

## **Расчет ребристого радиатора как элемента теплообменника с принудительной конвекцией.**

Приведена методика, на примере процессора Intel Pentium4 Willamette 1.9 ГГц и кулера B66-1A производства компании ADDACorporation, описывающая порядок расчета ребристых радиаторов, предназначенных для охлаждения тепловыделяющих элементов РЭА с принудительной конвекцией и плоскими поверхностями теплового контакта мощностью до 100 Вт. Методика позволяет произвести практический расчет современных высокоэффективных малогабаритных устройств для отвода тепла и применить их ко всему спектру устройств радиоэлектроники нуждающихся в охлаждении.

### **Параметры, задаваемые в исходных данных:**

$P = 67$  Вт, мощность выделяемая охлаждаемым элементом;

$\theta_c = 296$  °К, температура среды (воздуха) в градусах Кельвина;

$\theta_{\text{пред}} = 348$  °К, предельная температура кристалла;

$\theta_p = \text{nn}$  °К, средняя температура основания радиатора;

$H = 3 \cdot 10^{-2}$  м, высота ребра радиатора в метрах;

$\delta = 0,8 \cdot 10^{-3}$  м, толщина ребра в метрах;

$b = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м, расстояние между ребрами;

$\lambda_m = 380$  Вт/(м °К), коэффициент теплопроводности материала радиатора;

$L = 8,3 \cdot 10^{-2}$  м, размер радиатора вдоль ребра в метрах;

$B = 6,9 \cdot 10^{-2}$  м, размер радиатора поперек ребер;

$A = 8 \cdot 10^{-3}$  м, толщина основания радиатора;

$V = 2$  м/сек, скорость воздуха в каналах радиатора;

$Z = 27$ , число ребер радиатора;

$\theta_p = \text{nn}$  К, температура перегрева основания радиатора, вычисляется в процессе расчета;

$\epsilon_p = 0,7$ , степень черноты радиатора.

Предполагается, что источник тепла расположен по центру радиатора.

Все линейные размеры измеряются в метрах, температура в градусах Кельвина, мощность в ваттах, а время в секундах.

Конструкция радиатора и необходимые для расчетов параметры показана на рисунке 1.

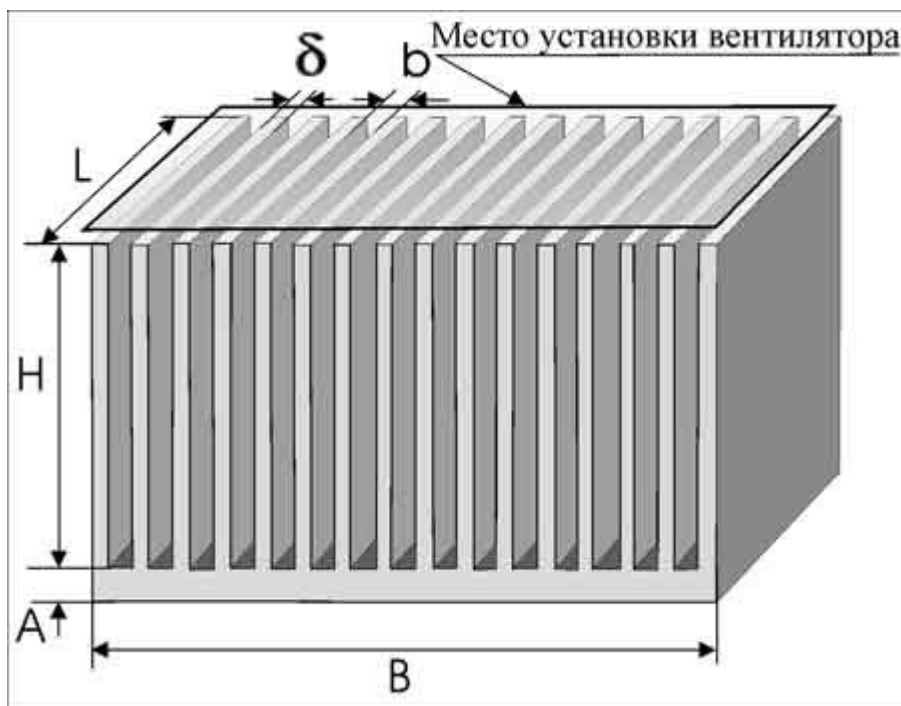


Рисунок 1.

### Порядок расчета:

1. Определяем суммарную площадь сечения каналов между ребрами по формуле:

$$S_k = (Z - 1) \cdot b \cdot H \quad [1]$$

$$S_k = (Z - 1) \cdot b \cdot H = (27 - 1) \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Для центральной установки вентилятора, воздушный поток выходит через две торцевые поверхности и площадь сечения каналов удваивается и равняется  $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

2. Задаемся двумя значениями температуры основания радиатора и проводим расчет для каждого значения:

$$\theta_p = 353 (+80^\circ\text{C}); 313 (+40^\circ\text{C})$$

Отсюда определяется температура перегрева основания радиатора  $\nu_p$  относительно окружающей среды.

$$\nu_p = \theta_p - \theta_c \quad [2]$$

Для первой точки  $\nu_p = 57^\circ\text{K}$ , для второй  $\nu_p = 17^\circ\text{K}$ .

3. Определяем температуру  $\theta$ , необходимую для расчета критериев Нуссельта (Nu) и

## Методика расчета ребристого радиатора с принудительной конвекцией.

Рейнольдса (Re):

$$\theta = \theta_c + P / (2 \cdot V \cdot S_k \cdot \rho \cdot C_p) [3]$$

где:

$\theta_c$  – температура окружающего воздуха, среды,

$V$  – скорость воздуха в каналах между ребрами, в м/сек;

$S_k$  – суммарная площадь поперечного сечения каналов между ребрами, в м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность воздуха при температуре  $\theta_{cp}$ , в кг/м,

$$\theta_{cp} = 0,5 (\theta_p + \theta_c);$$

$C_p$  – теплоемкость воздуха при температуре  $\theta_{cp}$ , в Дж/(кг x °K);

$P$  – мощность отводимая радиатором.

$$\theta = \theta_c + P / (2 \cdot V \cdot S_k \cdot \rho \cdot C_p) = 296 \text{ K} + 67 / (2 \cdot 2 \text{ м/сек} \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot 1,21 \cdot 1005) = 302,3 \text{ K} (29,3 \text{ C})$$

\* Величина, для данного ребристого радиатора с центральной установкой вентилятора,  $V$  из расчетов 1,5 - 2,5 м/сек (См. Приложение 2), из публикаций [Л.3] около 2 м/сек. Для коротких, расширяющихся каналов, как например у кулера Golden Orb скорость охлаждающегося воздуха может достигать 5 м/сек.

4. Определяем величины критериев Рейнольдса и Нуссельта, необходимые для расчета коэффициента теплоотдачи ребер радиатора:

$$Re = V \cdot L / \nu [4]$$

где:

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха при  $\theta_c$ , м<sup>2</sup>/с из Приложения 1, таблица 1.

$$Re = VL/\nu = 2 \cdot 8,3 \cdot 10^{-2} / 15,8 \cdot 10^{-6} = 1,05 \cdot 10^4$$

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} [5]$$

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} = 0,032 (2,62 \cdot 10^4)^{0,8} = 52,8$$

5. Определяем коэффициент конвективного теплообмена ребер радиатора:

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda_B / L \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{ K}) [6]$$

где:

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха (Вт/(м град)), при  $\theta_c$  из Приложения 1, таблица 1.

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda_B / L = 52,8 \cdot 2,72 \cdot 10^{-2} / 8,3 \cdot 10^{-2} = 17,3$$

6. Определяем вспомогательные коэффициенты:

$$m = (2 \cdot \alpha_k / \lambda_M \cdot \delta)^{1/2} [7]$$

определяем значение  $mh$  и тангенса гиперболического  $th(mh)$ .

## Методика расчета ребристого радиатора с принудительной конвекцией.

$$m = (2 \cdot \alpha_k / \lambda_m \cdot \delta)^{1/2} = (2 \cdot 17,3 / (380 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}))^{1/2} = 10,6$$

$$m \cdot H = 10,6 \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 0,32; \text{th}(m \cdot H) = 0,31$$

7. Определяем количество тепла, отдаваемое конвекцией с ребер радиатора:

$$P_{\text{рк}} = Z \cdot \lambda_m \cdot m \cdot S_p \cdot v_p \cdot \text{th}(m \cdot H) \quad [8]$$

где:

$Z$  – число ребер;

$\lambda_m$  = коэффициент теплопроводности металла радиатора, Вт/(м · °К);

$m$  – см. формулу 7;

$S_p$  – площадь поперечного сечения ребра радиатора, м<sup>2</sup>,

$$S_p = L \cdot \delta \quad [9]$$

$v_p$  – температура перегрева основания радиатора.

$$S_p = L \cdot \delta = 8,3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} = 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

$$P_{\text{рк}} = Z \cdot \lambda_m \cdot m \cdot S_p \cdot v_p \cdot \text{th}(m \cdot H) = 27 \cdot 380 \cdot 10,6 \cdot 6,6 \cdot 10^{-5} \cdot 57 \cdot 0,31 = 127 \text{ Вт.}$$

8. Определяем среднюю температуру ребра радиатора:

$$\theta_{\text{ср}} = (\theta_p / 2) [1 + 1 / \text{ch}(m \cdot H)] \quad [10]$$

где:  $\text{ch}(m \cdot H)$  – косинус гиперболический.

$$\theta_{\text{ср}} = (\theta_p / 2) [1 + 1 / \text{ch}(m \cdot H)] = (353/2) [1 + 1/1,05] = 344^\circ\text{К} (71^\circ\text{C})$$

\* Величина тангенса и косинуса гиперболических вычисляется на инженерном калькуляторе путем последовательного выполнения операций "hyp" и "tg" или "cos".

9. Определяем лучистый коэффициент теплообмена:

$$\alpha_{\text{л}} = \epsilon_p \cdot f(\theta_{\text{ср}}, \theta_c) \cdot \varphi \quad [11]$$

$$f(\theta_{\text{ср}}, \theta_c) = 0,23 [5 \cdot 10^{-3} (\theta_{\text{ср}} + \theta_c)]^3$$

$$f(\theta_{\text{ср}}, \theta_c) = 0,23 [5 \cdot 10^{-3} (\theta_{\text{ср}} + \theta_c)]^3 = 0,23 [5 \cdot 10^{-3} (335 + 296)]^3 = 7,54$$

Коэффициент облученности:

$$\varphi = b / (b + 2h)$$

$$\varphi = b / (b + 2H) = 1,5 \cdot 10^{-3} / (1,5 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-2}) = 0,048$$

$$\alpha_{\text{л}} = \epsilon_p \cdot f(\theta_{\text{ср}}, \theta_c) \cdot \varphi = 0,7 \times 7,54 \times 0,048 = 0,25 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$$

10. Определяем площадь поверхности излучающей тепловой поток:

## Методика расчета ребристого радиатора с принудительной конвекцией.

$$S_{\text{л}} = 2 L [(Z - 1) \cdot (b + \delta) + \delta] + 2 H \cdot L \cdot Z \text{ (м}^2\text{)} \quad [12]$$

$$S_{\text{л}} = 2 L [(Z - 1) \cdot (b + \delta) + \delta] + 2 H \cdot L \cdot Z = 0,1445 \text{ м}^2$$

11. Определяем количество тепла отдаваемое через излучение:

$$P_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} \cdot S_{\text{л}} (\theta_{\text{ср}} - \theta_{\text{с}}) \quad [13]$$

$$P_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} S_{\text{л}} (\theta_{\text{ср}} - \theta_{\text{с}}) = 0,25 \cdot 0,1445 \cdot (344 - 296) = 1,73 \text{ Вт}$$

12. Общее количество тепла отдаваемое радиатором при заданной температуре радиатора  $\theta_{\text{р}} = 353\text{К}$ :

$$P = P_{\text{рк}} + P_{\text{л}} \quad [14]$$

$$P = P_{\text{рк}} + P_{\text{л}} = 127 + 1,73 = 128,7 \text{ Вт.}$$

13. Повторяем вычисления для температуры радиатора  $\theta_{\text{р}} = 313\text{К}$ , и строим по двум точкам тепловую характеристику рассчитанного радиатора. Для этой точки  $P=38\text{Вт}$ . Здесь по вертикальной оси откладывается количество тепла отдаваемое радиатором  $P_{\text{р}}$ , а по горизонтальной температура радиатора  $\theta_{\text{р}}$ .



Рисунок 2.

Из полученного графика определяем для заданной мощности  $67\text{Вт}$ ,  $\theta_{\text{р}} = 328 \text{ °К}$  или  $55\text{°С}$ .

14. По тепловой характеристике радиатора определяем что при заданной мощности  $P_{\text{р}}=67\text{Вт}$ , температура радиатора  $\theta_{\text{р}}=328,5\text{°С}$ . Температуру перегрева радиатора  $\upsilon_{\text{р}}$  можно определяем по формуле 2.

$$\text{Она равна } \upsilon_{\text{р}} = \theta_{\text{р}} - \theta_{\text{с}} = 328 - 296 = 32\text{°К}.$$

15. Определяем температуру кристалла и сравниваем её с предельным значением

## Методика расчета ребристого радиатора с принудительной конвекцией.

установленным производителем

$$\theta_k = \theta_p + P (r_{пк} + r_{пр}) \text{ } ^\circ\text{K} = 328 + 67(0,003 + 0,1) = 335 \text{ (} 62^\circ\text{C)}, [15]$$

где:

$\theta_p$  – температура основания радиатора для данной расчетной точки,

P – результат вычисления по формуле 14,

$r_{пк}$  – тепловое сопротивление корпус процессора - кристалл, для данного теплового источника равна 0,003 К/Вт

$r_{пр}$  – тепловое сопротивление корпус-радиатор, для данного теплового источника равна 0,1К/Вт (с теплопроводящей пастой).

Полученный результат ниже определенной производителем предельной температуры, и близко данным [Л.2] (порядка 57°C). При этом температура перегрева кристалла относительно окружающего воздуха в приведенных расчетах 32°C, а в [Л.2] 34°C.

В общем виде, тепловое сопротивление между двумя плоскими поверхностями при применении припоев, паст и клеев:

$$r = \delta_k \cdot \lambda_k^{-1} \cdot S_{\text{конт}}^{-1} [16]$$

где:  $\delta_k$  – толщина зазора между радиатором и корпусом охлаждаемого узла, заполненного теплопроводящим материалом в м,

$\lambda_k$  – коэффициент теплопроводности теплопроводящего материала в зазоре Вт/(м К),

$S_{\text{конт}}$  – площадь контактной поверхности в м<sup>2</sup>.

Приближенное значение  $r_{кр}$  при достаточной затяжке и без прокладок и смазок равно

$$r_{кр} = 2,2 / S_{\text{конт}}$$

При применении паст, тепловое сопротивление падает примерно в 2 раза.

16. Сравниваем  $\theta_k$  с  $\theta_{\text{пред}}$ , мы получили радиатор обеспечивающий  $\theta_k = 325^\circ\text{K}$ , меньше  $\theta_{\text{пред}} = 348^\circ\text{K}$ , - заданный радиатор обеспечивает с запасом тепловой режим узла.

17. Определяем тепловое сопротивление рассчитанного радиатора:

$$r = v_p / P \text{ (} ^\circ\text{K/Вт)} [17]$$

$$r = v_p / P \text{ (} ^\circ\text{K/Вт)} = 32/67 = 0,47^\circ\text{K/Вт}$$

### Выводы:

Рассчитанный теплообменник обеспечивает отвод тепловой мощности 67Вт при температуре окружающего воздуха до 23°C, при этом температура кристалла 325 °К (62°C) не превышает

## **Методика расчета ребристого радиатора с принудительной конвекцией.**

допустимую для данного процессора 348°K (75°С).

Применение специальной обработки поверхности для увеличения отдачи тепловой мощности через излучение на температурах до 50°С оказалось неэффективно и не может быть рекомендовано, т.к. не окупает затрат.

Хотелось бы, чтобы данный материал помог Вам не только рассчитать и изготовить современный малогабаритный высокоэффективный теплообменник, подобный тем, что широко применяются в компьютерной технике, но и грамотно принимать решения по применению подобных устройств, применительно к Вашим задачам.

## Приложение 1.

### Константы для расчета теплообменника.

Таблица 1

θс, К (°C)	λ*10 <sup>-2</sup> Вт/(м*К)	ν*10 <sup>6</sup> м <sup>2</sup> /сек	Ср Дж/ (кг*К)	ρ, кг/м <sup>2</sup>
273 (0)	2,44	13,3	1005	1,29
293 (20)	2,59	15,1	1005	1,21
333 (60)	2,9	19	1005	1,06
373 (100)	3,21	23,1	1009	0,95

Значения констант для промежуточных значений температур, в первом приближении, можно получить построив графики функций для указанных в первом столбце температур.

## Приложение 2.

### Расчет скорости движения воздуха охлаждающего радиатор.

Скорость движения теплоносителя при вынужденной конвекции в газах:

$$V = Gv/Sк$$

Где:

Gv – объемный расход теплоносителя, (для вентилятора 70x70, Spr = 30 см<sup>2</sup>, 7 лопастей, Рэм = 2,3Вт, ω = 3500 об/мин, Gv = 0,6-0,8 м<sup>3</sup>/мин. или реально 0,2-0,3 или V= 2м/сек),

Sk – свободная для прохода площадь поперечного сечения канала.

Учитывая, что площадь проходного сечения вентилятора 30 см<sup>2</sup>, а площадь каналов радиатора 22 см<sup>2</sup>, скорость продувки воздуха определяется меньшим, и будет равна:

$$V = Gv/S = 0,3 \text{ м}^3/\text{мин} / 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 136 \text{ м}/\text{мин} = 2,2 \text{ м}/\text{сек}.$$

Для расчетов принимаем, 2 м/сек.

Литература:

1. Справочник конструктора, под ред. Р.Г.Варламова, М, Советское радио, 1980;
2. <http://www.ixbt.com/cpu/>, Кулеры для Socket 478, сезон весна-лето 2002, Виталий Криницин, Опубликовано — 29 июля 2002 г;
3. <http://www.ixbt.com/cpu/>, Измерение скоростей воздуха за охлаждающими вентиляторами и кулерами, Александр Цикулин, Алексей Рамейкин, Опубликовано — 30 августа 2002 г.

Подготовлен в 2003 году с использованием различных справочников. А. Сорокин.