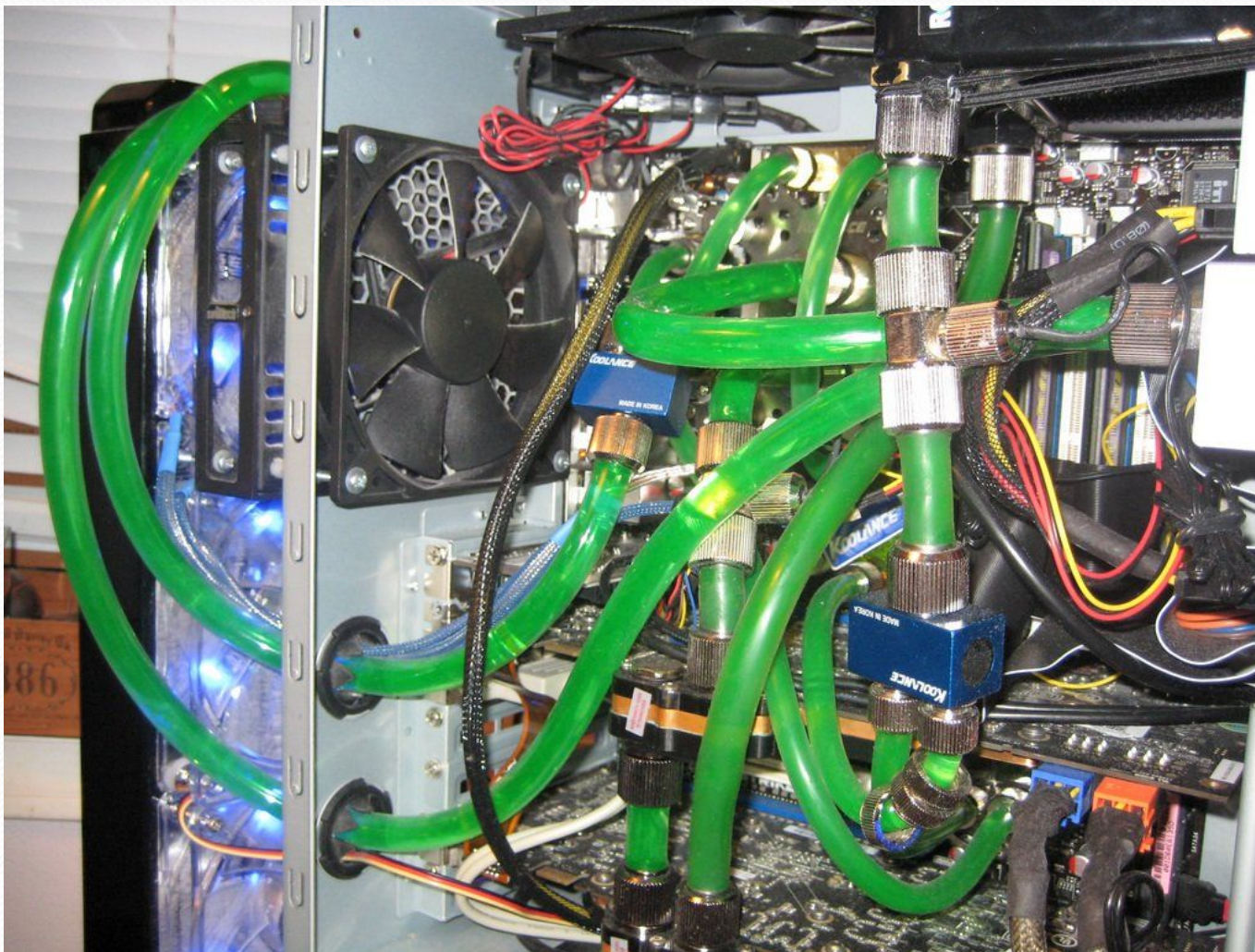


Рис. 1.18 – Конструкция первичного теплообменника:  
1-контактная пластина;  
2-штыри;  
3-крышка;  
4-штуцер

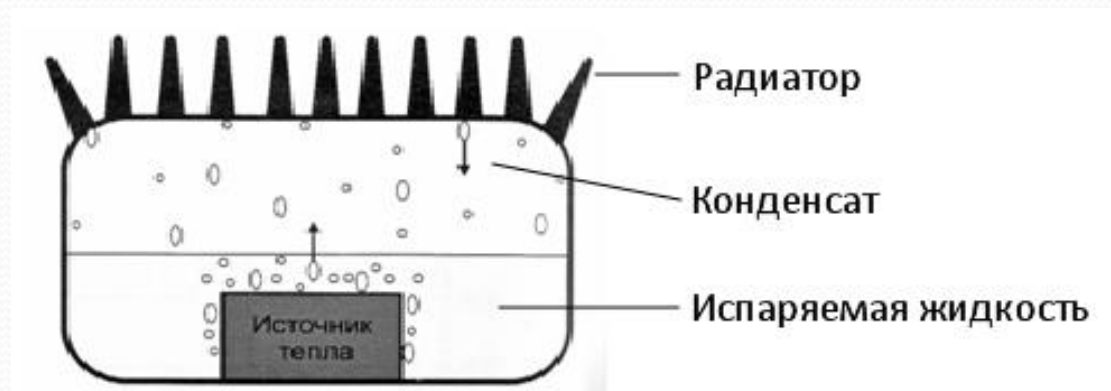
**+** Высокая тепловая эффективность, низкое тепловое сопротивление, небольшой уровень шумов

**■** Необходим компрессор, возможны утечки, относительно высокая цена

# Жидкостная система охлаждения компьютера



# Иммерсионные (испарительные) системы



- + Очень высокая эффективность
- Необходима хорошая изоляция электрических деталей и узлов от контакта с жидкостью

## Разработка компании 3M

Для сокращения затрат на охлаждение серверов и снижения вредного воздействия выбросов в окружающую среду компания 3M разработала революционный метод охлаждения для дата-центров технические жидкости для иммерсионного охлаждения однофазных и двухфазных системах. Внедрение такого метода позволяет сократить энергозатраты на 97% (!) при уменьшении площадей серверных помещений на порядок и поддержке оптимальной рабочей температуры процессоров.

В 2014 году компания 3M получила бронзовую медаль Эдисона за технологию двухфазного охлаждения посредством жидкостей Novac.

# Технические жидкости Novec

Технические жидкости Novec обладают преимуществами перед другими диэлектрическими жидкостями, например минеральным маслом. Помимо того что жидкости 3М являются невоспламеняющимися и невзрывоопасными, они имеют необходимую точку кипения и термостабильность для построения двухфазной системы охлаждения. Обслуживание и ремонт оборудования не вызовет проблем — ведь погруженные в жидкость платы остаются чистыми и сухими.

Диэлектрические жидкости 3М совместимы с любыми материалами.



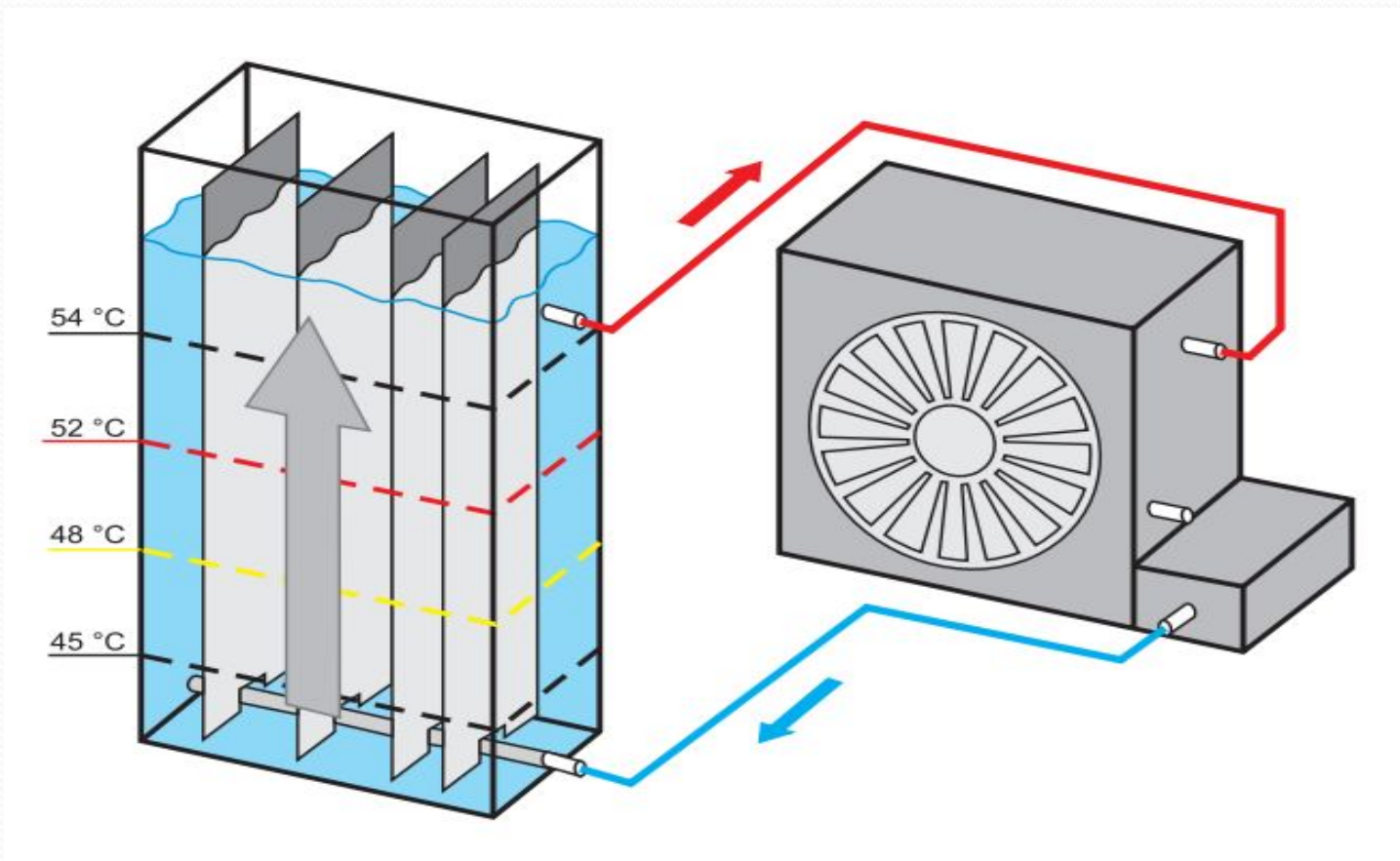
	<b>Воздушное охлаждение</b>	<b>Пассивное двухфазное иммерсионное охлаждение</b>
<b>Увеличение производительности</b>	<b>Низкое</b> До 5-10%	<b>Высокое</b> До 30-40%
<b>Пожаробезопасность</b>	<b>Возможно возгорание</b>	Максимальная пожаробезопасность
<b>Срок службы оборудования</b>	<b>Стандартный</b> Оборудование изнашивается за 1,5 года из-за постоянной вибрации, перегрева, попадания пыли и окисления	<b>Выше на 100-200%</b> Оборудование исправно служит от 3 до 4,5 лет за счет создания оптимальной рабочей среды, исключаяющей любое физическое или химическое воздействие
<b>Плотность мощности на стойку</b>	<b>Низкая</b> До 10 КВт/м <sup>2</sup>	<b>Высокая</b> До 100 КВт/м <sup>2</sup>
<b>Затраты на электроэнергию</b>	<b>Высокие</b> Средний показатель PUE составляет 1,3	<b>Низкие</b> В 10 раз ниже традиционного воздушного способа охлаждения, показатель PUE 1,03
<b>Практичность</b>	<b>Отсутствует</b> Огромное количество тепловой энергии рассеивается без практической цели в окружающей среде	<b>Высокая</b> Возможность использования отведенного тепла для обогрева дома, полов, теплиц и воды
<b>Мобильность</b>	<b>Отсутствует</b> В среднем один ASIC майнер издает от 80 до 100 дБ шума, что сравнимо со звуком взлетающего авиалайнера. Более того, даже одно устройство за час прогревает большую жилую комнату до 40 и выше градусов	<b>Высокая</b> Возможность «домашнего» использования: оборудование практически бесшумно, контур охлаждения может быть замаскирован под внешний блок домашнего кондиционера

# Преимущества двухфазного охлаждения перед воздушным

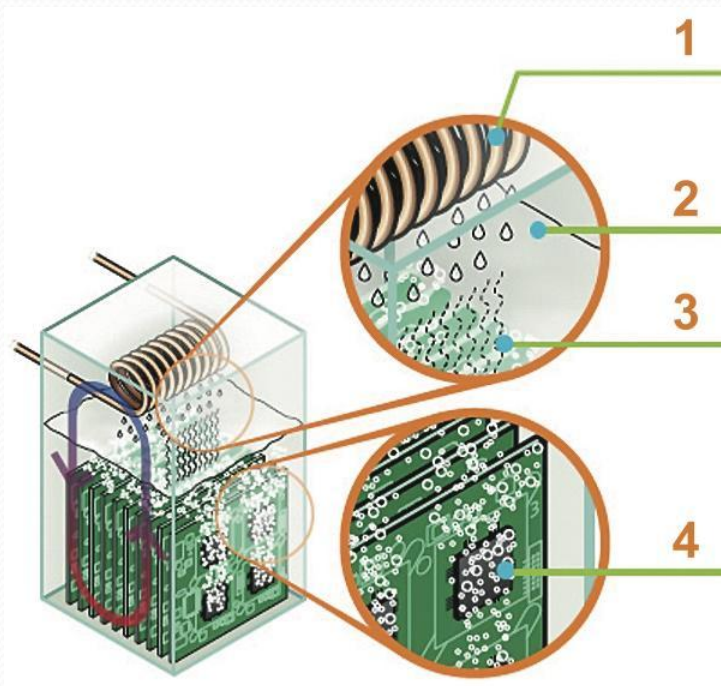
	Увеличение плотности мощности на стойку	Повышение производительности в расчете на 1 м <sup>2</sup>	Существенное снижение энергопотребления
Воздушное охлаждение 	<b>4–40</b> кВт	До <b>10</b> кВт/м <sup>2</sup>	<b>1,2–2</b> рPUE
Охлаждение жидкостями Novac 	До <b>250</b> кВт	До <b>100</b> кВт/м <sup>2</sup>	<b>1,02</b> рPUE



# Схема однофазного типа охлаждения без фазового перехода



# Механизм двухфазного охлаждения



- 1 – пар конденсируется на крышке или катушке радиатора;
- 2 – жидкость стекает в резервуар;
- 3 – пар поднимается вверх;
- 4 – жидкость, нагретая от работы компонентов переходит в пар

# Пример внедрения иммерсионного охлаждения



Суперкомпьютер Suiren, разработанный японской компанией PEZY Computing и ExaScaler Inc., использует однофазное охлаждение на основе жидкости 3M Fluorinert, что помогло ему войти в лист Green 500 самых высокопроизводительных компьютеров.

# Термоэлектрическое охлаждение

Основные эффекты, которые лежат в основе термоэлектрического охлаждения:

- ✓ Пельтье
- ✓ Зеебека

## Термоэлектрический модуль (ТЭМ)



**+** Малые размеры, нет зависимости от окружающей температуры, реверс работы

**—** Низкий КПД, значительная удельная масса

# Выбор способа охлаждения на ранних стадиях проектирования

Цель выбора: определить способ охлаждения, который необходим и достаточен для обеспечения нормального теплового режима разрабатываемого изделия.

Выбор осуществляется по диаграмме на рис. 1

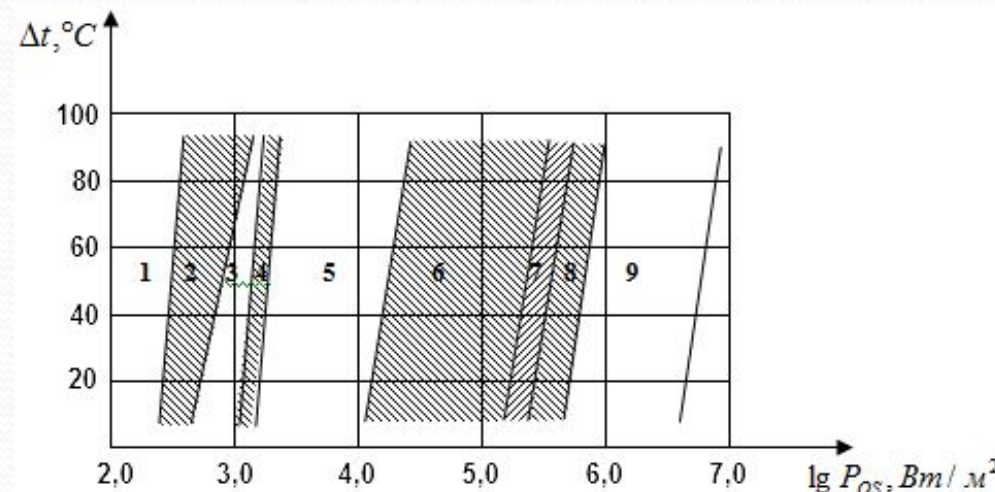


Рис. 1

Незаштрихованные зоны относятся к способам охлаждения: 1 - естественное воздушное, 3 - принудительное воздушное, 5 - принудительное жидкостное, 9 - принудительное испарительное.

Заштрихованным зонам соответствуют: 2 - естественное и принудительное воздушное охлаждение, 4 - принудительное воздушное и жидкостное, 6 - принудительное жидкостное и естественное испарительное, 7 - принудительное жидкостное, принудительное и естественное испарительное, 8 - естественное и принудительное испарительное

# Выбор способа охлаждения на ранних стадиях проектирования

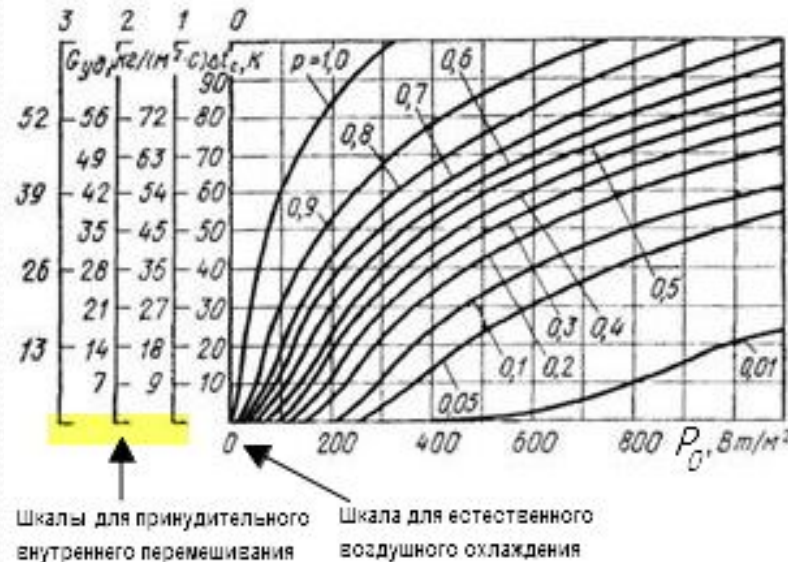


Рис. 2 – Вероятностные кривые для блока в герметичном кожухе с ЕВО (шкала  $G_{yd}=0$ ) и с принудительным внутренним перемешиванием воздуха для 3 значений расхода ( $G_{yd}=1$ ,  $G_{yd}=2$  и  $G_{yd}=3$  кг/с·м<sup>2</sup>)

- Если точка попадает в область  $p \geq 0,8$ , то можно остановиться на рассматриваемом способе охлаждения;
- Если точка попадает в область  $0,8 > p \geq 0,3$ , то выбор можно сохранить, но чем меньше  $P$ , тем больше внимания следует уделить обеспечению теплового режима в дальнейшем при детальной проработке конструкции;
- При попадании в область  $0,3 > p \geq 0,1$  не рекомендуется выбирать рассматриваемый метод охлаждения;
- При  $p < 0,1$  обеспечить нормальный тепловой режим рассматриваемым методом охлаждения практически невозможно.

# Кондуктивные системы охлаждения

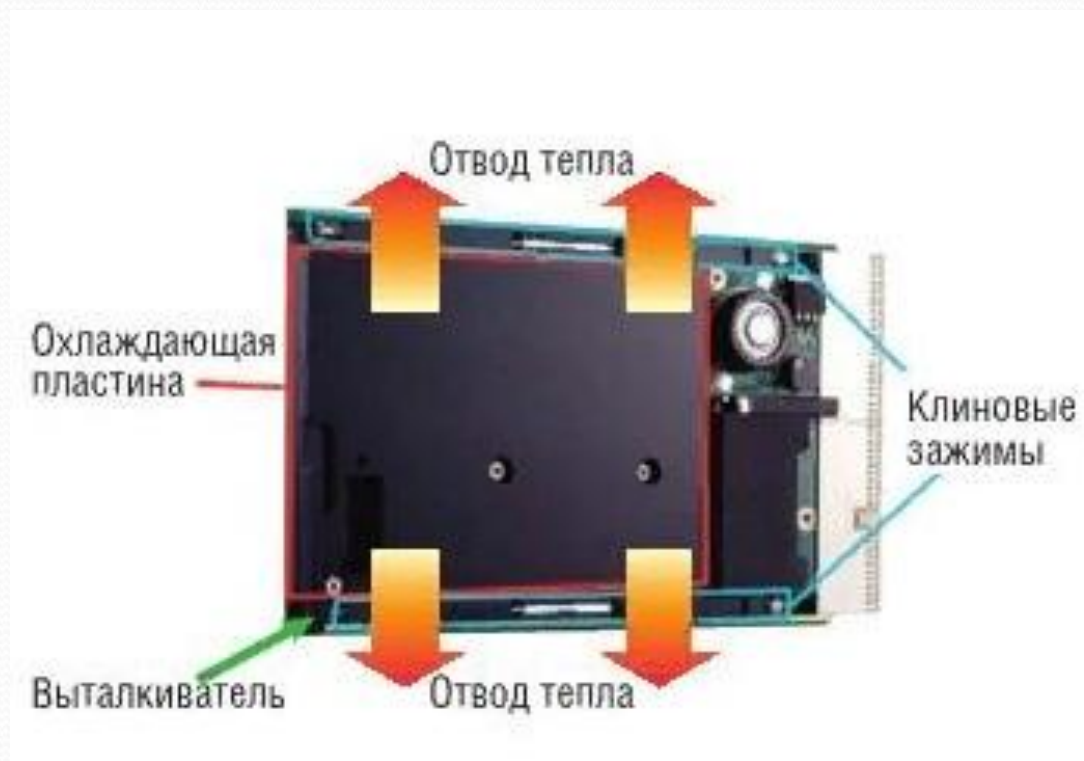
Традиционно данный метод охлаждения применялся для плат и систем, где невозможно было организовать воздушное охлаждение.

Системы, предназначенные для эксплуатации в суровых климатических условиях также выиграют от применения кондуктивного охлаждения.

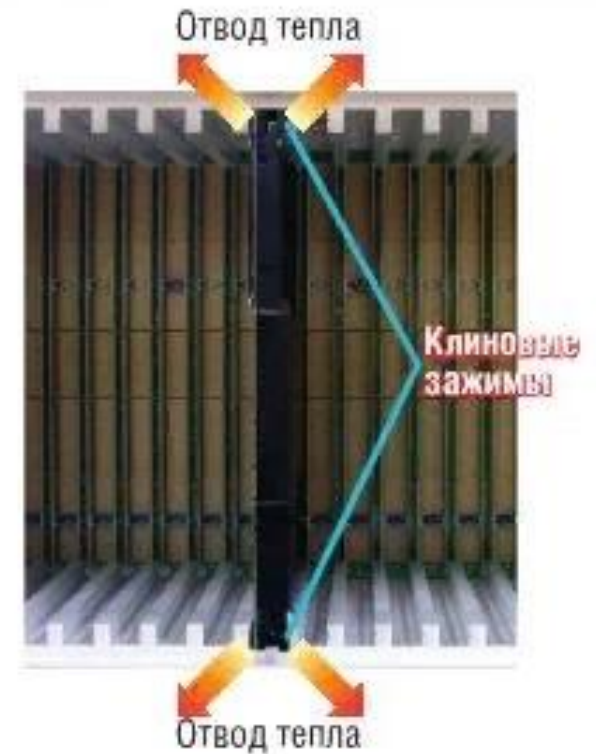
Другая область применения, где описываемый метод охлаждения крайне полезен – разработка и производство систем в виде герметично запаянных боксов для защиты электронных компонентов от пыли и загрязнений.

В качестве теплоотводов могут использоваться различного рода радиаторы, металлические шины или стержни, тепловые трубы и термосифоны.

# Пример кондуктивных систем охлаждения



Расположение теплоотводящей пластины на модуле с кондуктивным охлаждением



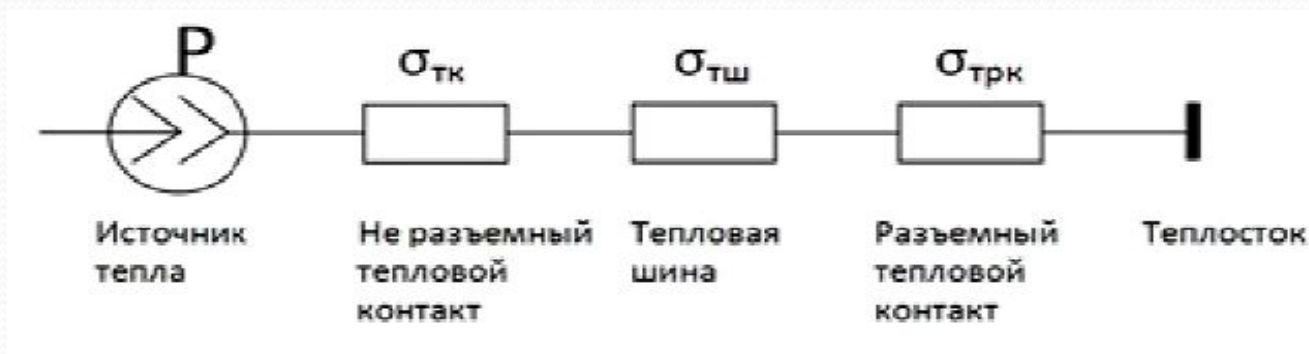
Модуль с кондуктивным теплоотводом, установленным внутри шасси



# Разновидности кондуктивных систем охлаждения

- Существуют виды кондуктивных систем охлаждения: кондуктивно-воздушные, кондуктивно-жидкостные и кондуктивно-испарительные системы охлаждения.
- В этих кондуктивных, комбинированных системах охлаждения передача теплоты от источников осуществляется теплопроводностью по специальным теплоотводам, а затем конвекцией в воздух или жидкость или путём фазового превращения жидкости, окружающей теплоотводы источников тепловыделений, или содержащейся внутри теплоотводов, на которых установлены источники.

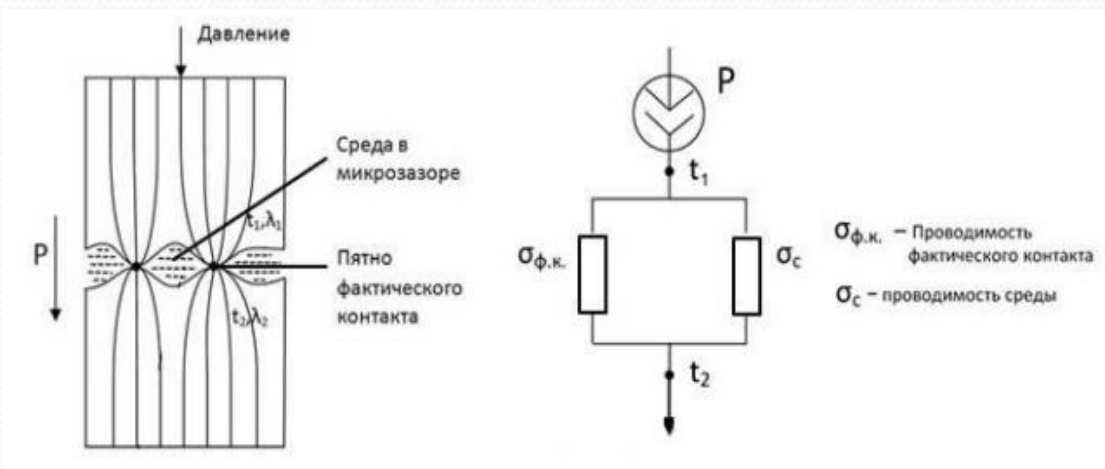
# Эквивалентная схема кондуктивной системы охлаждения



Кондуктивные системы охлаждения основаны на контактном способе передачи тепла за счет теплопроводности элементов конструкции.

Тепло, выделяемое источником, через неразъемный тепловой контакт, передается на теплоотвод (тепловую шину), с которой через тепловой разъем поступает на тепловой сток (теплообменник).

# Тепловой контакт двух поверхностей



Тепловое сопротивление контакта:

$$R_k = \Delta t_k / P = 1 / (\sigma_{ф.к} + \sigma_c)$$

Удельное сопротивление фактического контакта:

$$R_{ф.к.уд} = (\varphi / 2,12 \lambda_m \eta) \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$$

При расчете удельного сопротивления фактического контакта находят отношение:

$$\eta / \varphi = (pV / E)^{0,8}$$

Значение коэффициента В находят из графика (рис. 1)

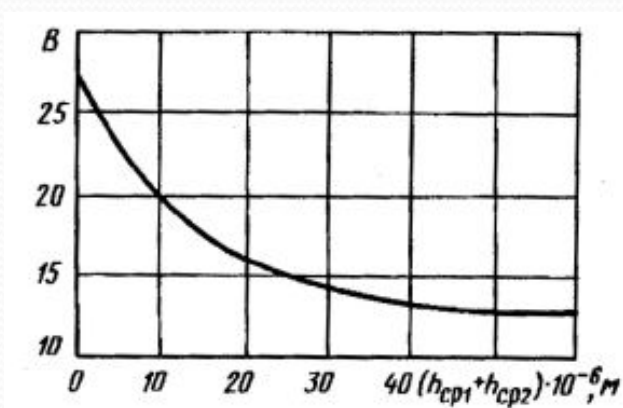


Рис. 1

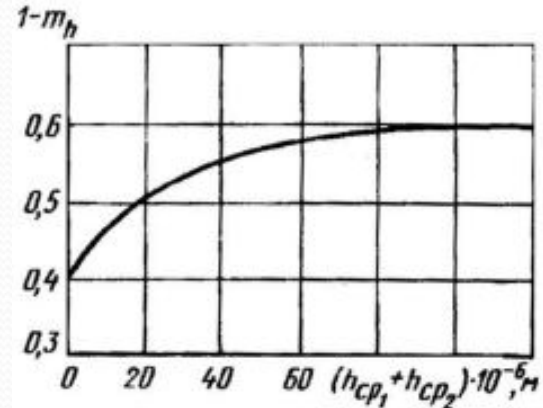


Рис. 2

Тогда

$$R_{\text{фк.уд}} = 10^{-4} [2,12 \cdot \lambda_{\text{м}} (\text{pВ} / \text{Е})^{0,8}]^{-1}, \text{ м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}.$$

Тепловая проводимость прослойки межконтактной среды

$$b_{\text{с.уд}} = \lambda_{\text{с}} / \sigma_{\text{экв}}$$

Эквивалентное расстояние между контактирующими поверхностями

$$\sigma_{\text{экв}} = (h_{\text{cp1}} + h_{\text{cp2}})(1 - m_h)$$

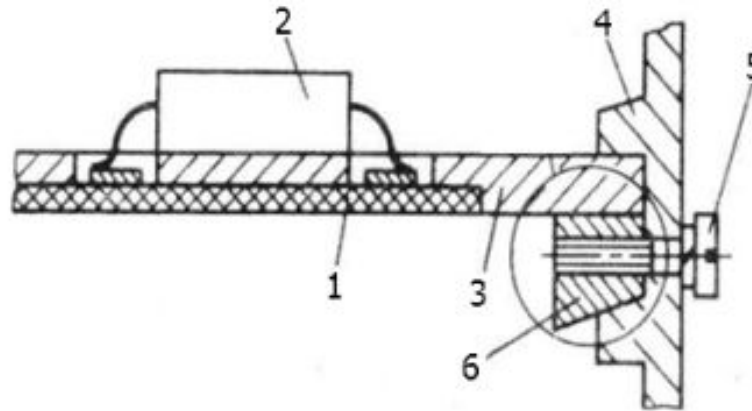
С помощью графика (рис. 2) находят значение  $(1 - m_h)$

Значение удельной тепловой проводимости для некоторых контактирующих материалов приведены в следующей таблице

Материалы контактирующих пар	$\sigma_{к_{уд}} \cdot 10^4,$ Вт/м <sup>2</sup> ·°С
1. Медь – алюминий	12,5
2. Медь – медь.	10
4. Медь – сплав Д16Т	5,0
5. Сплав Д16Т – сплав Д16Т	4,0
6. Сталь – сталь	1,5
7. Сталь – сталь (резьбовое соединение)	0,17
8. Металл – краска – металл	0,05

# Разъемные тепловые контакты

Рассмотрим тепловой контакт, выполненный в виде клина.



1 – печатная плата; 2 – микросхема; 3 – рама;  
4 – корпус блока; 5 – винт; 6 – клин.

Особенность клинового контактного узла: обеспечивают высокие давление в местах контакта.

# Радиаторы

Радиатор – устройство с очень развитой теплоотдающей поверхностью. Главным показателем эффективности радиатора является тепловое сопротивление радиатор-среда  $R_{p-c} = \Delta t/P$ , град/Вт.

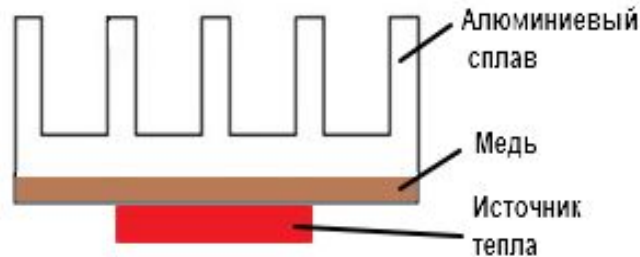


Рис. 1 – Устройство гибридного радиатора

Параметры радиатора представлены в таблице.

Параметр	Al	Cu	Al + Cu
Перегрев $\Delta t$ , °C	23,2	20,3	20,9
Тепловое сопротивление, °C/Вт	0,58	0,51	0,52
Масса, отн. ед.	≈0,6	1	0,76

# Виды радиаторов

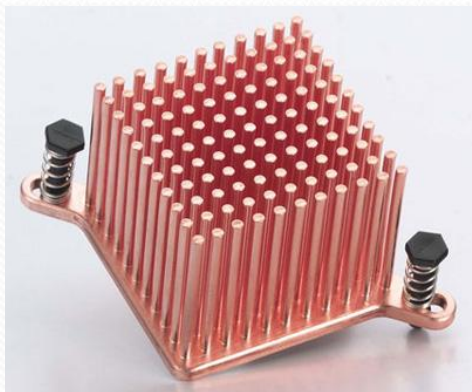


Рис. 1 – Радиатор игольчатый

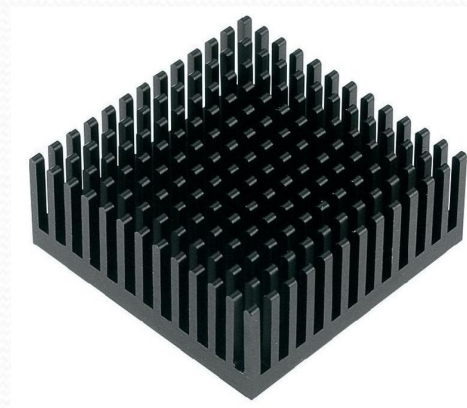


Рис. 2 – Радиатор штыревой

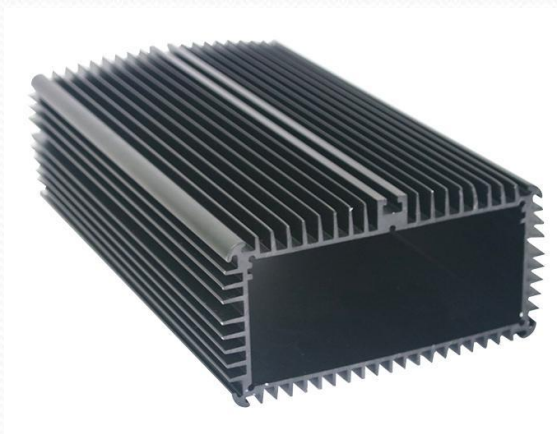


Рис. 3 – Оребренный корпус

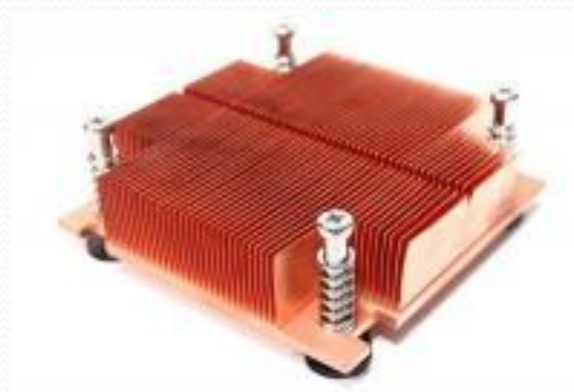


Рис. 4 – Радиатор пластинчатый



# Тепловые трубки

Тепловая трубка (ТТ) – высокотехнологичное устройство на фазовом переходе теплоносителя.

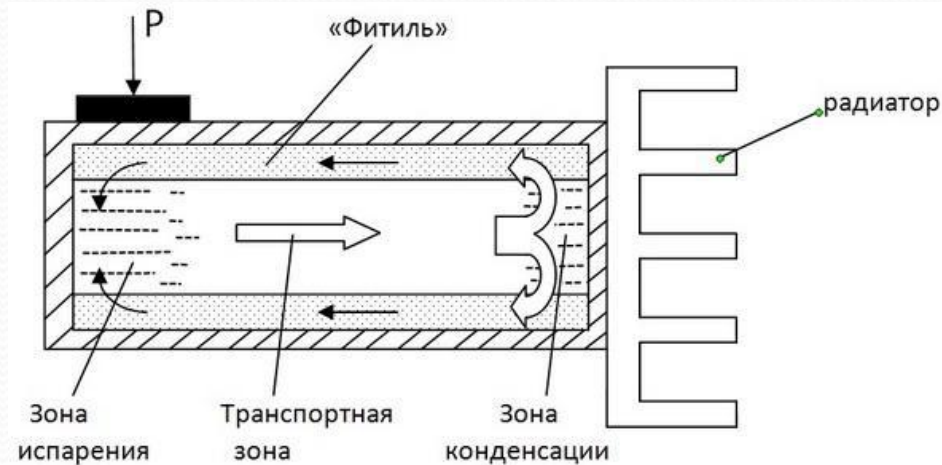


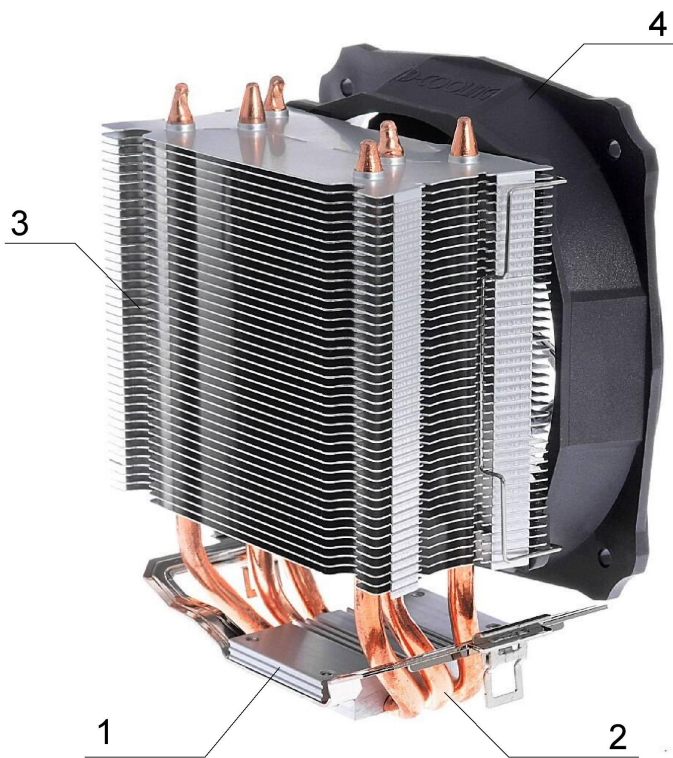
Рис. 1 – Устройство тепловой трубки

Основная функция ТТ – высокоэффективная передача тепла. Тепловые трубки могут работать при очень малых перепадах температур, поэтому их длина не имеет большого значения.

Характеристики рабочего вещества в тепловых трубках представлены в таблице.

Вещество	Температура кипения, °С	Уд. теплоемкость, Дж/кг·°С	Удельная теплота испарения, Дж/кг
Эфир этиловый	34,6	2,35	351
Сероуглерод	46,2	1,006	348
Ацетон	56,2	2,18	524
Спирт метиловый	64,7	2,5	1110
Спирт этиловый	78,3	2,43	846
Вода при $H=1 \text{ кг/см}^2$	100	4,18	2260
Вода при $H=0,05 \text{ кг/см}^2$	30		2400

# Радиаторы с тепловыми трубками



- 1 – первичный теплообменник
- 2 – тепловая трубка
- 3 – ребро радиатора
- 4 – кулер

# Дополнительное охлаждение ЭРИ на печатных платах

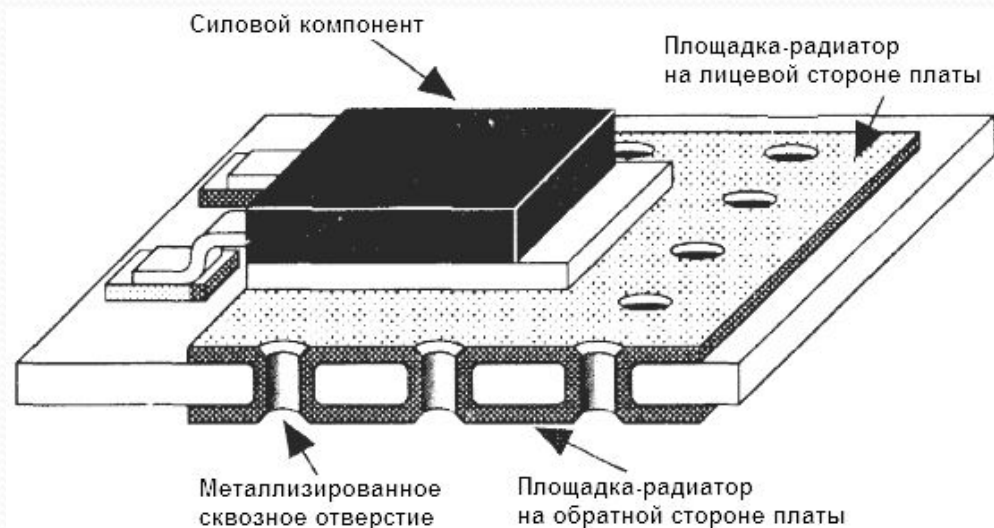


Рис. 1 – Печатный радиатор

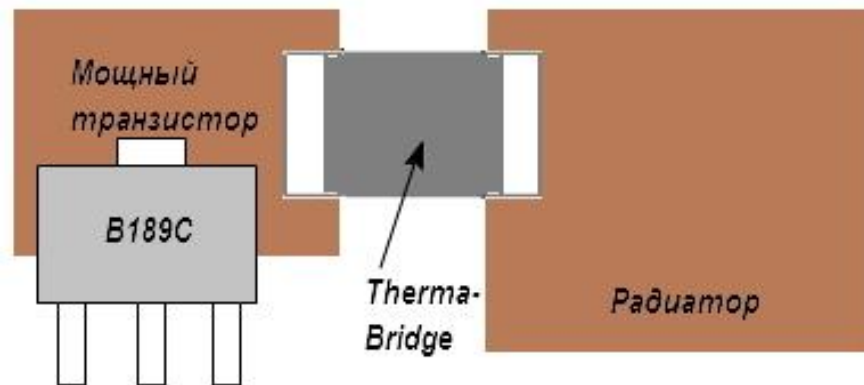
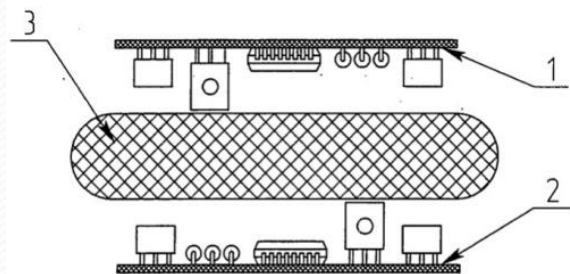


Рис. 2 – Тепловой мостик

# Способ теплоотдачи и радиационной защиты электронных блоков с использованием аморфных материалов



1,2 – печатные узлы  
3 – аморфный элемент

Рис. 1 – Исходное положение

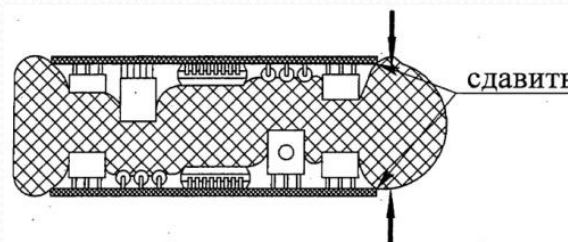


Рис. 2 - Формирование рельефа аморфного элемента путем сжатия

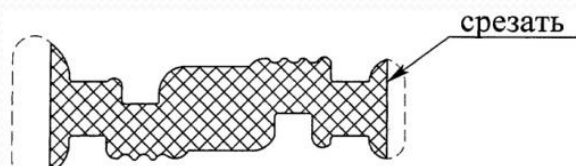
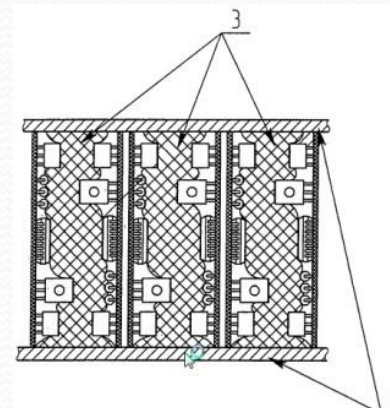


Рис. 3 – Отвержденный аморфный элемент с указанием мест его обработки



4 - теплостоки

Рис. 4 – Собранный конструкция