

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра проектирования информационно-компьютерных систем

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

В двух частях

Часть 2

В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, И. Н. Богатко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В КОНСТРУКЦИЯХ РЭС**

*Рекомендовано УМО по образованию в области
информатики и радиоэлектроники в качестве пособия для специальности
1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование
радиоэлектронных средств»*

Минск БГУИР 2017

УДК 621.396.6-027.31(076.5)

ББК 32.844-02я73

Ф50

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Белорусского национального технического университета (протокол №11 от 09.06.2016);

заведующий кафедрой здорового образа жизни учреждения образования «Белорусская государственная академия связи», доктор технических наук, профессор В. И. Курмашёв

Ф50

Физические основы проектирования радиоэлектронных средств. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 2 : Исследование физических процессов в конструкциях РЭС : пособие / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, И. Н. Богатко. – Минск : БГУИР, 2017. – 74 с. : ил.

ISBN 978-985-543-299-0 (ч. 2).

Рассматриваются вопросы моделирования физических процессов, протекающих в радиоэлектронных средствах.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, может быть использовано аспирантами, инженерами и другими специалистами, занимающимися вопросами проектирования РЭС.

Часть 1-я издана в БГУИР в 2016 году (авторы: В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун).

УДК 621.396.6-027.31(076.5)

ББК 32.844-02я73

ISBN 978-985-543-299-0 (ч. 2)

ISBN 978-985-543-206-8

© Алексеев В. Ф., Пискун Г. А.,
Богатко И. Н., 2017

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №4 Расчёт различных типов теплоотводов.....	4
Лабораторная работа №5 Моделирование радиаторов для радиоэлектронной аппаратуры в среде <i>SolidWorks</i>	47
Приложения	
1. Коэффициенты черноты различных поверхностей.....	59
2. Функция $f(T_{\text{ср}}, T_{\text{о.с}})$	61
3. Значения некоторых параметров различных твёрдых материалов...	62
4. Значения некоторых параметров сухого воздуха.....	64
5. Основные тепловые параметры полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.....	65
Список использованных источников.....	73

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

РАСЧЁТ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ТЕПЛОТВОДОВ

1. Цель работы

Ознакомиться с различными типами теплоотводов и методиками их расчёта. Провести самостоятельный расчёт радиатора согласно заданию, выданному преподавателем.

2. Теоретическая часть

2.1. Методы расчёта теплоотводов

Для отвода тепла от полупроводниковых приборов применяют теплоотводы, действие которых основано на различных способах рассеивания тепловой энергии: теплопроводности, естественной и принудительной конвекции воздуха и жидкости, изменения агрегатного состояния вещества, термоэлектрическом эффекте Пельте.

В настоящее время в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) применяют различные конструкции теплоотводов: пластинчатые, оребрённые, штыревые, петельно-проволочные, типа «краб» и другие, каждая из которых для определенных условий эксплуатации является оптимальной. На рис. 1–4 приведены различные типы радиаторов. Оптимальность конструкции теплоотвода определяется следующими факторами:

- массой и объёмом;
- технологией изготовления и стоимостью материала;
- удобством эксплуатации.



Рис. 1. Радиатор, установленный на мощный транзистор

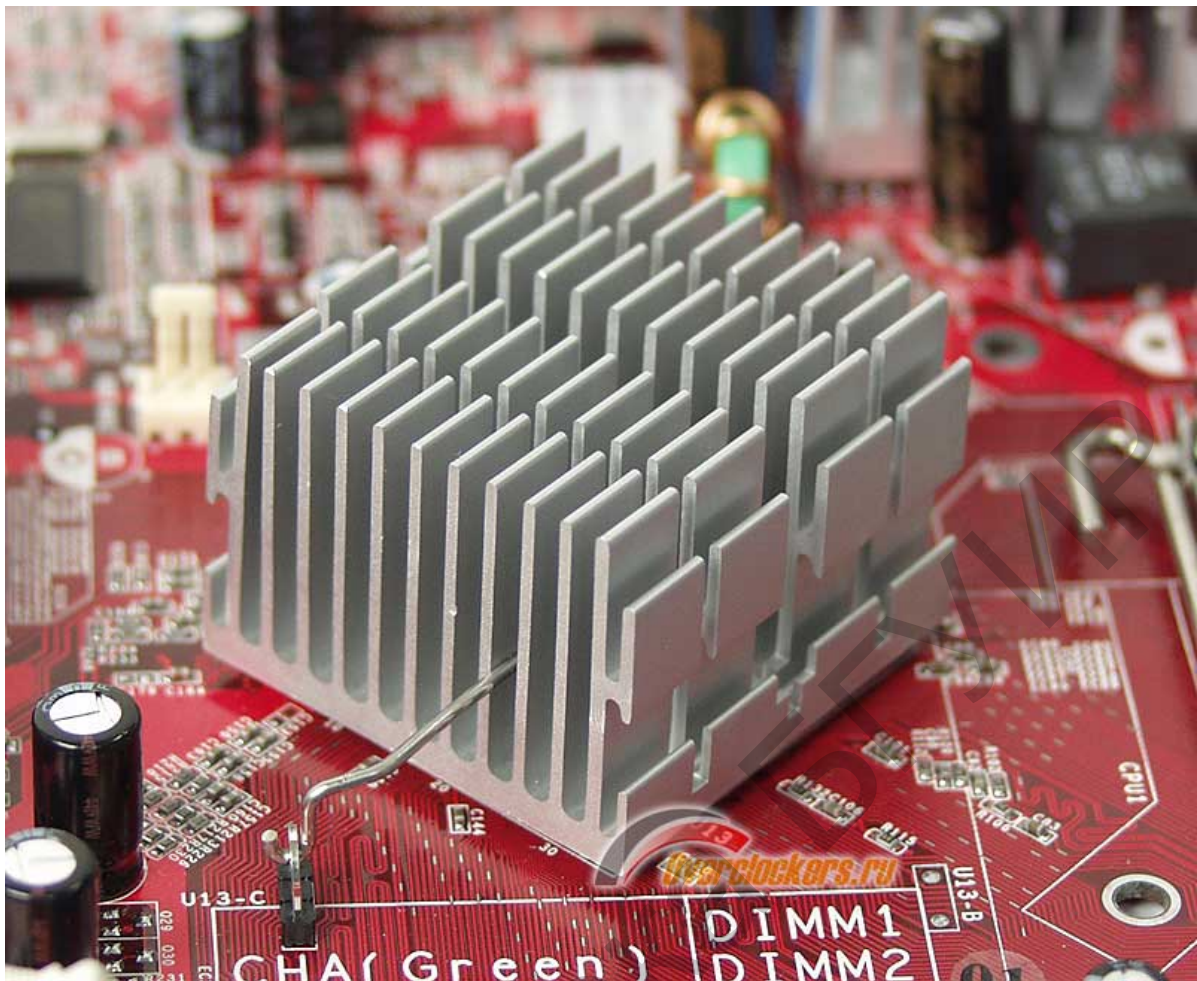


Рис. 2. Радиатор, установленный на материнскую плату



Рис. 3. Радиатор типа «краб»

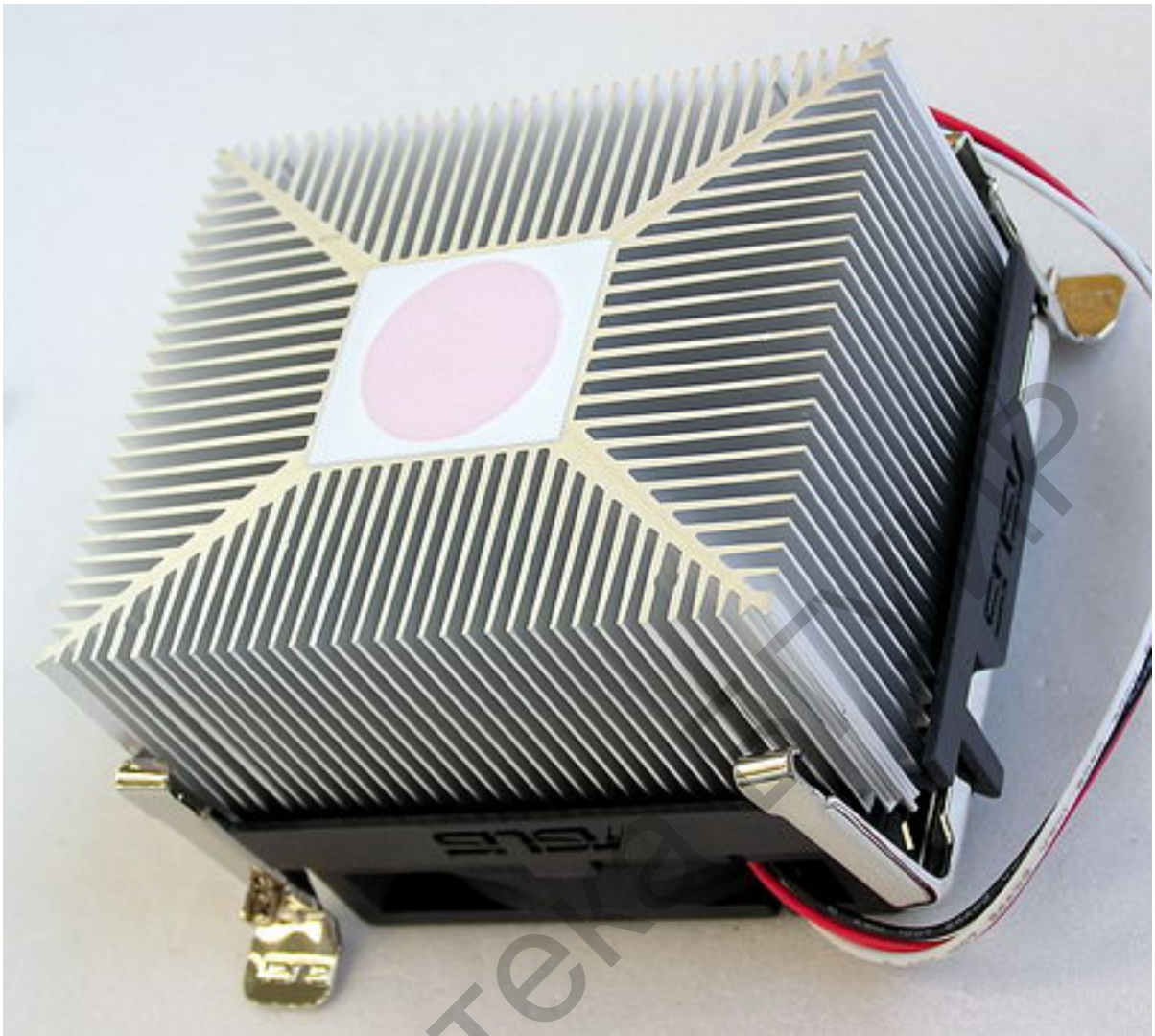


Рис. 4. Ребристый радиатор, установленный на кулер для лучшего отвода тепла

Существуют два способа расчёта теплового режима полупроводникового прибора с теплоотводом:

– при заданных значениях мощности P , рассеиваемой полупроводниковым прибором, температуре корпуса прибора или температуре $p-n$ -перехода и температуре окружающей среды $T_{o.c}$ рассчитывают геометрические размеры теплоотвода;

– при заданных геометрических размерах теплоотвода, температуре окружающей среды $T_{o.c}$, температуре $p-n$ -перехода или температуре корпуса прибора рассчитывают мощность, рассеиваемую полупроводниковым прибором с теплоотводом (поверочный расчёт).

В подразд. 2.2 рассматривается первый способ расчёта теплового режима полупроводникового прибора с теплоотводом, который встречается чаще.

2.2. Расчёт теплоотвода-пластины для естественного охлаждения

Расчёт теплоотвода-пластины состоит в определении его геометрических размеров при заданной мощности, рассеиваемой полупроводниковым прибором, и температуре окружающей среды.

Значения тепловых контактных сопротивлений для различных полупроводниковых приборов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения тепловых контактных сопротивлений для различных полупроводниковых приборов (без смазки и прокладки)

Тип полупроводникового прибора	Площадь контактной поверхности $S \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2$	Тепловое контактное сопротивление $R_{к-т}, \text{ }^\circ\text{С/Вт}$
Д815-Д817, КС620, КС630, КС650, КС680, КД202, 2В103, КВ103, 2С920, 2С930, 2С950, 2С980	1,13	1,95
КД203, Д302-Д305, Д235, Д214, Д215, Д231-Д234, Д242, Д243, Д245-Д248	3,4	0,65
КУ201, КУ202, КУ204, КУ208	3,4	0,65
КВ106	0,93	2,4
ГТ323	0,93	2
П605, П606, П607, П608, П609	1,96	1,2
П701	1,96	1,2
П302, П303, П304, П306	1,96	1,2
П213, П214, П215, П216, П217	1,96	1,2
ГТ701	4,52	0,5
П210А-П210В, П210Ш, Д238	4,52	0,5
ГТ905	1,96	1,2
П702, КТ903, КТ902, КТ805, КТ802, КТ803, ГТ806, ГТ703	4,52	0,5
КТ345, КТ337, КТ349, КТ347, КТ351, КТ352, КТ350, КТ201, КТ342, КТ316, КП301, КТ343, ГТ328	–	18
КП302	–	8
КТ606, КТ904, КТ907	1,05	2,1
ГТ703	3,14	0,7

На рис. 5 приведена номограмма для выбора теплоотвода-пластины для условий естественного охлаждения при нормальном давлении. Для выбора теплоотвода необходимо определить:

- среднюю поверхностную температуру теплоотвода $T_{\text{ср}}$;
- перепад температур ΔT между средней поверхностной температурой теплоотвода и температурой окружающей среды;
- площадь теплоотвода-пластины по графику на рис. 5, зная мощность P , рассеиваемую прибором, и перепад температур ΔT ;
- геометрические размеры теплоотвода.

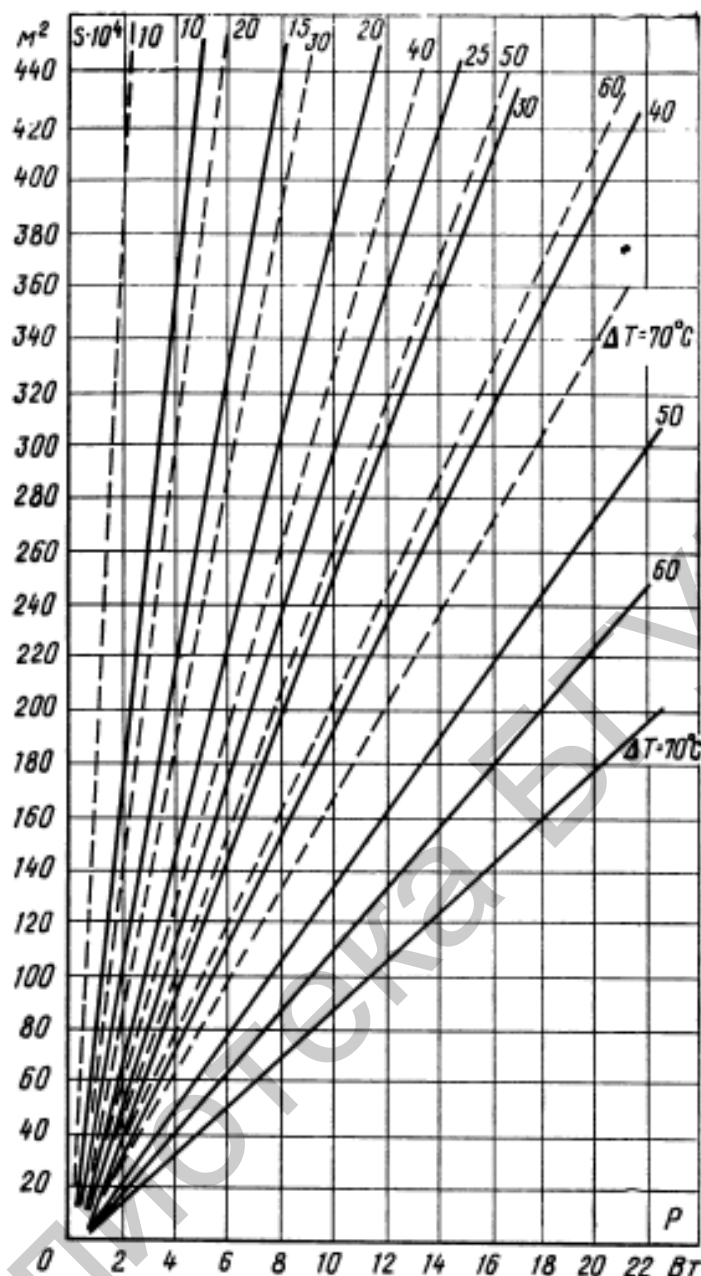


Рис. 5. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции воздуха в неограниченном объёме в режиме «закон 1/4»

Далее приведён порядок конструктивного расчёта теплоотвода-пластины при естественном охлаждении:

1. Задаётся мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором, P , Вт.
2. Задаётся температура окружающей среды, $T_{o.c.}$, °С.
3. Выбирается из справочника максимальная температура перехода, $T_{п.}$, °С.
4. Выбирается из справочника тепловое сопротивление переход – корпус, $R_{п-к}$, °С/Вт.

5. Выбирается из справочника или из табл. 1 тепловое контактное сопротивление (корпус полупроводникового прибора – теплоотвод), $R_{к-т}$, °С. Обычно оно определяется экспериментально.

6. Рассчитывается средняя поверхностная температура теплоотвода, T_{cp} , °C:

$$T_{cp} = q[T_{п} - P(R_{п-к} + R_{к-т})],$$

где q – определяется экспериментально; для естественной конвекции $q = 0,96$.

7. Рассчитывается перепад между средней поверхностной температурой теплоотвода и окружающей средой, ΔT , °C:

$$\Delta T = T_{cp} - T_{o.c.}$$

8. Задаётся высота пластины (при вертикальном положении теплоотвода), L , м.

9. Рассчитывается коэффициент теплоотдачи конвекцией, α_k , Вт/(м²·°C):

$$\alpha_k = A_1(T_m) \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{\frac{1}{4}},$$

где A_1 – определится по графику на рис. 6;

T_m – тепловой коэффициент, °C, рассчитывается по формуле

$$T_m = 0,5(T_{cp} + T_{o.c.}).$$

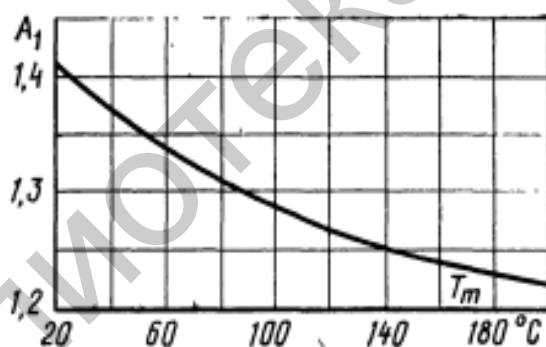


Рис. 6. График зависимости коэффициента A_1 от температуры

10. Рассчитывается коэффициент отдачи излучением, $\alpha_{л}$, Вт/(м²·°C):

$$\alpha_{л} = \varepsilon \varphi f(T_{cp}, T_{o.c.}),$$

где ε – степень черноты тела; выбирается из табл. 1.1;

$f(T_{cp}, T_{o.c.})$ – определяется по графику на рис. 7;

φ – коэффициент облучённости; для гладкой поверхности $\varphi = 1$.

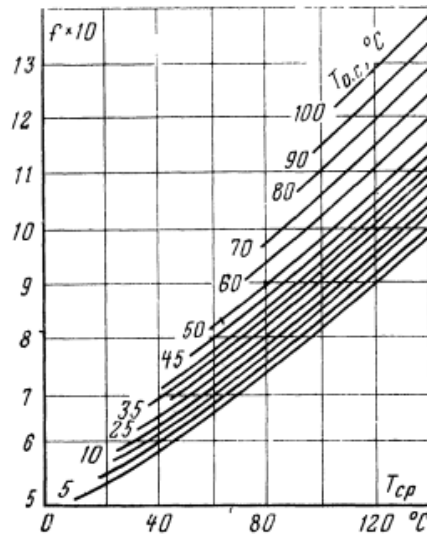


Рис. 7. График зависимости коэффициента f от температуры излучающей поверхности тепловода T_{cp} при заданной температуре окружающей среды T_{oc}

11. Рассчитывается коэффициент теплоотдачи, α , Вт/(м²·°C):

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{л.}$$

12. Рассчитывается площадь теплообменной поверхности, F , м²:

$$F = \frac{P}{\alpha \Delta T} = 2L(l + \delta) + 2l\delta.$$

13. Выбирается толщина пластины, δ , м. Рекомендуется выбирать $\delta = (3...5) \cdot 10^{-3}$ м.

14. Рассчитывается длина пластины, l , м:

$$l = \frac{F - 2L\delta}{2(L + \delta)}.$$

Теплоотвод-пластину рекомендуется применять при небольших значениях рассеиваемой мощности (до 5 Вт).

2.3. Расчёт ребристого тепловода для естественного охлаждения

Расчёт ребристого тепловода для естественного охлаждения состоит в определении теплового сопротивления тепловода и мощности, которую может рассеять тепловод с заданными геометрическими размерами (рис. 8).

Внешний вид ребристых радиаторов приведён на рис. 9–11.

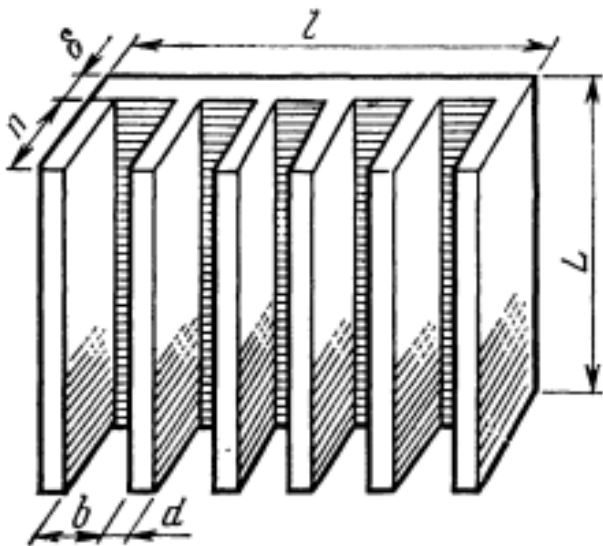


Рис. 8. Конструкция односторонне ребристого тепловода



Рис. 9. Односторонний ребристый радиатор

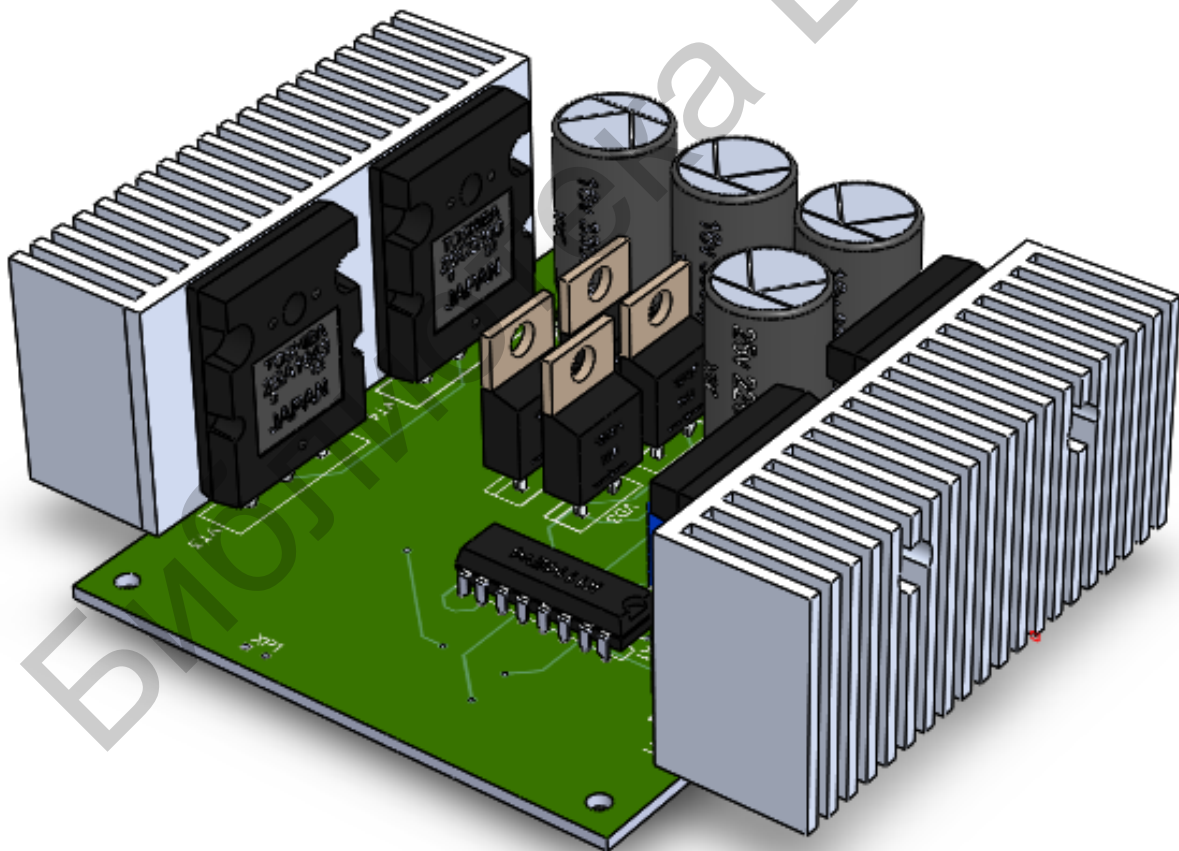


Рис. 10. Односторонние ребристые радиаторы, установленные на мощные транзисторы

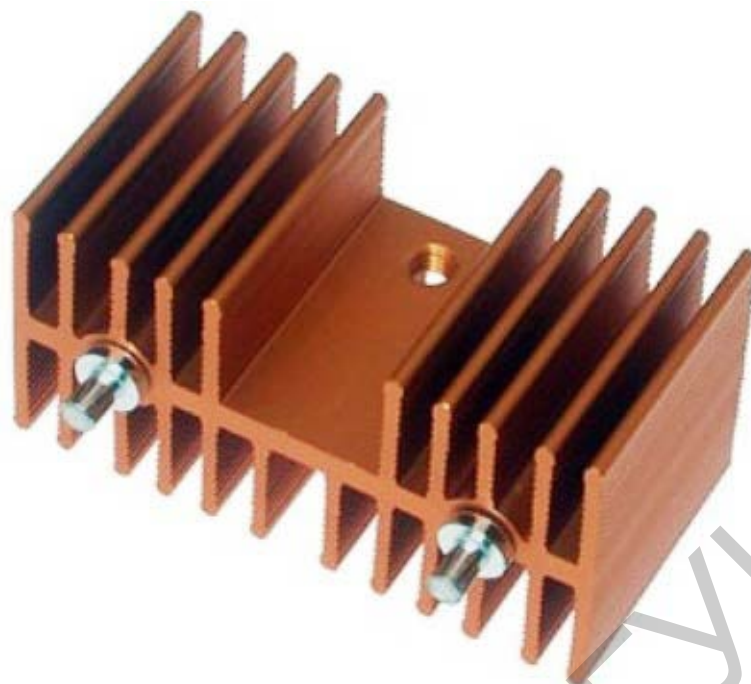


Рис. 11. Двусторонний ребристый радиатор для установки на мощный транзистор

2.4. Порядок расчёта ребристого радиатора при естественном воздушном охлаждении

Порядок поверочного расчёта ребристого теплоотвода для принудительного воздушного охлаждения ведётся по следующему алгоритму:

1. Задаётся мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором (ППП), P , Вт.

2. Задаётся температура окружающей среды, $T_{о.с}$, °С.

3. Выбирается из справочника максимальная температура перехода, $T_{п}$, °С.

4. Выбирается из справочника тепловое сопротивление переход – корпус, $R_{п-к}$, °С/Вт.

5. Выбирается из справочника тепловое контактное сопротивление корпус – теплоотвод, $R_{к-т}$, °С/Вт.

6. Определяется тепловое сопротивление радиатора, $R_{т-с.исх.д}$, °С/Вт:

$$R_{т-с.исх.д} = 0,96 \frac{(T_{п} - T_{о.с}) - P(R_{к-т} + R_{п-к})}{P}.$$

7. Определяется средняя поверхностная температура радиатора, $T_{ср}$, °С:

$$T_{ср} = PR_{т-с.исх.д} + T_{о.с}.$$

8. Определяется по графику (рис. 12) минимальная протяжённость ребра, L_{min} , м.

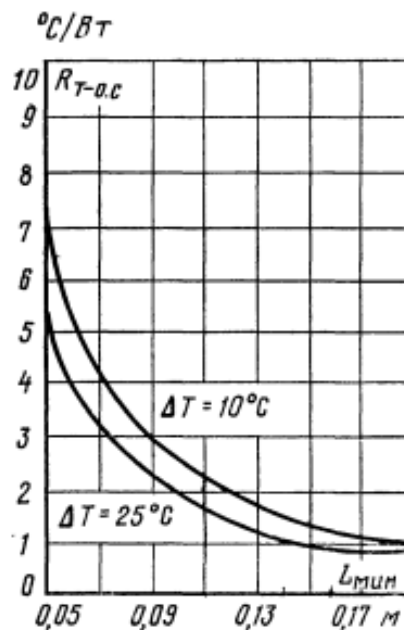


Рис. 12. График зависимости теплового сопротивления теплоотвода от минимальной протяженности ребра L_{\min} и разности температур $\Delta T = T_{\text{ср}} - T_{\text{o.c}}$

9. Выбирается толщина ребра, d , м. Рекомендуется выбирать $d = (2...3) \cdot 10^{-3}$ м.

10. Выбирается толщина плиты теплоотвода, δ , м. Рекомендуется выбирать $\delta = (3...5) \cdot 10^{-3}$ м.

11. Выбирается расстояние между рёбрами b , м. Рекомендуется выбирать $b = (8...12) \cdot 10^{-3}$ м.

12. Выбирается высота ребра h , м. Рекомендуется выбирать $h = (8...85) \cdot 10^{-3}$ м.

13. Выбирается протяжённость ребра L , м. Рекомендуется выбирать $L \geq L_{\min}$.

14. Определяется число рёбер, n , шт.:

$$n = \frac{l + b}{b + d} + 1.$$

Рекомендуется выбирать на одно ребро больше расчётного.

15. Определяется длина плиты радиатора, l , м:

$$l = b(n - 1) + 2d.$$

16. Определяется площадь гладкой (неоребрённой) поверхности радиатора, $S_{\text{гл}}$, м^2 :

$$S_{\text{гл}} = Ll.$$

17. Определяется площадь оребрённой поверхности односторонне ребристого радиатора при креплении ППП с гладкой стороны, $S_{\text{оп1}}$, м²:

$$S_{\text{оп}} = S_1 + S_2 + S_3;$$

$$S_1 = (n-1)Lb;$$

$$S_2 = (\delta + 2h)Ln + 2l\delta;$$

$$S_3 = 2n\delta h.$$

18. Определяется площадь полной поверхности двусторонне ребристого радиатора при креплении ППП с оребрённой стороны:

$$S_{\text{оп}}^* = 2(Lhn_1 + (l_1 + l_2)Ln_{l_1+l_2} + Ll + \delta hn_{l_2} + 2h\delta n_{l_1+l_2}).$$

19. Определяется коэффициент теплоотдачи конвекцией для гладкой поверхности радиатора, $\alpha_{\text{к.гл}}$, Вт/(м²·град):

$$\alpha_{\text{к.гл}} = A_1 T_M \left(\frac{T_{\text{ср}} - T_{\text{о.с}}}{L} \right)^{\frac{1}{4}};$$

$$T_M = 0,5(T_{\text{ср}} + T_{\text{о.с}}).$$

20. Определяется коэффициент теплоотдачи излучением для гладкой поверхности радиатора $\alpha_{\text{л.гл}}$, Вт/(м²·град):

$$\alpha_{\text{л.гл}} = \varepsilon \rho f(T_{\text{ср}} \cdot T_{\text{о.с}}),$$

где ε – степень черноты тела; выбирается из табл. П.1.1;

$f(T_{\text{ср}}, T_{\text{о.с}})$ – определяется по графику на рис. 7.

21. Определяется коэффициент теплоотдачи гладкой поверхности радиатора, $\alpha_{\text{гл}}$, Вт/(м²·град):

$$\alpha_{\text{гл}} = \alpha_{\text{к.гл}} + \alpha_{\text{л.гл}}.$$

22. Определяется мощность, рассеиваемая гладкой поверхностью радиатора, $P_{\text{гл}}$, Вт:

$$P_{\text{гл}} = \alpha_{\text{гл}} S_{\text{гл}} (T_{\text{ср}} - T_{\text{о.с}}).$$

23. Определяется тепловое сопротивление гладкой поверхности радиатора, $R_{т.гл}$, град/Вт:

$$P_{т.гл} = \frac{1}{\alpha_{гл} S_{гл}}.$$

24. Определяются коэффициенты для нахождения относительного температурного напора:

$$C = \frac{K}{M};$$

$$\eta = A_2(T_m) b C,$$

где A_2 – определяется по графику на рис. 13;

$K = \nabla t^{\frac{1}{4}}$ – определяется по графику на рис. 14;

M – определяется по графику на рис. 15.

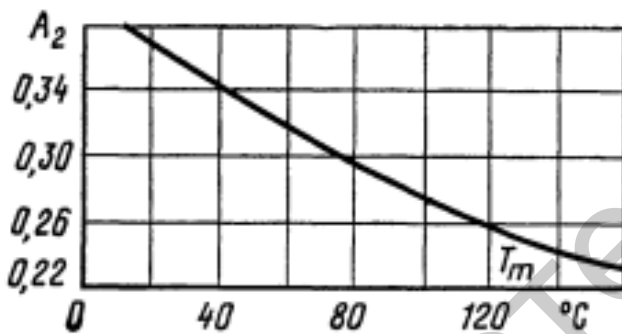


Рис. 13. График зависимости коэффициента A_2 от температуры

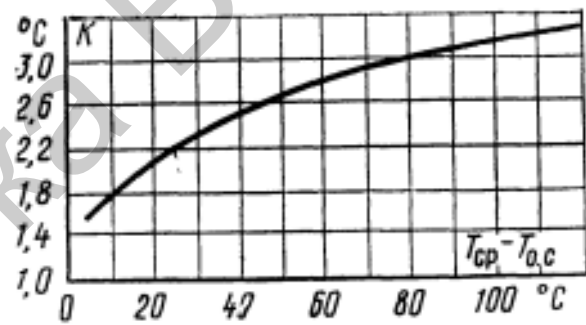


Рис. 14. График зависимости коэффициента K от разности температур $\Delta T = T_{cp} - T_{o.c}$

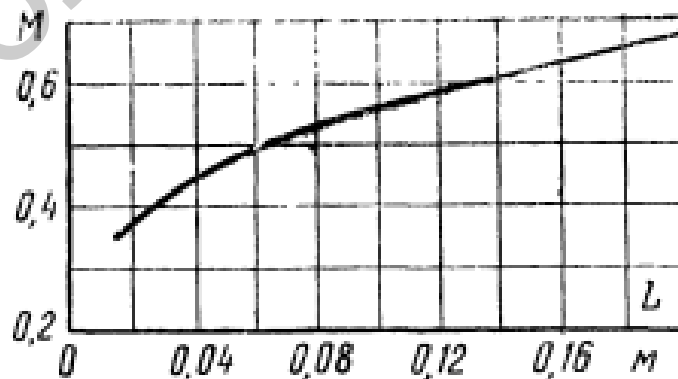


Рис. 15. График зависимости коэффициента M от протяженности ребра L

25. Определяется относительный температурный напор, H . $H = f(\eta)$ определяется по графику на рис. 16.

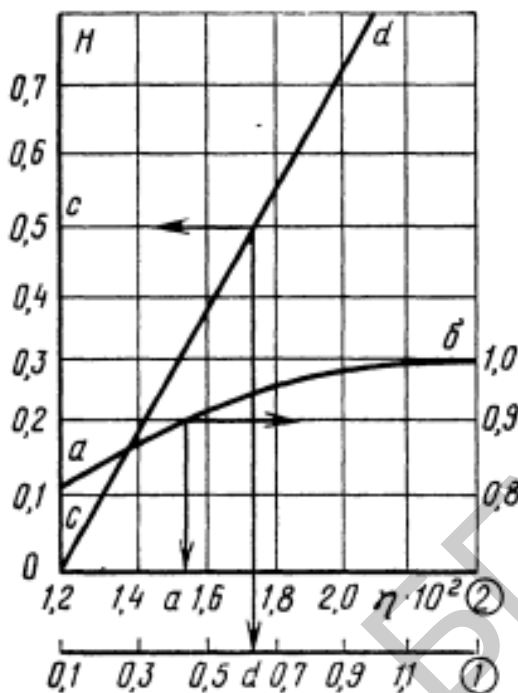


Рис. 16. График зависимости относительного температурного напора H от коэффициента η

26. Определяется температура окружающей среды между рёбрами, $T'_{o.c}$, °C:

$$T'_{o.c} = T_{cp} - H(T_{cp} - T_{o.c}).$$

27. Определяется коэффициент для нахождения конвективного коэффициента теплоотдачи оребрённой поверхности радиатора:

$$T'_T = 0,5(T_{cp} - T'_{o.c}).$$

28. Определяется конвективный коэффициент теплоотдачи для оребрённой поверхности радиатора, $\alpha_{к.ор}$, Вт/(м²·град):

$$\alpha_{к.ор} = A_1(T_m)C',$$

где A_1 определяется по графику на рис. 6;

$K' = (T_{cp} - T_{o.c})^{\frac{1}{4}}$ определяется по графику на рис. 14;

$$C' = \frac{K'}{M}.$$

29. Определяется коэффициент теплоотдачи излучением для оребрѐнной поверхности радиатора, $\alpha_{л.ор}$, Вт/(м²·град):

$$\alpha_{л.ор} = A_1(T_m)C',$$

где $\varphi = \frac{b}{2h+b}$ – определяется по графику на рис. 17;

$f(T_{ср}, T_{о.с})$ – определяется по графику на рис. 7.

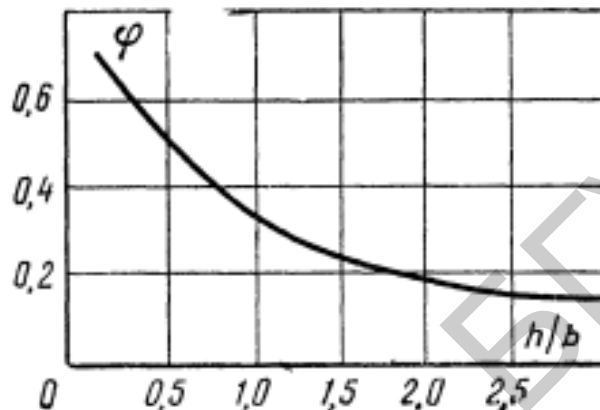


Рис. 17. График зависимости коэффициента облученности рѐбер φ от отношения высоты h к расстоянию между ними b

30. Определяется мощность, рассеиваемая оребрѐнной поверхностью радиатора, $P_{т.ор}$, Вт:

$$P_{т.ор} = [\alpha_{к.ор}(T_{ср} - T_{о.с}) + \alpha_{л.ор}(T_{ср} - T_{о.р})]S_{ор}.$$

31. Определяется тепловое сопротивление оребрѐнной поверхности радиатора, $R_{т.ор}$, град/Вт:

$$R_{т.ор} = \frac{T_{ср} - T_{о.с}}{P_{т.ор}}.$$

32. Определяется общее расчѐтное тепловое сопротивление радиатора, $R_{т.расч}$, град/Вт:

$$R_{т.расч} = \frac{R_{т.гл}R_{т.ор}}{R_{т.гл} + R_{т.ор}}.$$

33. Определяется мощность, рассеиваемая радиатором, $P_{т}$, Вт:

$$P_{т} = P_{т.ор} + P_{т.гл}.$$

34. Выполняется проверка правильности расчёта. Должны соблюдаться следующие условия:

$$P_{\text{т.расч}} \leq P_{\text{т.исх.д}};$$

$$P_{\text{т}} \geq P.$$

35. В противном случае расчёт необходимо провести заново, выбрав другие геометрические размеры радиатора в сторону их увеличения.

2.5. Порядок расчёта штыревого радиатора при естественном охлаждении

Для определения геометрических размеров штыревого тепловода (рис. 18 и 19) необходимо знать теплоотдачу единичного штыря, имеющего заданные геометрические размеры (условно принято, что всё тепло, которое отводится от полупроводникового прибора, рассеивается по штырям. Фото штыревых радиаторов изображены на рис. 20–23.

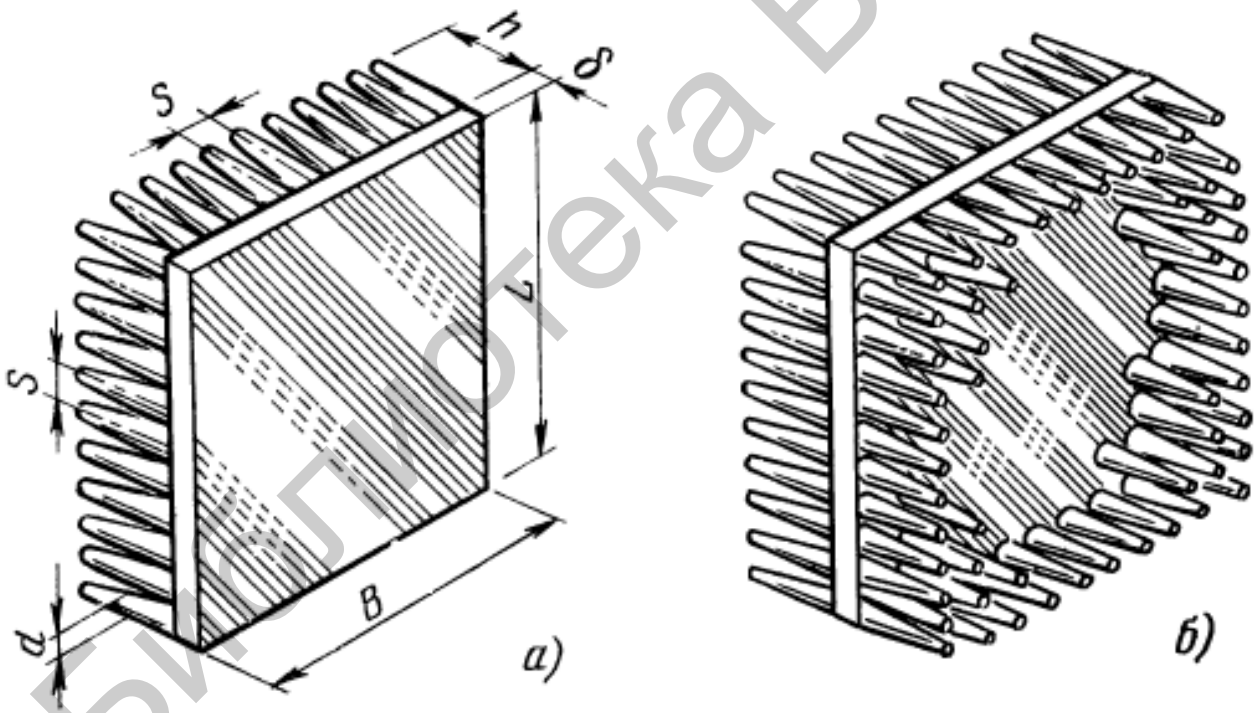


Рис. 18. Конструкции штыревых теплоотводов

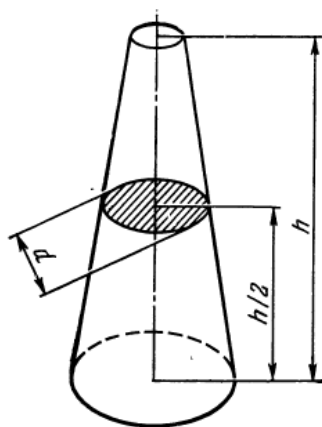


Рис. 19. Профиль штыря



Рис. 20. Штыревой радиатор



Рис. 21. Штыревой радиатор со штырями прямоугольного сечения

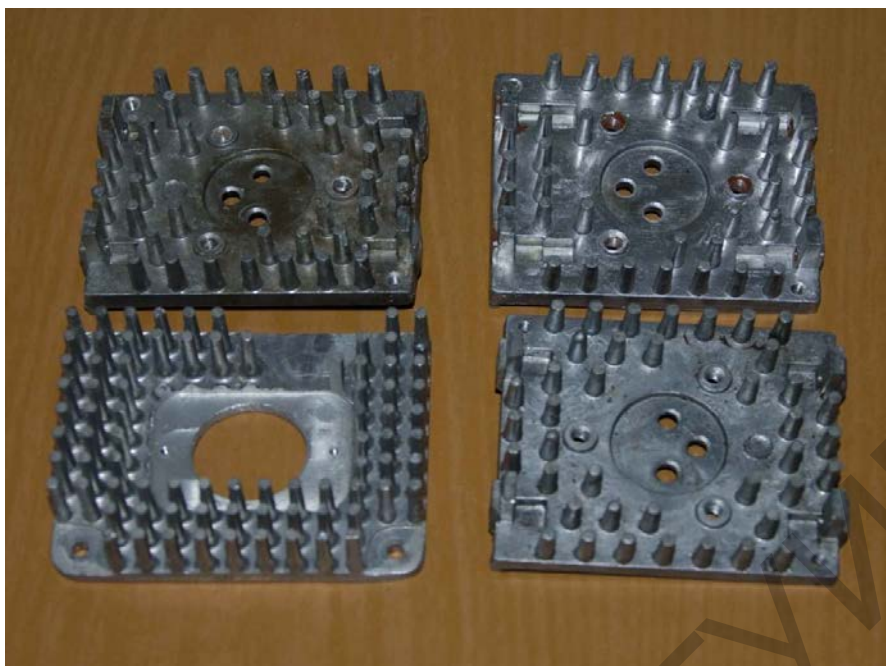


Рис. 22. Различные виды штыревых радиаторов для установки на мощные транзисторы

Порядок конструктивного расчёта штыревого теплоотвода для условий естественного охлаждения приведён ниже. Значения гиперболического тангенса определяются по графику на рис. 23.

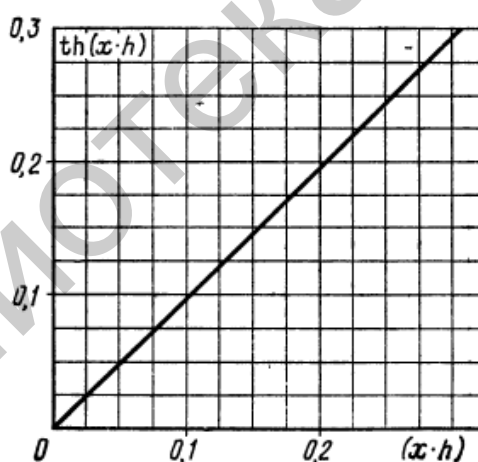


Рис. 23. Значение гиперболического тангенса

1. Задаётся мощность, рассеиваемая ППП, P , Вт.
2. Задаётся температура окружающей среды, $T_{о.с.}$, °С.
3. Выбирается из справочника максимальная температура перехода, $T_{п.}$, °С.
4. Выбирается из справочника тепловое сопротивление переход – корпус, $R_{п-к}$, °С/Вт.
5. Выбирается из справочника контактное сопротивление корпус – теплоотвод, $R_{к-т}$, °С/Вт.

6. Выбирается высота штыря, h , м. Рекомендуется выбирать $h = (15...30) \cdot 10^{-3}$ м.

7. Выбирается диаметр нижнего основания штыря, d_1 , м. Рекомендуется выбирать $d_1 = (2,5...3) \cdot 10^{-3}$ м.

8. Выбирается диаметр верхнего основания штыря, d_2 , м. Рекомендуется выбирать $d_2 = (1...1,5) \cdot 10^{-3}$ м.

9. Выбирается продольный или поперечный шаг, S , м. Рекомендуется выбирать $S = (5...7) \cdot 10^{-3}$ м.

10. Выбирается толщина теплоотводящей пластины, δ , м. Рекомендуется выбирать $\delta = (4...5) \cdot 10^{-3}$ м.

11. Определяется средняя поверхностная температура радиатора, T_{cp} , °C:

$$T_{cp} = 0,96 [T_{п} - P(R_{к-т} + R_{п-к})].$$

12. Рассчитывается температурный напор между основанием штыря и окружающей средой, θ , °C:

$$\theta = T_{cp} - \frac{T_1 - T_2}{2}.$$

13. Рассчитывается диаметр среднего сечения штыря, $d_{эКВ}$, м:

$$d_{эКВ} = \frac{d_1 + d_2}{2}.$$

14. Из табл. П.4.1 выбирается коэффициент кинематической вязкости воздуха, ν , м²/с.

15. Рассчитывается перепад между средней поверхностной температурой теплоотвода и окружающей средой, ΔT , °C:

$$\Delta T = T_{cp} - T_{о.с.}$$

16. Из табл. П.4.1 выбирается коэффициент теплопроводности воздуха, $\lambda_{в}$, Вт/(м·град).

17. Рассчитывается критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{g d_{эКВ}^3 \beta \Delta T}{\nu};$$

$$\beta = \frac{1}{273 + T_{о.с.}}$$

18. Рассчитывается критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,47(Gr)^{\frac{1}{4}}$$

19. Рассчитывается коэффициент теплоотдачи, α , Вт/(м²·град):

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l.$$

Коэффициент теплоотдачи α_l входит в формулу для α только с учётом размещения полупроводникового прибора с теплоотводом в блоке РЭА. Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k рассчитывается по следующей формуле:

$$\alpha_k = \frac{Nu\lambda_{\text{в.}}}{d_{\text{ЭКВ}}}$$

20. Рассчитывается периметр поперечного сечения штыря (среднего по высоте), u , м:

$$u = \pi d_{\text{ЭКВ}}$$

21. Рассчитывается площадь поперечного сечения штыря, f , м²:

$$f = \frac{\pi d_{\text{ЭКВ}}^2}{4}$$

22. Выбирается из табл. П.3.1 коэффициент теплопроводности материала, λ_m , Вт/(м·К).

23. Рассчитывается безразмерный коэффициент, x :

$$x = \sqrt{\frac{4d_k}{\lambda_m d_{\text{ЭКВ}}}}$$

24. Рассчитывается теплоотдача единичного штыря, $P_{\text{шт.}}$, Вт:

$$P_{\text{шт.}} = K\theta th(xh)\sqrt{\alpha u f \lambda_m},$$

где $K = 1,14$; $th(xh)$ определяется по графику на рис. 23.

25. Определяется общее количество штырей радиатора, n :

$$n = \frac{P}{P_{\text{шт.}}} \cdot 0,6.$$

26. Рассчитывается площадь основания теплоотвода, S_T , м²:

$$S_T = S^2 n + S_{\text{пр}},$$

где $S_{\text{пр}}$ – площадь, занимаемая полупроводниковым прибором.

27. Рассчитывается площадь теплоотвода, S'_T , м².

Для одностороннего теплоотвода при расположении полупроводникового прибора на свободной от штырей стороны:

$$S'_T = S^2 n.$$

Для двустороннего теплоотвода:

$$S''_T = \frac{S_T}{2}.$$

2.6. Расчёт штыревого теплоотвода для принудительного воздушного охлаждения

Расчёт штыревого теплоотвода для принудительного воздушного охлаждения ведётся по порядку расчёта из п. 2.5 (за исключением формул, определяющих конвективный коэффициент теплоотдачи α_k).

Для условий принудительного воздушного охлаждения конвективный коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$\alpha_k = A_3 \frac{v^{0,58}}{D_{\text{усл}}^{0,42}},$$

где A_3 – коэффициент, учитывающий свойства окружающей среды, определяется по графику $A_3 = f(T_T)$ на рис. 24; $T_T = 0,5(T_1 + T_2)$; v – скорость набегающего потока воздуха; $D_{\text{усл}}$ – условный диаметр:

$$D_{\text{усл}} = \frac{\text{Периметр поперечного сечения штыря}}{\pi}.$$

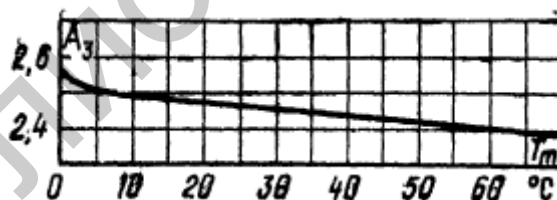


Рис. 24. График зависимости $A_3 = f(T_T)$

2.7. Графоаналитический метод подбора штыревых теплоотводов для естественного и принудительного воздушного охлаждения

Подбор теплоотвода заключается в определении его геометрических размеров, обеспечивающих заданную температуру перехода или корпуса полупроводникового прибора, при известной температуре окружающей среды и заданной рассеиваемой мощности.

На рис. 25–28 приведены графики подбора штыревых теплоотводов для условий естественного и принудительного охлаждения (скорости набегающего потока 1, 2 и 4 м/с) при нормальном давлении.

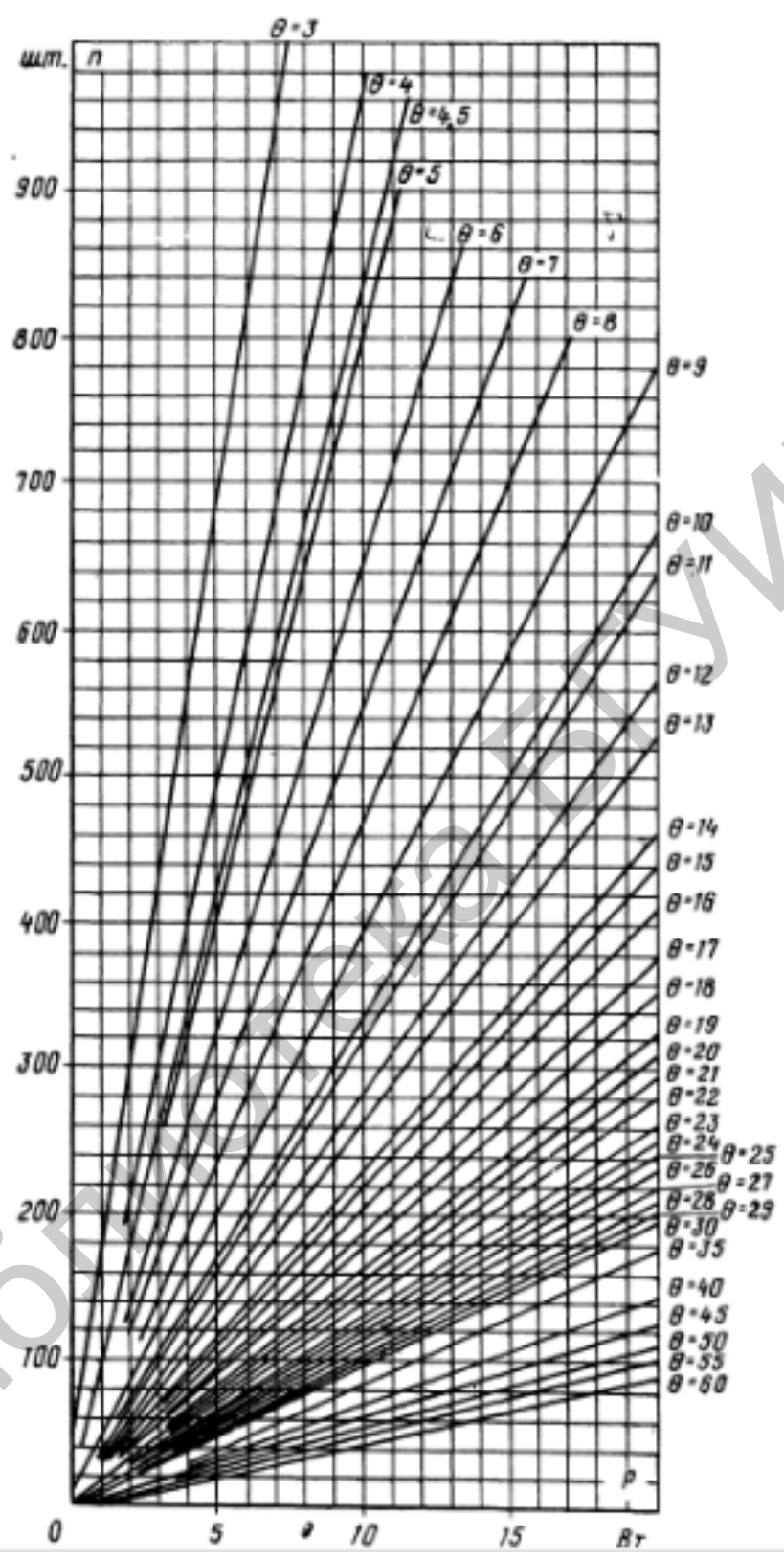


Рис. 25. График зависимости $n = f(P)$ при $v = 0$ м/с

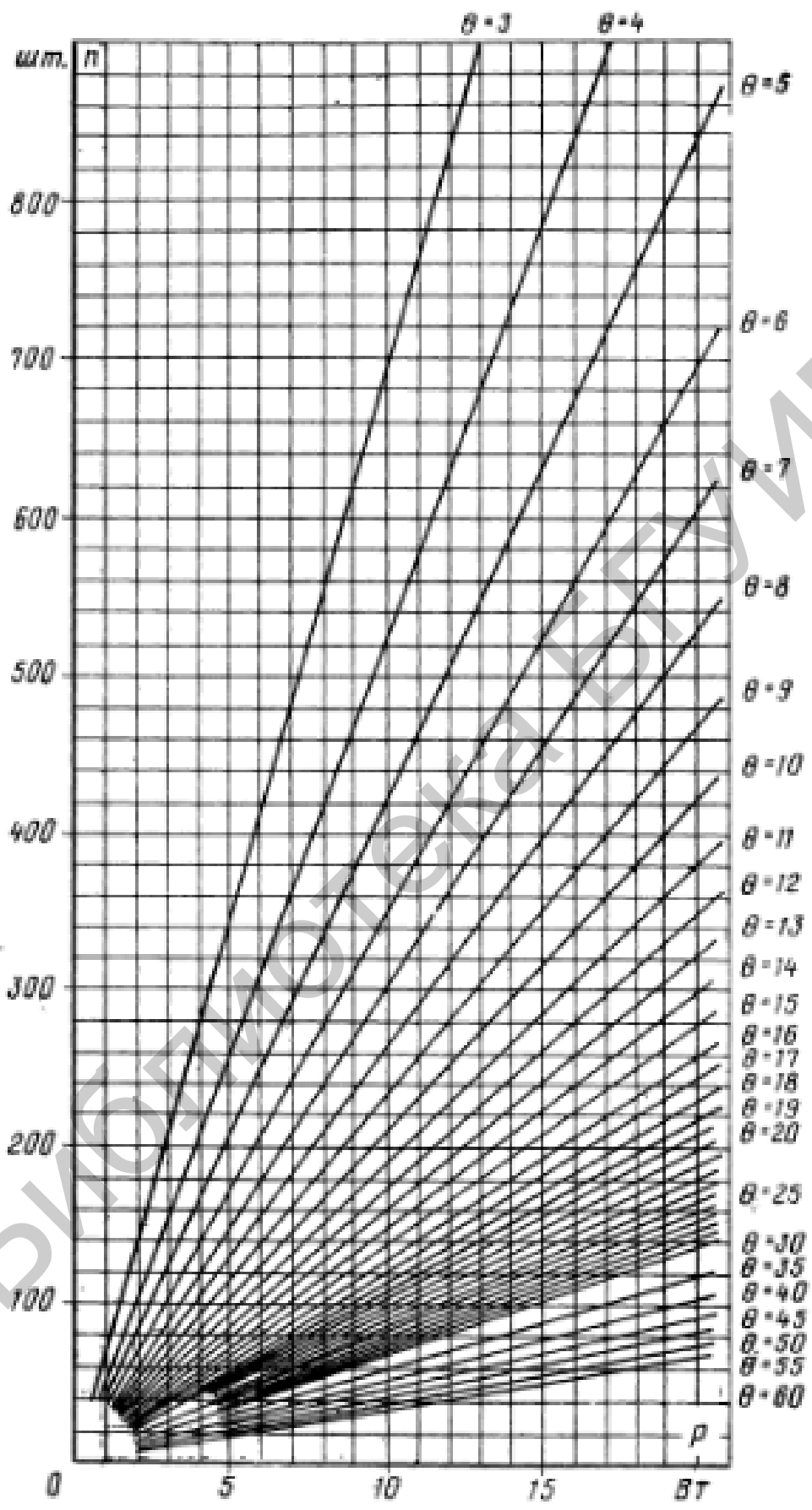


Рис. 26. График зависимости $n = f(P)$ при $v = 1$ м/с

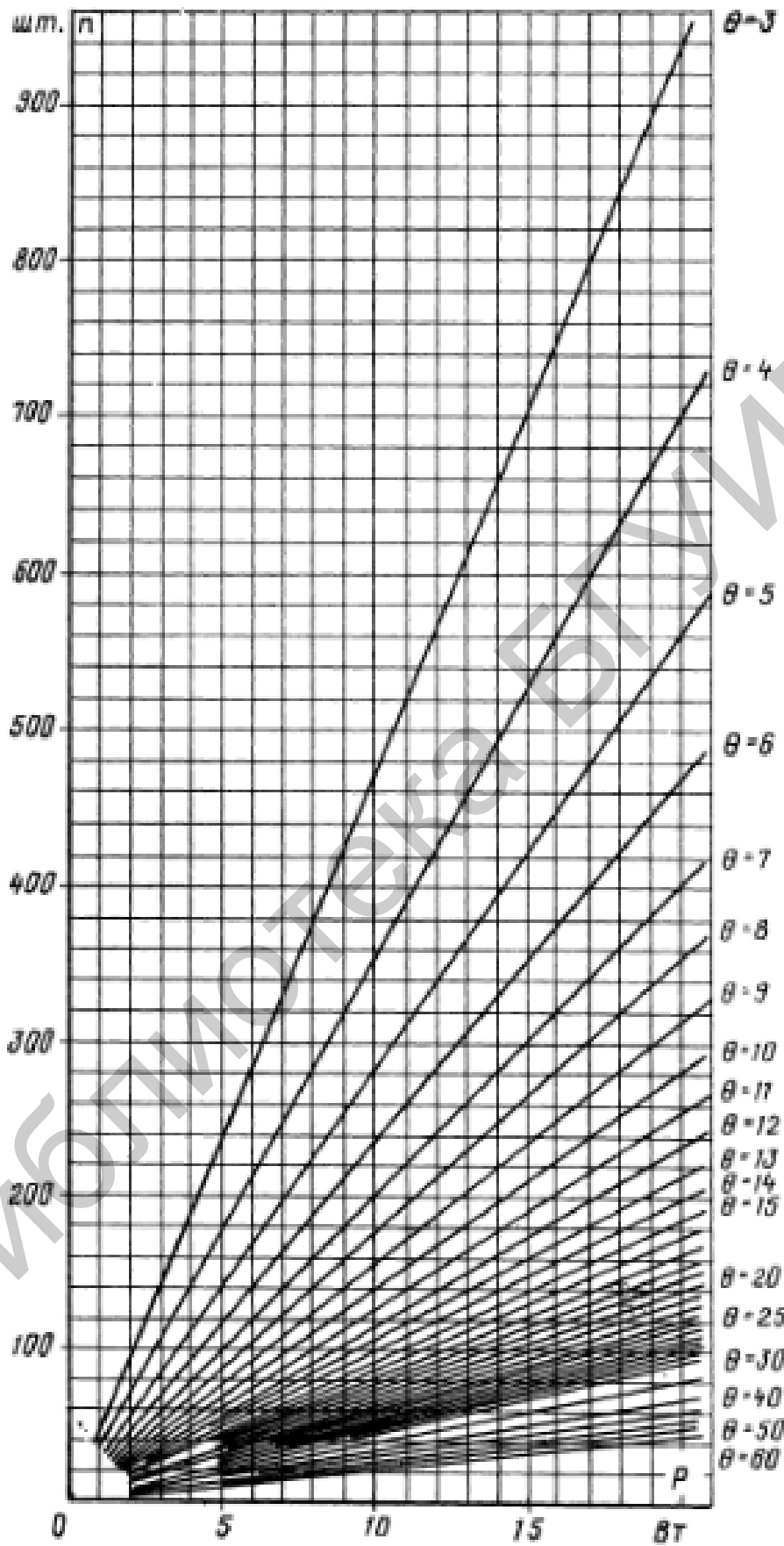


Рис. 27. График зависимости $n = f(P)$ при $v = 2$ м/с

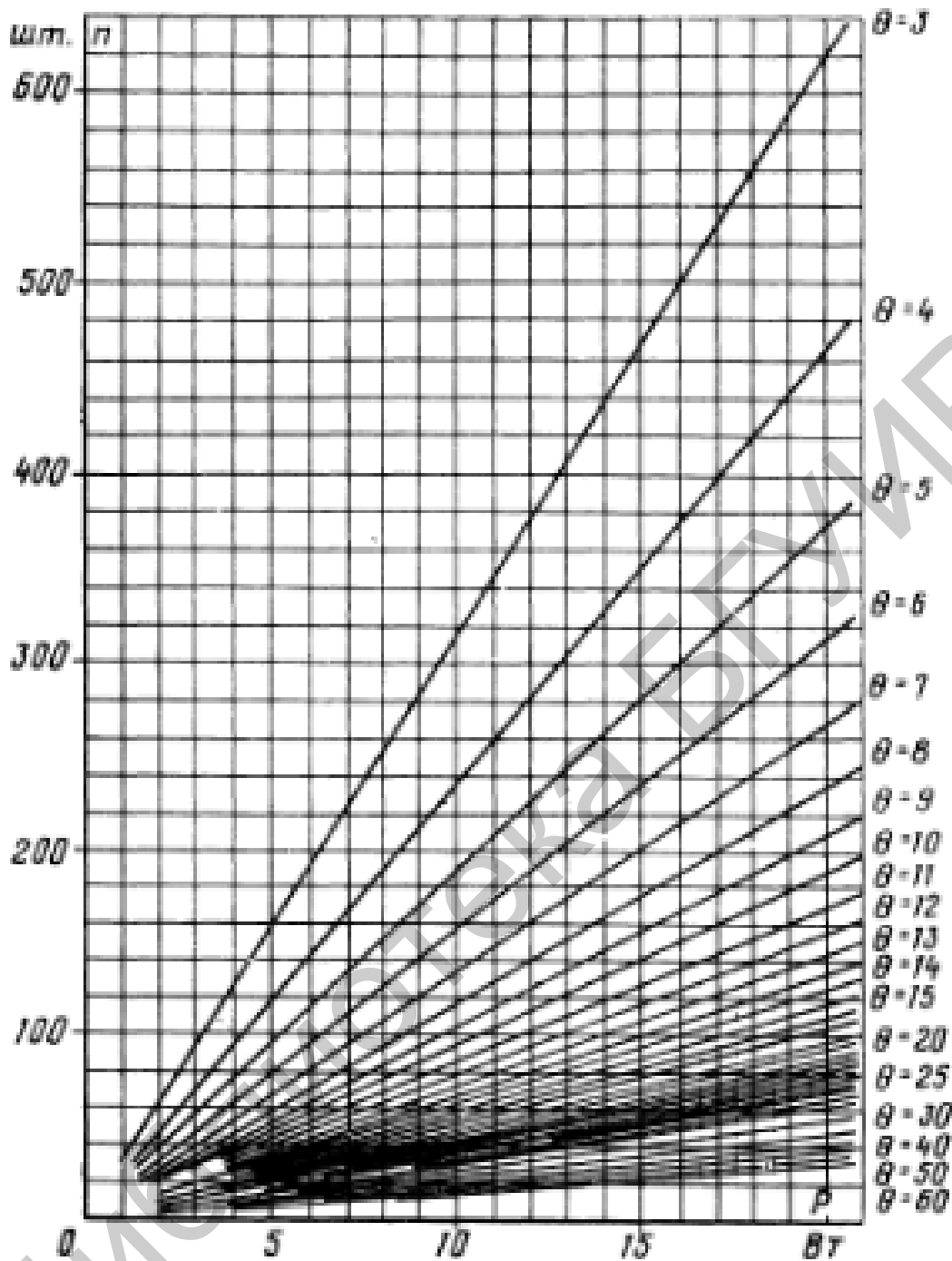


Рис. 28. График зависимости $n = f(P)$ при $v = 4$ м/с

Геометрические размеры штыря: высота $15 \cdot 10^{-8}$ м; диаметр нижнего основания $2,5 \cdot 10^{-3}$ м; диаметр верхнего основания $1,5 \cdot 10^{-3}$ м; шаг штырей – продольный и поперечный $S = 7 \cdot 10^{-3}$ м.

Для подбора штыревого теплоотвода необходимо определить:

- среднюю поверхностную температуру T_{cp} (см. п. 2.5);
- температурный напор θ между основанием штыря и окружающей средой (см. п. 2.5);

- количество штырей теплоотвода по графикам на рис. 25–28, зная мощность P , рассеиваемую полупроводниковыми приборами, температурный напор θ и скорость v ;
- площадь основания теплоотвода (см. п. 2.5).

2.8. Порядок расчёта термоэлектрических батарей для охлаждения полупроводниковых приборов

В основе расчёта термоэлектрических батарей лежит уравнение теплового баланса холодного спая термоэлемента:

$$\chi IT_x = 0,5I^2R - k\Delta T - Q_0 = 0,$$

где χ – коэффициент термоЭДС термоэлемента;

R – сопротивление термоэлемента;

I – рабочий ток питания;

T_x – температура холодного спая;

k – теплопроводность термоэлемента;

ΔT – перепад температур, обеспечиваемый термоэлементами: $\Delta T = T_r - T_x$;

T_r – температура горячего спая;

Q – холодопроизводительность термоэлемента.

Термоэлемент имеет два граничных режима работы: максимального холодильного эффекта ϵ_{\max} и максимальной холодопроизводительности Q_{\max} .

Порядок конструктивного расчёта термоэлектрических батарей в режиме максимального холодильного коэффициента ϵ_{\max} :

1. Задаётся мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором, P , Вт.
2. Задаётся температура окружающей среды, $T_{o.c.}$, °С.
3. Задаётся перепад температур окружающей среда – корпус, ΔT , °С.
4. Задаётся разность температур между основанием вывода и окружающей средой, $\Delta T'$, °С.
5. Рассчитывается коэффициент теплоотдачи конвекцией, α_k , Вт/(м²·°С):

$$\alpha_k = 1,16 \left(17,5 + \frac{0,011}{d} \right),$$

где d – диаметр выводов ($d = 2 \cdot 10^{-3}$ м).

6. Задаётся коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м²·°С).

7. Рассчитывается поперечное сечение выводов, f , м²:

$$f = \frac{\pi d^2}{4}.$$

8. Определяется периметр выводов, u , м:

$$u = \pi d.$$

9. Рассчитывается значение теплового потока по токовым выводам для трёхкаскадной термобатареи, Q_1 , Вт:

$$Q_1 = 3\Delta T' \sqrt{\alpha_k \lambda f u}.$$

10. Задаётся коэффициент теплоотдачи конвекцией, α_k , Вт/(м²·°С).

11. Рассчитывается площадь теплопередающей поверхности, F , м²:

$$F = F_{\text{бок}} + F_{\text{св}},$$

где $F_{\text{бок}}$ и $F_{\text{св}}$ выбираются исходя из геометрических размеров термоэлемента.

12. Определяется теплоприток из окружающей среды, Q_2 , Вт:

$$Q_2 = \alpha F \Delta T.$$

13. Определяется холодопроизводительность термобатареи, Q_0 , Вт:

$$Q_0 = P + Q_1 + Q_2.$$

14. Рассчитывается температура горячих спаев, T_r , К:

$$T_r = T_{\text{о.с}} + \Delta T_{\text{п}} + \Delta T_{\text{т}} + 273,$$

где $\Delta T_{\text{п}}$ – паразитный перепад температуры на «пирожках»;

$\Delta T_{\text{т}}$ – перепад температуры по длине теплоотвода.

15. Определяется площадь теплоотдающей поверхности контакта, F_k , м²:

$$F_k = \frac{\pi d_k^2}{y},$$

где d_k – диаметр контакта ($d_k = 17 \cdot 10^{-8}$ м, k – поверхность контакта).

16. Задаётся коэффициент контактной теплопередачи при контакте металлов в воздушной среде, α' , Вт/(м²·°С).

17. Рассчитывается температурный скачок в зоне контакта, ΔT_k , °С:

$$\Delta T_k = \frac{P}{\alpha' F_k}.$$

18. Рассчитывается температура на холодных спаях, T_x , К:

$$T_x = T_{\text{о.с}} - \Delta T - \Delta T_{\text{п}} - \Delta T_k + 273.$$

19. Определяется требуемый перепад температур на термобатарее, ΔT , К:

$$\Delta T = T_r - T_x .$$

20. Задаётся сечение полупроводникового элемента, S , м².

21. Задаётся высота полупроводникового элемента, l , м.

22. Рассчитывается удельная электропроводность элемента с учётом потерь на контактных сопротивлениях, σ' , 1/(Ом·м):

$$\sigma' = \sigma \cdot 0,85 ,$$

где σ – удельная электропроводность элемента.

Потери на контактных сопротивлениях составляют 15 %, отсюда и получается коэффициент, равный 0,85.

23. Определяется сопротивление одного термоэлемента, R , Ом:

$$R = 2 \frac{l}{\sigma' S} .$$

24. Задаётся коэффициент термоЭДС, χ , В/°С.

25. Задаётся коэффициент теплопроводности полупроводникового элемента, λ , Вт/(м·°С).

26. Рассчитывается теплопроводность одного термоэлемента, K , Вт/°С:

$$K = \frac{2\lambda S}{l} .$$

27. Определяется эффективность термоэлемента, Z , 1/°С:

$$Z = \frac{\chi^2 \sigma}{4\lambda} .$$

28. Рассчитывается рабочий ток, I , А:

$$I = \frac{\chi(T_r - T_x)}{R(M - 1)} .$$

где $M = \sqrt{1 + \frac{1}{2} Z (T_r - T_x)} = 1,24 ;$

R – сопротивление термоэлемента.

29. Рассчитывается холодопроизводительность одного термоэлемента, q , Вт:

$$q = \chi / T_x - 0,5 I^2 R - k \Delta T .$$

30. Определяется минимальное количество термоэлементов, n , шт.:

$$n = \frac{Q_0}{q}.$$

31. Рассчитывается напряжение на термоэлементе, U , В:

$$U = \frac{\chi(T_r - T_x)}{M - 1}.$$

32. Определяется напряжение на термобатарее, U_6 , В:

$$U_6 = Un.$$

33. Рассчитывается мощность, потребляемая термобатареей, P_6 , Вт:

$$P_6 = IU_6.$$

34. Рассчитывается холодильный коэффициент, ε :

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{P_6}.$$

Теплоотвод должен обеспечивать теплосъём $P_r = Q_0 + P_6 = 11,6$ Вт. Для отвода тепла может быть выбран односторонне или двусторонне оребренный теплоотвод; расчёт таких теплоотводов приведён в предыдущих пунктах.

Далее приведён порядок конструктивного расчёта термоэлектрических батарей в режиме максимальной холодопроизводительности Q_{\max} .

1. Задаётся мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором, P , Вт.
2. Задаётся температура окружающей среды, $T_{o,c}$, °С.
3. Задаётся перепад температур окружающей среда – корпус, ΔT , °С.
4. Задаётся разность температур между основанием вывода и окружающей средой, $\Delta T'$, °С.
5. Рассчитывается коэффициент теплоотдачи конвекцией, α_k , Вт/(м²·°С):

$$\alpha_k = 1,16 \left(17,5 + \frac{0,011}{d} \right),$$

где d – диаметр выводов, $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

6. Задаётся коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м²·°С).
7. Рассчитывается поперечное сечение выводов, f , м²:

$$f = \frac{\pi d^2}{4}.$$

8. Определяется периметр выводов, u , м:

$$u = \pi d.$$

9. Рассчитывается значение теплового потока по токовым выводам для трёхкаскадной термобатареи, Q_1 , Вт:

$$Q_1 = 3\Delta T' \sqrt{\alpha_k \lambda f u}.$$

10. Задаётся коэффициент теплоотдачи, α , Вт/(м²·°С).

11. Рассчитывается площадь теплопередающей поверхности, F , м²:

$$F = F_{\text{бок}} + F_{\text{св}},$$

где $F_{\text{бок}}$ и $F_{\text{св}}$ выбираются исходя из геометрических размеров термоэлемента.

12. Определяется теплоприток из окружающей среды, Q_2 , Вт:

$$Q_2 = \alpha F \Delta T.$$

13. Определяется холодопроизводительность термобатареи, Q_0 , Вт:

$$Q_0 = P + Q_1 + Q_2.$$

14. Рассчитывается температура горячих спаев, T_r , К:

$$T_r = T_{\text{o.c}} + \Delta T_{\text{п}} + \Delta T_{\text{т}} + 273,$$

где $\Delta T_{\text{п}}$ – паразитный перепад температуры на «пирожках»;

$\Delta T_{\text{т}}$ – перепад температуры по длине теплопровода.

15. Определяется площадь теплоотдающей поверхности контакта, F_k , м²:

$$F_k = \frac{\pi d_k^2}{y},$$

где d_k – диаметр контакта ($d_k = 17 \cdot 10^{-8}$ м, k – поверхность контакта).

16. Задаётся коэффициент контактной теплопередачи при контакте металлов в воздушной среде, α' , Вт/(м²·°С).

17. Рассчитывается температурный скачок в зоне контакта, ΔT_k , °С:

$$\Delta T_k = \frac{P}{\alpha' F_k}.$$

18. Рассчитывается температура на холодных спаях, T_x , К:

$$T_x = T_{\text{o.c}} - \Delta T - \Delta T_k + 273.$$

19. Определяется требуемый перепад температур на термобатарее, ΔT , К:

$$\Delta T = T_r - T_x.$$

20. Задаётся сечение полупроводникового элемента, S , м².

21. Задаётся высота полупроводникового элемента, l , м.

22. Рассчитывается удельная электропроводность полупроводникового элемента с учётом потерь на контактных сопротивлениях, σ' , 1/(Ом·м):

$$\sigma' = \sigma \cdot 0,85,$$

где σ – удельная электропроводность элемента.

Потери на контактных сопротивлениях составляют 15 %, отсюда и получается коэффициент, равный 0,85.

23. Определяется сопротивление одного термоэлемента, R , Ом:

$$R = 2 \frac{l}{\sigma' S}.$$

24. Задаётся коэффициент термоЭДС, χ , В/°С.

25. Задаётся коэффициент теплопроводности полупроводникового элемента, λ , Вт/(м·°С).

26. Рассчитывается теплопроводность одного термоэлемента, K , Вт/°С:

$$K = \frac{2\lambda S}{l}.$$

27. Определяется эффективность термоэлемента, Z , 1/°С:

$$Z = \frac{\chi^2 \sigma}{4\lambda}.$$

28. Рассчитывается рабочий ток, I , А:

$$I = \frac{\chi T_x}{R}.$$

29. Рассчитывается холодопроизводительность одного термоэлемента, q , Вт:

$$q = \chi T_x I - 0,5 I^2 R - k \Delta T.$$

30. Определяется минимальное количество термоэлементов, n , шт.:

$$n = \frac{Q_0}{q}.$$

31. Рассчитывается напряжение на термоэлементе, U , В:

$$U = \chi T_r.$$

32. Определяется напряжение на термобатарее, U_6 , В:

$$U_6 = Un.$$

33. Рассчитывается мощность, потребляемая термобатареей, P_6 , Вт:

$$P_6 = IU_6.$$

34. Рассчитывается холодильный коэффициент, ε :

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{P_6}.$$

35. Определяется тепловыделение на горячих спаех, Q_r , Вт:

$$Q_r = Q_0 + P_6.$$

Для отвода тепла от горячих спаев термобатарей может быть использован теплоотвод, работающий в условиях принудительного охлаждения (газа или жидкости).

2.9. Расчёт теплоотвода с петельно-проволочным оребрением для естественного охлаждения

При расчёте теплоотвода с петельно-проволочным оребрением задаются геометрические размеры (все без исключения), а затем последовательными приближениями выясняют, удовлетворяют ли принятые предварительно размеры теплоотвода мощности полупроводникового прибора и заданной допустимой температуре p - n -перехода.

Конструкция теплоотвода с петельно-проволочным оребрением для естественного охлаждения приведена на рис. 29. Изображение проволочного радиатора приведено на рис. 30.

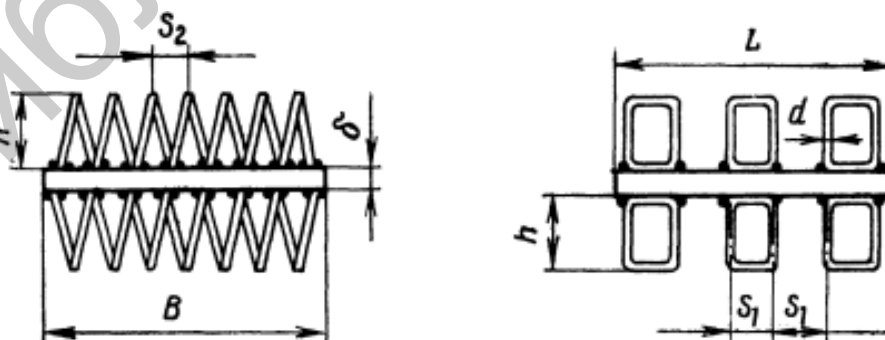


Рис. 29. Конструкция петельно-проволочного теплоотвода



Рис. 30. Проволочный радиатор на мощном транзисторе

Метод расчёта теплоотвода с петельно-проволочным оребрением для условий естественного охлаждения, рекомендующийся для теплоотводов с квадратным основанием, состоит в определении размеров основания теплоотвода при заданной мощности, рассеиваемой полупроводниковым прибором, и предварительно принятой высоте теплоотвода.

Порядок расчёта теплоотвода с петельно-проволочным оребрением приведён ниже. Расчётный график приведён на рис. 31.

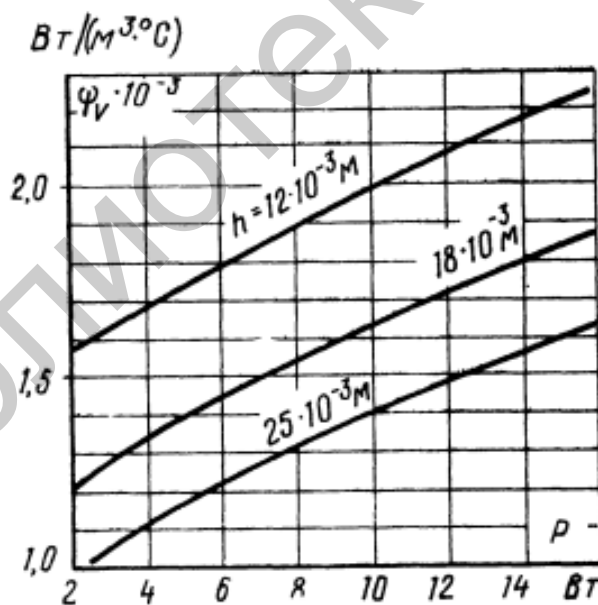


Рис. 31. График зависимости удельного объёмного показателя от мощности $\Psi_v = f(P)$

1. Задаётся мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором, P , Вт.
2. Задаётся температура окружающей среды, $T_{o.c}$, °С.
3. Выбирается из справочника максимальная температура перехода, $T_{п}$, °С.

4. Выбирается из справочника тепловое сопротивление переход – корпус, $R_{п-к}$, °С/Вт.

5. Выбирается из табл. 1 или из справочника тепловое контактное сопротивление, $R_{к-т}$, °С/Вт.

6. Задаётся толщина основания теплоотвода, δ , м. Рекомендуется выбирать $\delta = (3...5) \cdot 10^{-3}$ м.

7. Задаётся размер основания теплоотвода, B , м (см. рис. 29).

8. Задаётся поперечный размер основания теплоотвода, L , м (см. рис. 29).

9. Выбирается диаметр проволочного оребрения, d , м. Рекомендуется выбирать $d = (0,7...0,9) \cdot 10^{-3}$ м.

10. Выбирается поперечный шаг, S_1 , м. Рекомендуется выбирать $S_1 = (7...12) \cdot 10^{-3}$ м.

11. Выбирается поперечный шаг, S_2 , м. Рекомендуется выбирать $S_2 = (2...2,6) \cdot 10^{-3}$ м.

12. Выбирается поперечный шаг, h , м. Рекомендуется выбирать $h = (15...24) \cdot 10^{-3}$ м.

13. Рассчитывается высота теплоотвода, H , м:

$$H = 2h + \delta.$$

14. Определяется расчётная высота ребра (длина полупетли), $h_{расч}$, м:

$$h_{расч} = h - \frac{S_1 - d}{2}.$$

15. Рассчитывается число петель на теплоотводе, n :

$$n = \left(\frac{a}{S_2} - 1 \right) \cdot \left(\frac{b}{S_1} + 1 \right).$$

16. Определяется полная теплоотдающая поверхность теплоотвода, F , м²:

$$F = \left(n - \frac{S_{пр} + S_{отв}}{2S_1S_2} \right) \cdot (2\pi dh_{расч} + 0,5\pi dS_1) + 2BL + 2(B + L)S + F_{пр} - S_{пр},$$

где $S_{пр}$ – площадь, занимаемая полупроводниковым прибором с элементами крепления на поверхности теплоотвода (выбирается из справочника);

$S_{отв}$ – площадь отверстий под выводы полупроводникового прибора.

17. Рассчитывается коэффициент мощности, K_P :

$$K_P = 1 - \frac{F_{пр}}{Fq^2},$$

где $F_{\text{пр}}$ – охлаждаемая поверхность полупроводникового прибора.

18. Рассчитывается мощность, рассеиваемая теплоотводом, P_T , Вт:

$$P_T = K_P P.$$

19. Определяется допустимая максимальная температура теплоотвода, $T_{\text{Т.допmax}}$, °С:

$$T_{\text{Т.допmax}} = T_{\text{п}} - PR_{\text{п-к}} - P_T R_{\text{к-Т}}.$$

20. Задаётся поверхностная температура теплоотвода $T_{\text{ср}}$, °С.

21. Рассчитывается площадь поверхности, «натянутой» на теплоотвод, F_0 , м²:

$$F_0 = 2(B+L)H + 2BL.$$

22. Определяются коэффициенты облучённости $\phi_{1,2}$ и $\phi_{2,1}$:

$$\phi_{1,2} = \frac{F_0}{F};$$

$$\phi_{2,1} = \frac{F_0}{F_{\text{пол}}}.$$

23. Рассчитывается приведённая степень черноты, $\varepsilon_{\text{пр}}$:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \phi_{2,1}},$$

где $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,92$.

24. Определяется коэффициент теплоотдачи излучением, $\alpha_{\text{л}}$, Вт/(м²·°С):

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} \phi_{1,2} f(T_{\text{ср}}, T_{\text{о.с}}),$$

где $f(T_{\text{ср}}, T_{\text{о.с}})$ определяется по графику на рис. 8.

25. Рассчитывается коэффициент кинематической вязкости воздуха, ν , м²/°С:

$$\nu = \frac{75 \cdot 10^{-6}}{P} (141 + T_T).$$

26. Определяется перепад между средней поверхностной температурой теплоотвода и окружающей средой, ΔT , °C:

$$\Delta T = T_{\text{cp}} - T_{\text{о.с.}}$$

27. Рассчитывается число Грасгофа, Gr :

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T d^2}{\nu^2}$$

28. Определяется коэффициент теплопроводности воздуха, $\lambda_{\text{в}}$, Вт/(м·°C), при заданной температуре T_{T} (см. табл. П.4.1).

29. Определяется число Прандтля, Pr , при заданной температуре T_{T} (см. табл. П.4.1).

30. Рассчитывается число Нуссельта, Nu :

$$Nu = \left(2 + \frac{S_1}{d} + 2,3 \frac{S_2}{d} - 0,042 \frac{B}{d} \right) 10^{-2} \cdot (Gr Pr)^{0,25} \left(\frac{B}{h} \right)^{0,47}$$

31. Определяется коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\alpha_{\text{к}}$, Вт/(м·°C):

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{Nu \lambda_{\text{в}}}{d}$$

32. Рассчитывается общий коэффициент теплоотдачи, α , Вт/(м·°C):

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{д}}$$

33. Рассчитывается средняя поверхностная температура теплоотвода, T_{cp} , °C:

$$T_{\text{cp}} = \frac{P}{\alpha E} + T_{\text{о.с.}}$$

34. Определяется коэффициент обребнения, $K_{\text{ор}}$:

$$K_{\text{ор}} = \frac{F - 2(B+L)\delta}{2BL}$$

35. Определяется условный коэффициент теплоотдачи на боковой поверхности ребра, $\alpha_{\text{усл}}$, Вт/(м·°C):

$$\alpha_{\text{усл}} = \alpha K_{\text{ор}}$$

36. Рассчитывается радиус эквивалентного круга, η_0 , м:

$$\eta_0 = \sqrt{(0,58)^2 + (0,5L)^2}.$$

37. Определяется расчётный коэффициент теплоотдачи эквивалентной круглой пластины, $\alpha_{\text{расч}}$, Вт/(м²·°С):

$$\alpha_{\text{расч}} = \alpha_{\text{усл}} \frac{BL - \pi r_{\text{пр}}^2}{\pi r_0^2 - \pi r_{\text{пр}}^2},$$

где $r_{\text{пр}}$ – радиус полупроводникового прибора.

38. Задаётся коэффициент теплопроводности материала, λ , Вт/(м·°С) (см. табл. П.3.1).

39. Рассчитывается параметр χ :

$$\chi = \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{расч}}r_0^2}{\lambda\delta}}.$$

40. Рассчитывается функция J_{r_0} :

$$J_{r_0} = \frac{0,641 \lg \left(\frac{r_0}{\chi r_{\text{пр}}} \right) + \frac{1}{\chi^2} - 0,25}{1 - \left(\frac{r_{\text{пр}}}{r_0} \right)^2}.$$

41. Определяется температура теплоотвода на границе поверхности, занимаемой основанием полупроводникового прибора, T_0 , °С:

$$T_0 = \frac{J_{r_0} P_{\text{T}}}{2\lambda} + T_{\text{о.с.}}$$

42. Рассчитывается максимальная температура теплоотвода, T_{Tmax} , °С:

$$T_{\text{Tmax}} = T_0 + \frac{P_{\text{T}}}{4\pi\lambda S}.$$

43. Проводится проверка правильности расчёта:

$$T_{\text{T.допmax}} \geq T_{\text{Tmax}}.$$

Порядок расчёта теплоотвода с петельно-проволочным оребрением при естественном охлаждении теплоотводов, имеющих в основании квадрат, следующий:

1. Задаётся мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором, P , Вт.
2. Задаётся температура окружающей среды, $T_{o.c.}$, °С.
3. Выбирается из справочника максимальная температура перехода, $T_{п.}$, °С.
4. Выбирается из справочника тепловое сопротивление переход – корпус, $R_{п-к}$, °С/Вт.
5. Выбирается из табл. 1 или из справочника тепловое контактное сопротивление, $R_{к-т}$, °С/Вт.
6. Задаётся толщина основания теплоотвода, δ , м. Рекомендуется выбирать $\delta = (3...5) \cdot 10^{-3}$ м.
7. Выбирается диаметр проволочного оребрения, d , м. Рекомендуется выбирать $d = (0,7...0,9) \cdot 10^{-3}$ м.
8. Выбирается поперечный шаг, S_1 , м. Рекомендуется выбирать $S_1 = (7...12) \cdot 10^{-3}$ м.
9. Выбирается продольный шаг, S_2 , м. Рекомендуется выбирать $S_2 = (2...2,6) \cdot 10^{-3}$ м.
10. Выбирается высота ребра, h , м.
11. Задаётся коэффициент мощности, K_P .
12. Рассчитывается мощность, рассеиваемая теплоотводом, P_T , Вт:

$$P_T = K_P P.$$

13. Рассчитывается допустимая максимальная температура теплоотвода, $T_{т.доп_{max}}$, °С:

$$T_{т.доп_{max}} = T_{п.} - P R_{п-к} - P_T R_{к-т}.$$

14. Определяется по графику на рис. 31 удельный объёмный показатель Ψ_V .

15. Рассчитывается перегрев теплоотвода относительно окружающей среды, ΔT_T , °С:

$$\Delta T_T = T_{т.доп_{max}} - T_{o.c.}$$

16. Определяется объём теплоотвода, V_T , м³:

$$V_T = \frac{P_T}{\Psi_V \Delta T_T}.$$

17. Рассчитывается размер основания теплоотвода, B , м:

$$B = \sqrt{\frac{V_T}{\delta + 2h}}$$

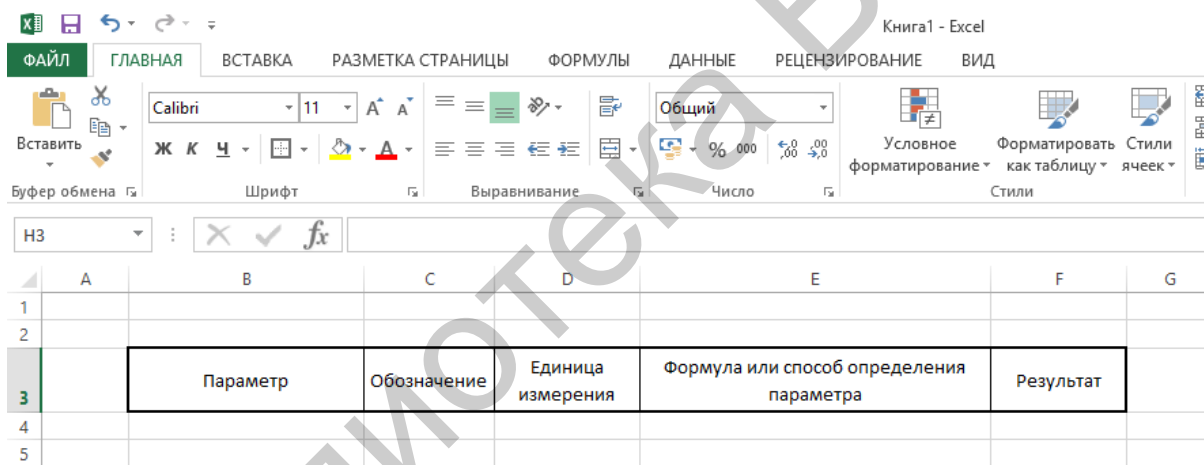
Основание теплоотвода – квадрат, поэтому $B = L$.

3. Практическая часть

В данной лабораторной работе необходимо произвести расчёт указанного преподавателем типа радиатора, используя выданные им параметры и справочные данные. Для выполнения данного задания рекомендуется использовать программу *Microsoft Excel*.

Рассмотрим пример расчёта радиатора на теплоотводе-пластине для естественного охлаждения с использованием программы *Microsoft Excel*. Порядок выполнения расчёта следующий:

1. Заполняем шапку таблицы и подстраиваем столбцы по ширине, как это показано на рис. 32.



	А	В	С	Д	Е	Ф	Г
1							
2							
3		Параметр	Обозначение	Единица измерения	Формула или способ определения параметра	Результат	
4							
5							

Рис. 32. Шапка таблицы для расчёта

2. Сохраняем созданную таблицу в папке со своим номером группы под названием «Расчёт пластинчатого радиатора».

3. Заносим параметры с их обозначениями и единицами измерения в первые три колонки (рис. 33). Подстраиваем столбцы по ширине, а строки по высоте для удобства.

Книга1 -

ФАЙЛ ГЛАВНАЯ ВСТАВКА РАЗМЕТКА СТРАНИЦЫ ФОРМУЛЫ ДАННЫЕ РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ

Вставить Шрифт Выравнивание Число Условно форматирование

Е4

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3		Параметр	Обозначения	Единица измерения	Формула или способ определения параметра	Результат	
4		Мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором	P	Вт			
5		Температура окружающей среды	T_{oc}	$^{\circ}\text{C}$			
6		Максимальная температура перехода	T_n	$^{\circ}\text{C}$			
7		Тепловое сопротивление переход-корпус	$R_{пк}$	$^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$			
8		Тепловое контактное сопротивление (корпус-полупроводникового прибора-теплоотвод)	$R_{кст}$	$^{\circ}\text{C}$			
9		Средняя поверхностная температура теплоотвода	T_{cp}	$^{\circ}\text{C}$			
10		Перепад между средней поверхностной температурой теплоотвода и окружающей средой	ΔT	$^{\circ}\text{C}$			
11		Высота пластины (при вертикальном положении теплоотвода)	L	м			
12		Кoeffициент теплоотдачи конвекцией	α_k	Вт/(м ² ·°C)			
13		Кoeffициент теплоотдачи излучением	$\alpha_{\text{из}}$	Вт/(м ² ·°C)			
14		Кoeffициент теплоотдачи	α	Вт/(м ² ·°C)			
15		Теплообменная поверхность	F	м ²			
16		Толщина пластины	δ	м			
17		Длина пластины	l	м			
18							

Рис. 33. Заполнение столбцов «Параметр», «Обозначение» и «Единица измерения»

4. Заполняем колонку с формулами и способами определения параметров (рис. 34).

Расчёт пластинчатого радиатора - Excel

ФАЙЛ ГЛАВНАЯ ВСТАВКА РАЗМЕТКА СТРАНИЦЫ ФОРМУЛЫ ДАННЫЕ РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ ВИД

Calibri 11

Ж К Ч

Общий

Условное форматирование

Форматировать как таблицу

Буфер обмена Шрифт Выравнивание Число Стили

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3		Параметр	Обозначение	Единица измерения	Формула или способ определения параметра	Результат	
4		Мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором	P	Вт	Задается		
5		Температура окружающей среды	$T_{о.с.}$	°C	То же		
6		Максимальная температура перехода	$T_{п.}$	°C	Берется из справочника		
7		Тепловое сопротивление переход-корпус	$R_{п-к}$	°C/Вт	То же		
8		Тепловое контактное сопротивление (корпус-полупроводникового прибора-теплоотвод)	$R_{к-т}$	°C	Определяется экспериментально		
9		Средняя поверхностная температура теплоотвода	$T_{ср}$	°C	$T_{ср} = q[T_{п.} - P(R_{п-к} + R_{к-т})]$		
10		Перепад между средней поверхностной температурой теплоотвода и окружающей средой	ΔT	°C	$\Delta T = T_{ср} - T_{о.с.}$		
11		Высота пластины (при вертикальном положении теплоотвода)	L	м	Задается		
12		Кoeffициент теплоотдачи конвекцией	α_k	Вт/(м ² ·°C)	$\alpha_k = A_1(T_{п.})B$		
13	$T_m = 0,5(T_{ср} + T_{о.с.})$						
14	$A_1(T_{п.})$ определяется по графику на рисунке 5.2						

Рис. 34. Заполнение столбца с формулами и способами определения параметра

5. В столбец «Результат» заносим значения тех параметров, которые задаются или берутся из справочников. Далее эти параметры будут использоваться для расчёта остальных данных.

6. В столбец «Результат» в ячейки с расчётными показателями записываем их формулы. Так, формула для расчёта средней поверхностной температуры теплоотвода примет следующий вид:

$$T_{ср} = q[T_{п.} - P(R_{п-к} + R_{к-т})] = 0,96 * (F6 - F4 * (F7 + F8)).$$

Эту формулу надо занести в ячейку F9. Введённая формула приведена на рис. 35.

	C	D	E	F	G
1					
2					
3	Обозначение	Единица измерения	Формула или способ определения параметра	Результат	
4	P	Вт	Задается		
5	$T_{о.с.}$	$^{\circ}\text{C}$	То же		
6	$T_{п.}$	$^{\circ}\text{C}$	Берется из справочника		
7	$R_{п-к}$	$^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	То же		
8	$R_{к-т}$	$^{\circ}\text{C}$	Определяется экспериментально		
9	$T_{ср}$	$^{\circ}\text{C}$	$T_{ср} = q[T_{п.} - P(R_{к-к} + R_{к-т})]$	$=0,96*(F6-F4*(F7+F8))$	
10	ΔT	$^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = T_{ср} - T_{о.с.}$		

Рис. 35. Ввод формулы для расчёта средней поверхностной температуры теплоотвода

Покажем для примера также ввод формулы площади теплообменной поверхности:

$$F = \frac{P}{\alpha \Delta T} = F4 / (F19 * F10).$$

Эту формулу надо занести в ячейку F20. Введённая формула показана на рис. 36.

Все остальные формулы вводим по аналогии.

7. Подставляем значения для проверки расчёта. На рис. 37 показана часть расчёта для транзистора П214 при 50°C .

Расчёт для других типов радиаторов выполняется таким же образом, но по своему алгоритму, приведённому в теоретических сведениях. Выполнение подобных расчётов в программе *Microsoft Excel* является очень удобным, т. к. можно в любой момент изменить исходные данные и конечные данные будут моментально пересчитаны.

	C	D	E	F	G
13			$T_m = 0,5(T_{cp} + T_{ocz})$		
14	α_x	Вт/(м ² ·°C)	$A_1(T_m)$ определяется по графику на рисунке 5.2		
15			$B = \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{1/4}$		
16	α_z	Вт/(м ² ·°C)	$\alpha_s = \varepsilon \varphi f(T_{cp}, T_{ocz})$		
17			ε выбирается из таблицы 7.5, $\varphi = 1$ в нашем случае		
18			$f(T_{cp}, T_{ocz})$ определяется по графику на рисунке 5.3		
19	α	Вт/(м ² ·°C)	$\alpha = \alpha_s + \alpha_x$		
20	F	м ²	$F = \frac{P}{\alpha \Delta T} = 2L(l + \delta) + 2l\delta$	$=F4/(F19*F10)$	
21	δ	м	Выбирается		

Рис. 36. Ввод формулы для расчёта площади теплообменной поверхности

	A	B	C	D	E	F	G
10		Перепад между средней поверхностной температурой тепловода и окружающей средой	ΔT	°C	$\Delta T = T_{cp} - T_{ocz}$	16,624	
11		Высота пластины (при вертикальном положении тепловода)	L	м	Задаётся	0,1	
12		Кoeffициент теплоотдачи конвекцией	α_x	Вт/(м ² ·°C)	$\alpha_s = A_1(T_m)B$	4,703868565	
13	$T_m = 0,5(T_{cp} + T_{ocz})$				58,312		
14	$A_1(T_m)$ определяется по графику на рисунке 5.2				1,31		
15	$B = \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{1/4}$				3,590739362		
16		Кoeffициент теплоотдачи излучением	α_z	Вт/(м ² ·°C)	$\alpha_l = \varepsilon \varphi f(T_{cp}, T_{ocz})$	7,56	
17	ε выбирается из таблицы 7.5, $\varphi = 1$ в нашем случае				0,9		
18	$f(T_{cp}, T_{ocz})$ определяется по графику на рисунке 5.3				8,4		
19		Кoeffициент теплоотдачи	α	Вт/(м ² ·°C)	$\alpha = \alpha_s + \alpha_l$	12,26386856	
20		Теплообменная поверхность	F	м ²	$F = \frac{P}{\alpha \Delta T} = 2L(l + \delta) + 2l\delta$	0,014714931	
21		Толщина пластины	δ	м	Выбирается	3,00E-03	
22		Длина пластины	l	м	$l = \frac{F - 2L\delta}{2(L + \delta)}$	0,068519084	
23							

Рис. 37. Результаты расчёта тепловода-пластины

4. Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Реализацию решения задачи.
5. Выводы.
6. Список использованных источников.

5. Контрольные вопросы

1. Какие основные виды теплоотводов для естественного воздушного охлаждения вы знаете?
2. Опишите основные этапы расчёта оребрённого радиатора.
3. Опишите основные этапы расчёта штыревого радиатора в общем случае.
4. В чем заключается принцип действия штыревых радиаторов?
5. Перечислите основные достоинства и недостатки оребрённого радиатора?
6. Перечислите основные достоинства и недостатки штыревого радиатора?
7. Какие основные материалы применяются для создания радиаторов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАТОРОВ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В СРЕДЕ *SOLIDWORKS*

1. Цель работы

Изучить общие принципы моделирования радиаторов для радиоэлектронной аппаратуры с использованием систем автоматизированного проектирования *SolidWorks*.

2. Теоретическая часть

SolidWorks Flow Simulation является модулем гидрогазодинамического анализа в среде *SolidWorks*. Модуль *Flow Simulation* не делает различия между геометрическими сущностями, созданными в *SolidWorks* или импортированными в базовый модуль. В *SolidWorks Flow Simulation* обеспечивается поддержка для 64-разрядных операционных систем с доступом ко всей доступной оперативной памяти. Также используется многопроцессорность при решении.

Подготовка модели имеет два явных преимущества: поддержка произвольных систем единиц; пополняемые инженерные базы данных по свойствам веществ и объектов.

В *Flow Simulation* можно задать следующие граничные условия:

- входные параметры – скорость, давление (статическое, динамическое, окружающей среды), массовый и объёмный расход;
- температуру, концентрацию компонентов, параметры турбулентности;
- расходно-напорные характеристики виртуальных вентиляторов;
- различные типы стенок, включая шероховатые; коэффициент теплоотдачи и параметры условной среды на стенках, не граничащих с реальной текучей средой;
- источники тепла (объёмные и поверхностные), виртуальные тепловентиляторы;
- возможность задания зависимости граничных условий, параметров и пр. от времени и координат;
- симметрию относительно базовых плоскостей и периодическую симметрию.

Данный модуль имеет следующие возможности моделирования:

- стационарные и нестационарные течения;
- сжимаемые и несжимаемые (жидкости или газы) течения, включая до-, транс- и сверхзвуковые режимы;
- идеальные и реальные газы;
- неньютоновские жидкости;

- одно- и многокомпонентные течения без химического взаимодействия и разделения фаз;
- совместный расчёт течения жидкости или газа и теплопередачи внутри твёрдого тела без наличия границы раздела газ – жидкость;
- ламинарные и турбулентные течения, учёт ламинарного/турбулентного перехода;
- «замораживание» течения для разделения «быстрых» и «медленных» процессов;
- течения в пористых средах с учётом теплопроводности стенки;
- учёт шероховатости стенки;
- внешнее и/или внутреннее течение;
- конвективный теплообмен, свободная, вынужденная или смешанная конвекция;
- радиационный теплообмен с управлением прозрачностью стенок и разделением свойств стенок для теплообмена излучением и солнечной радиации;
- расчёт траекторий твёрдых частиц и капель в потоке;
- возможность расчёта двумерной (2D) задачи;
- тепловые элементы Пельтье.

Результаты моделирования выводятся прямо в окне *SolidWorks*. Возможен вывод функции на любой плоскости или поверхности в виде цветowych эпюр, векторов и изолиний. Результаты можно отобразить с помощью изоповерхностей. Доступны интегральные характеристики на произвольной грани или совокупности граней. Также имеется ряд следующих возможностей по выводу результатов:

- создание трёхмерных траекторий;
 - вывод характеристик расчёта в *Microsoft Excel*;
 - распределение любой характеристики вдоль любой кривой и передача в *Microsoft Excel*;
 - анимация результатов;
 - расчёт характеристик в точках, определяемых пользователем;
 - вывод основных расчётных и интегральных величин в *Microsoft Excel*;
 - автоматическое создание отчёта;
- передача давления на стенках, коэффициентов теплоотдачи и температур в *SolidWorks Simulation*.

Также весьма полезным является модуль *Electronics Cooling Module*. Этот дополнительный модуль семейства *Flow Simulation* позволяет создавать специализированные расчётные модели электронных компонентов:

- многослойные печатные платы (с расчётом эффективных характеристик теплопроводности);
- тепловые трубки;
- двухрезисторные компоненты;
- джоулев нагрев проводников постоянным электрическим током;

– контактные электрические сопротивления.

В *Flow Simulation* наиболее удобно выполнять задачи по анализу теплообмена (рис. 37). О такой задаче и пойдёт речь в данной лабораторной работе. Эти задачи можно разделить на несколько групп:

– расчёт теплового потока вблизи адиабатных стенок или в твердотельных телах;

– указание различных типов источников тепла;

– назначение моделям различных твердотельных материалов, которые хранятся в инженерной базе данных;

– определение собственных материалов путём назначения им значений для физических свойств, таких как теплопроводность, теплоемкость и т. д.;

– расчёт теплоты излучения. Инженерная база данных содержит излучающие поверхности, такие как стенка чёрного тела, стенка белого тела, серое тело с произвольным альбедо, а также широкий спектр поверхностей реальных материалов.

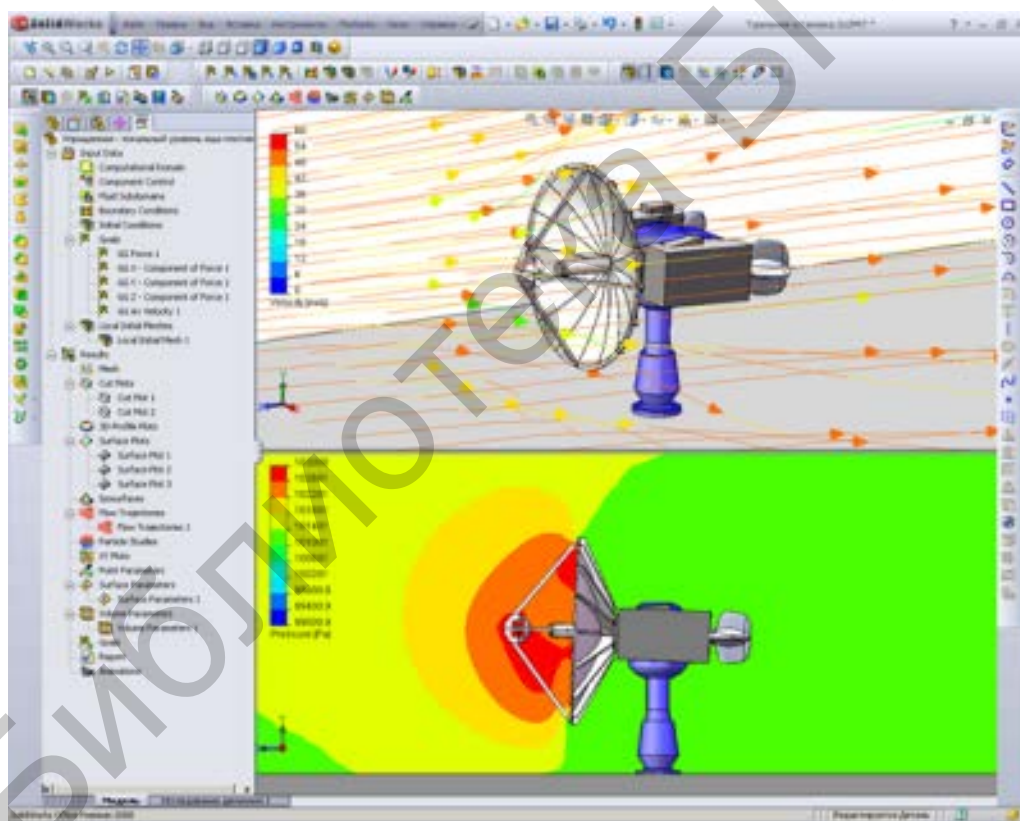


Рис. 37. Результаты моделирования в *Flow Simulation*

Также в данном модуле удобно решать задачи с жидкостями и типами потоков:

– анализ потока до десяти жидкостей различных типов (жидкости, газы/пар, реальные газы, вязкопластичные жидкости, а также сжимаемые жидкости). База данных содержит множество жидкостей с определёнными свойствами;

- анализ проблемы с несколькими жидкостями различного типа при условии разделения областей с различными жидкостями друг от друга с помощью подобластей жидкости;
- анализ взаимного растворения жидкостей. Смешивать можно только жидкости одного типа;
- определение жидкостей.

Лабораторная работа №5 выполняется в три этапа:

1. Создание объёмных моделей радиаторов по заданным преподавателем сечению, размерам и материалам.
2. Моделирование теплоотвода созданных радиаторов в *Flow Simulation*. Поверхностную тепловую мощность и расположение радиаторов в пространстве задаёт преподаватель.
3. Анализ эффективности созданных радиаторов.

Известно, что работоспособность и эффективность работы полупроводниковых приборов сильно зависит от их температуры. Для охлаждения сильно греющихся приборов применяют активные и пассивные методы охлаждения. Для обоснованного выбора метода охлаждения и его технической реализации используют различные методы моделирования тепломассопереноса и методики тепловых расчётов. Для моделирования поставленной задачи предлагается использовать *Flow Simulation SolidWorks*.

При создании моделей радиаторов удобно пользоваться инструментами «массив» и «зеркальное отображение». Например, создадим модель игольчатого радиатора. Последовательность действий отражена на рис. 38–46.

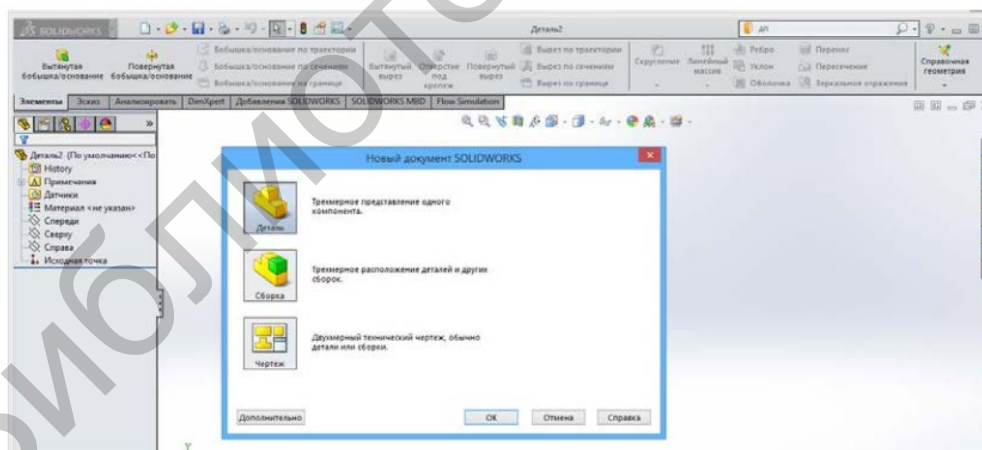


Рис. 38. Создание нового чертежа

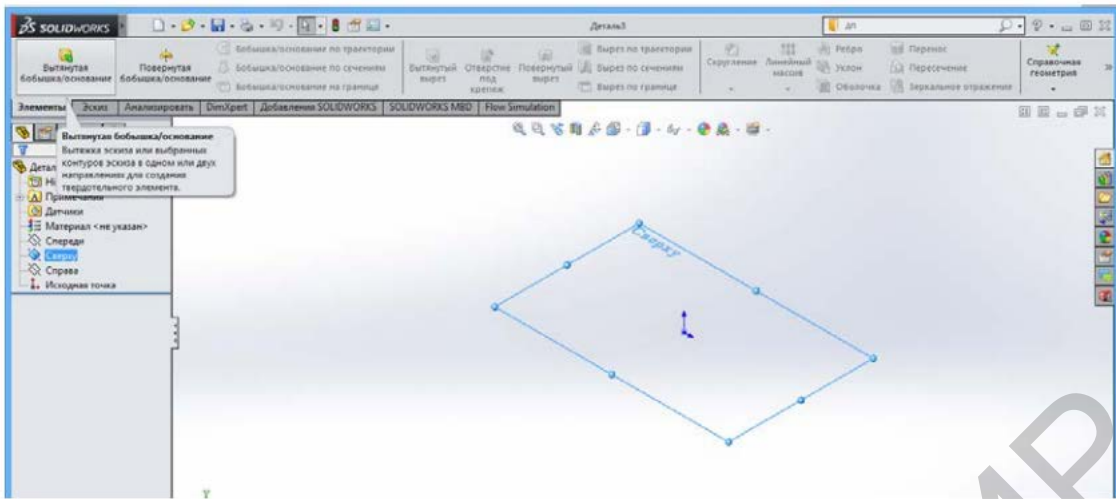


Рис. 39. Выбор плоскости чертежа для вытянутой бобышки

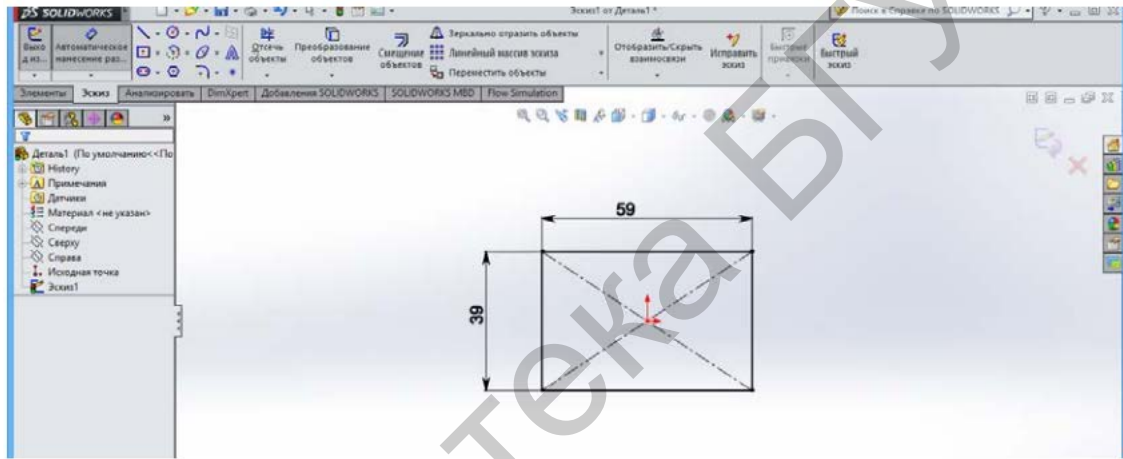


Рис. 40. Эскиз основания радиатора

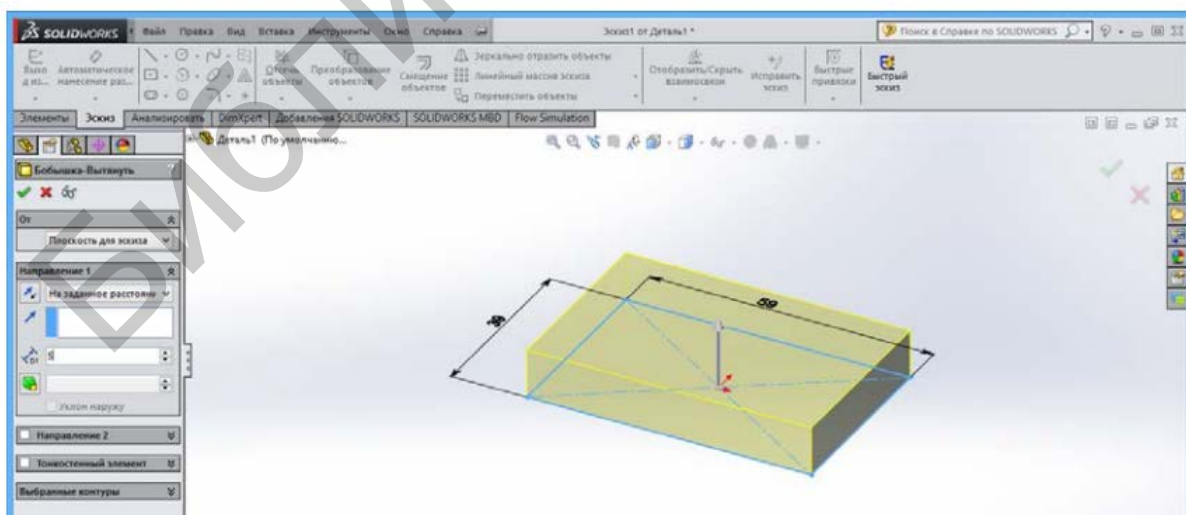


Рис. 41. Вытягивание основания радиатора на 5 мм

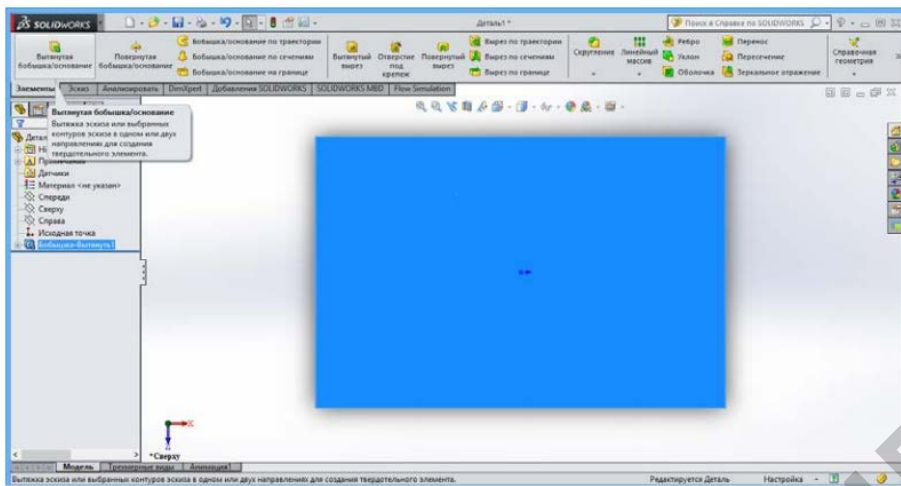


Рис. 42. Выбор грани радиатора для создания рёбер

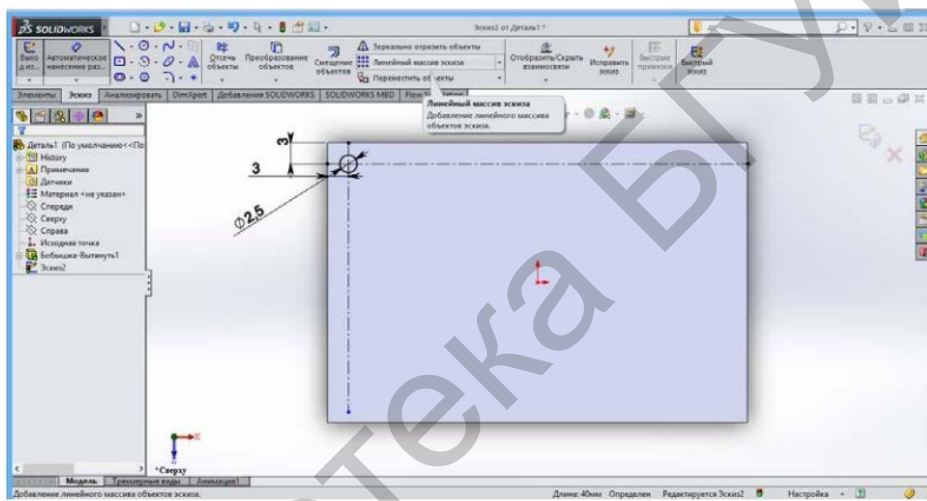


Рис. 43. Эскиз одного ребра

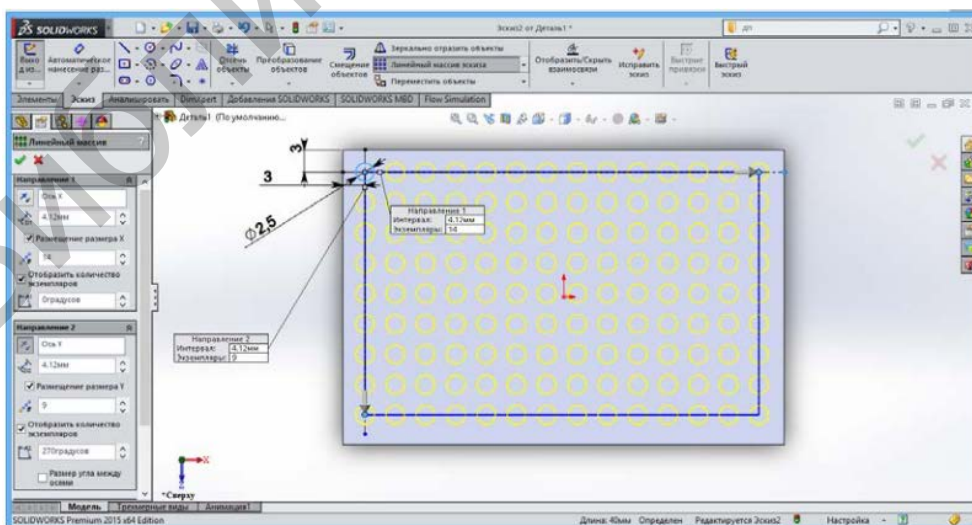


Рис. 44. Эскиз для создания рёбер радиатора при помощи линейного массива

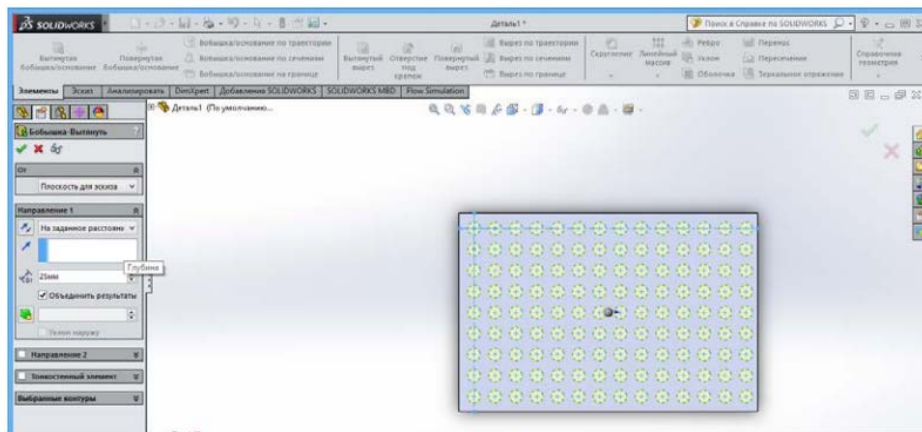


Рис. 45. Вытягивание рёбер радиатора на 25 мм

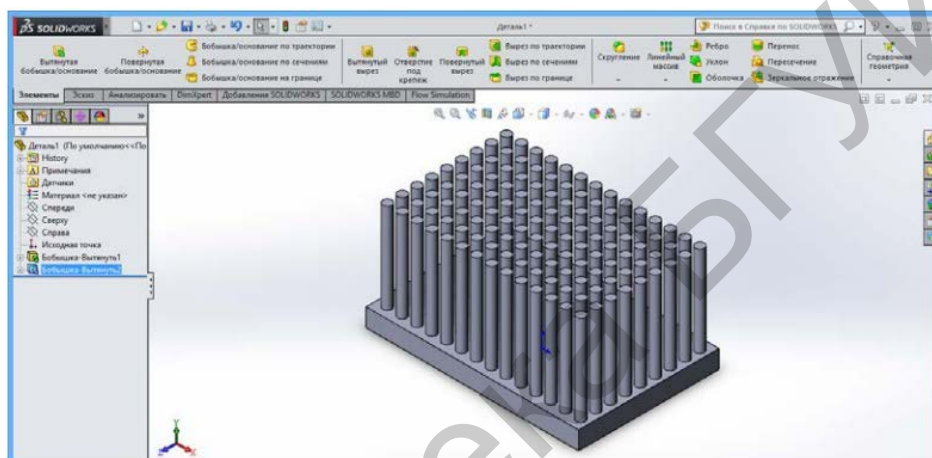


Рис. 46. Модель созданного радиатора

Далее моделируем теплоотдачу радиатора. Последовательность действий отражена на рис. 47–59. Запускаем *Flow Simulation SolidWorks*.

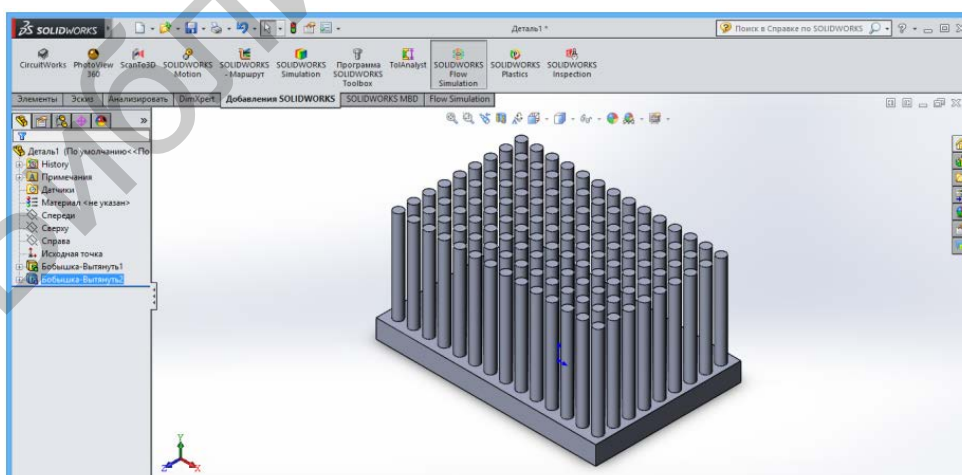


Рис. 47. Подключение *Flow Simulation SolidWorks*

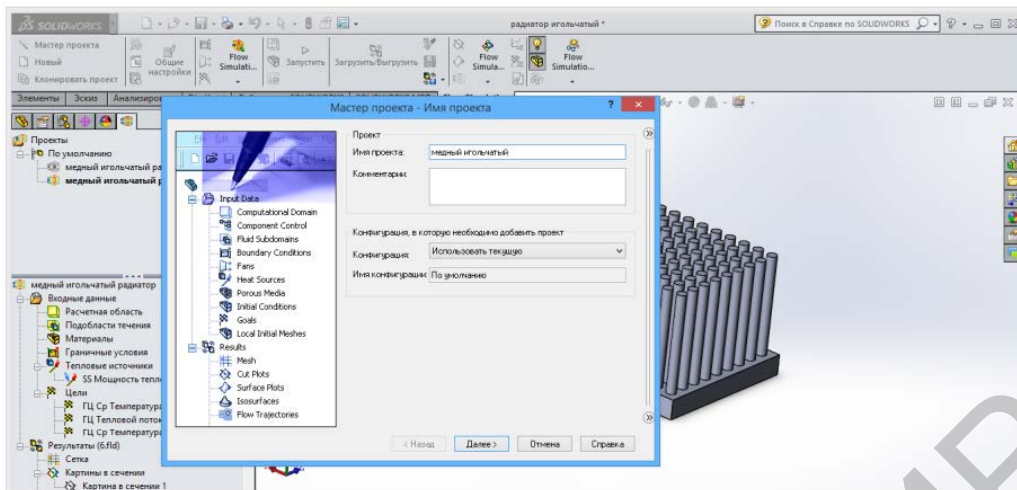


Рис. 48. Запускаем мастер нового проекта

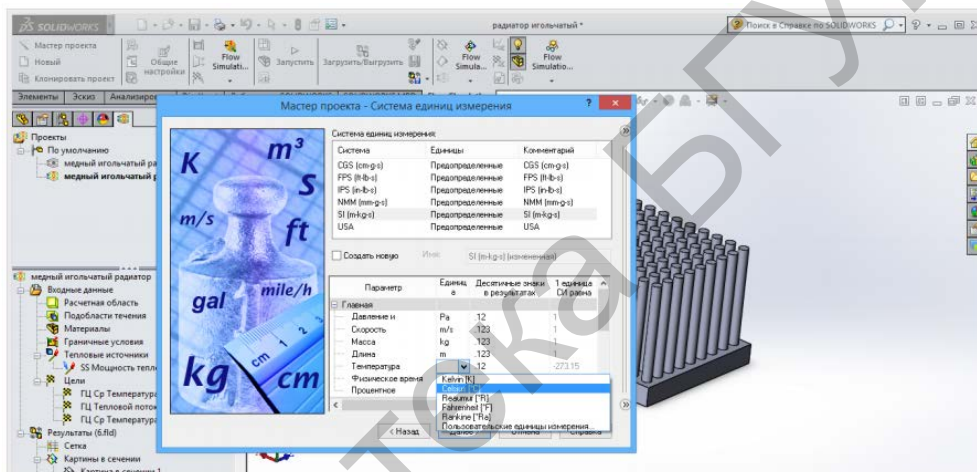


Рис. 49. Задаём систему единиц измерений

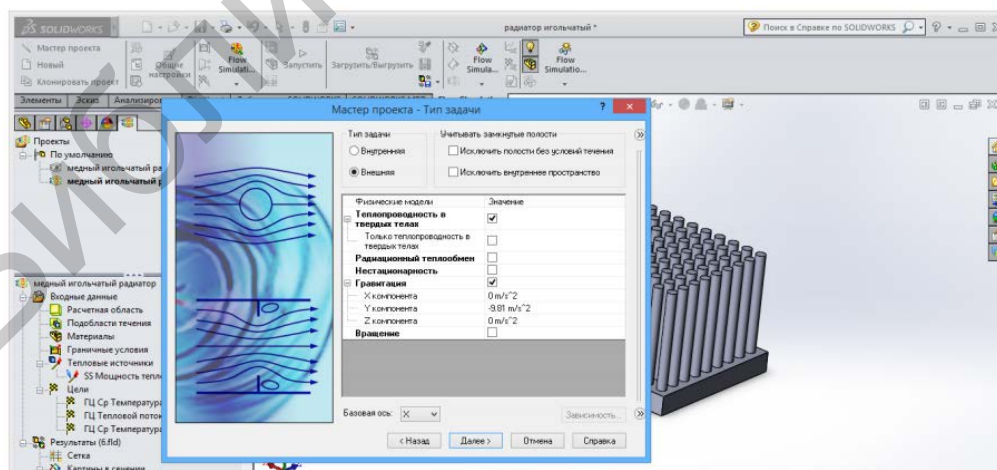


Рис. 50. Задаём тип задачи



Рис. 51. Задаём тип текучей среды

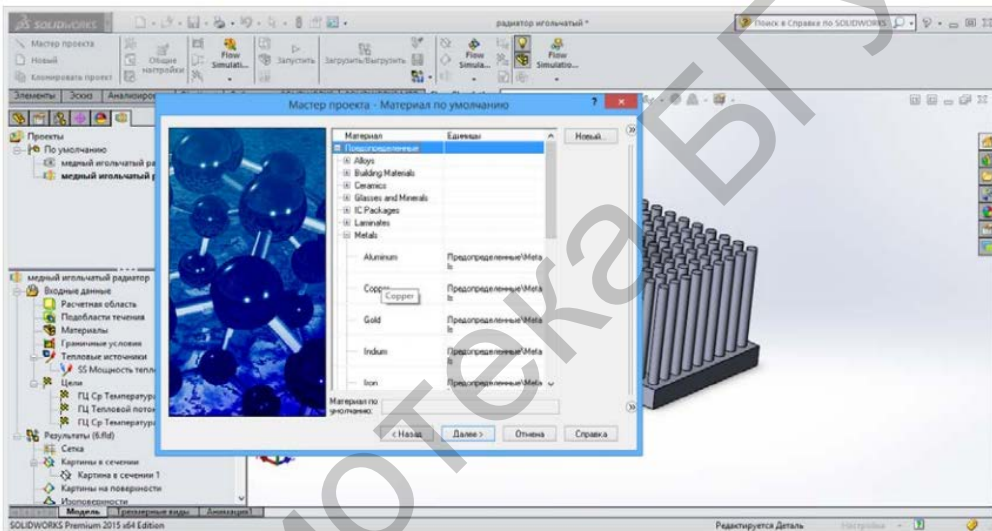


Рис. 52. Задаём материал радиатора

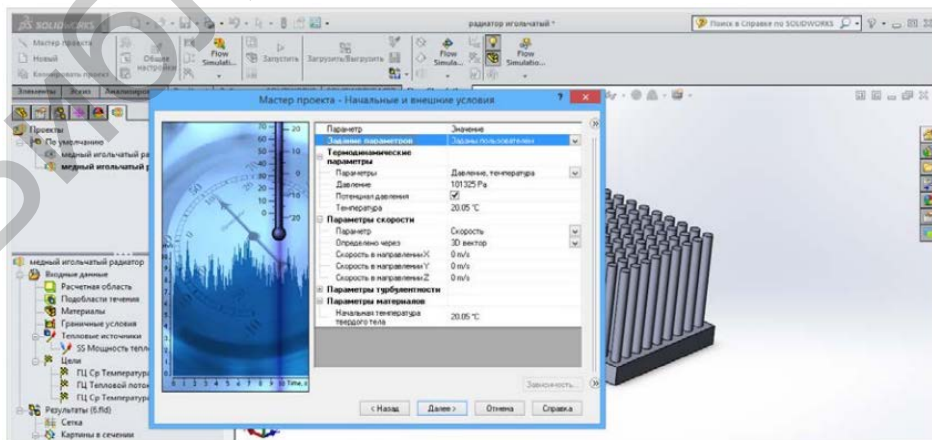


Рис. 53. Задаём начальные внешние условия

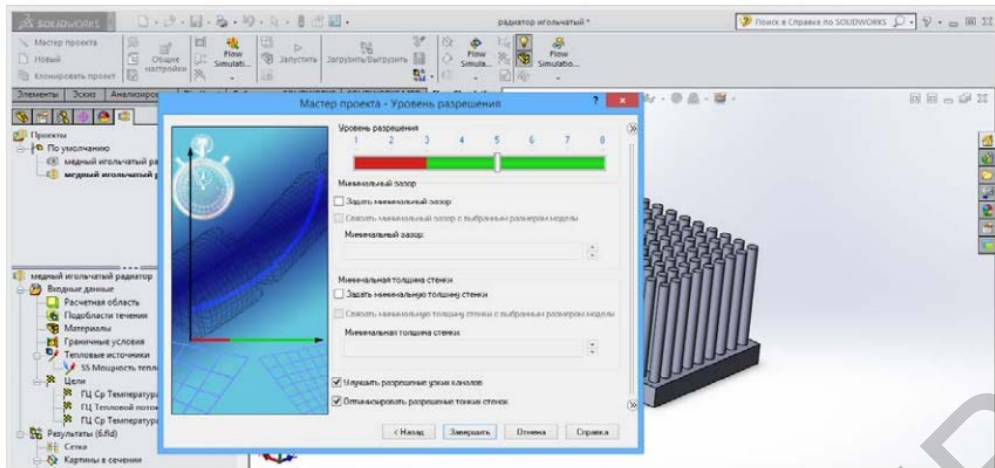


Рис. 54. Задаём уровень разрешения

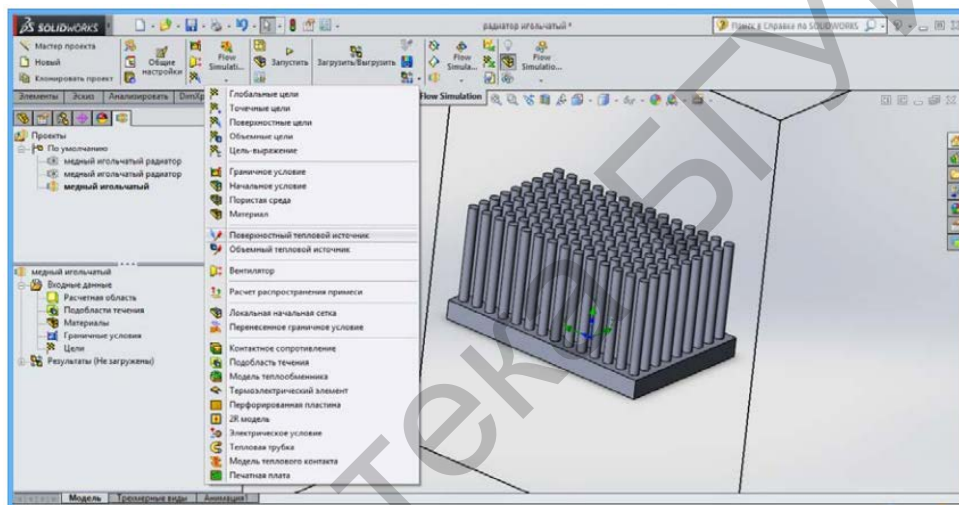


Рис. 55. Выбираем поверхностный тепловой источник

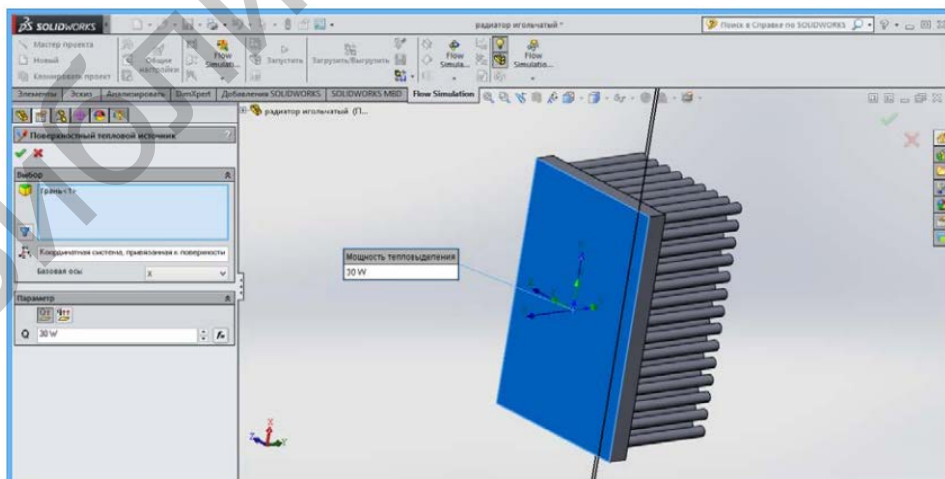


Рис. 56. Указываем, на какую грань воздействует поверхностный тепловой источник и какой он мощности

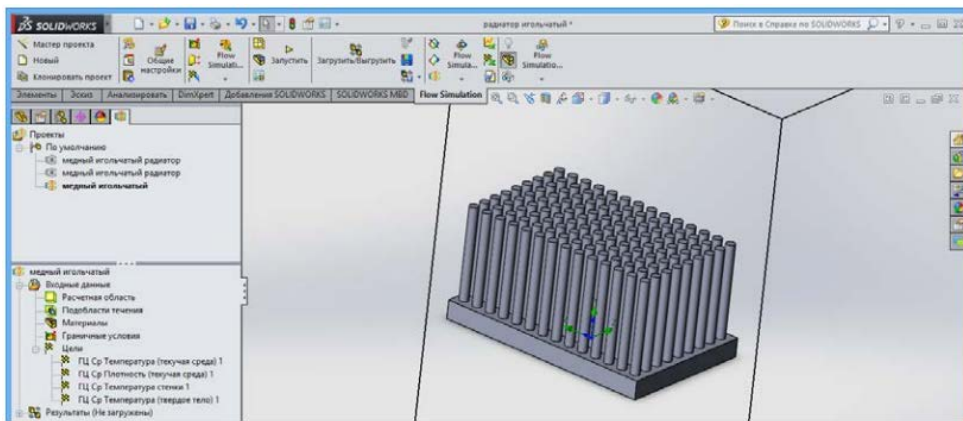


Рис. 57. Выбираем глобальные цели для задания условий сходимости решения поставленной задачи

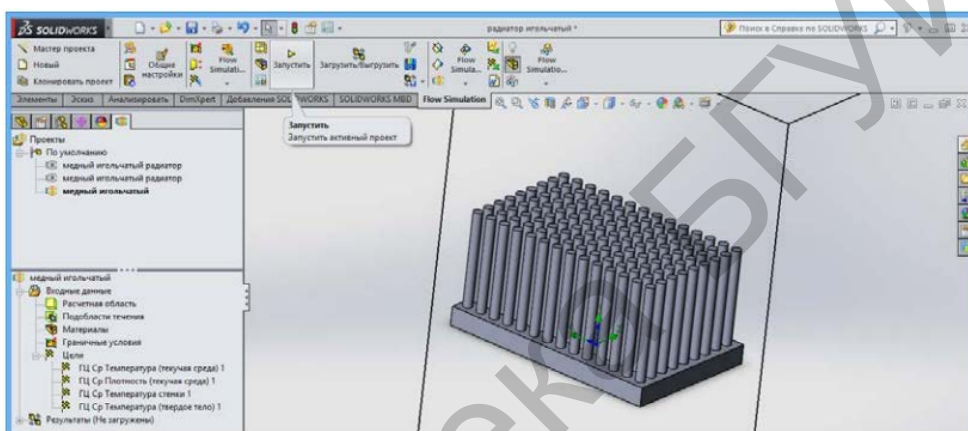


Рис. 58. Запускаем проект на расчёт

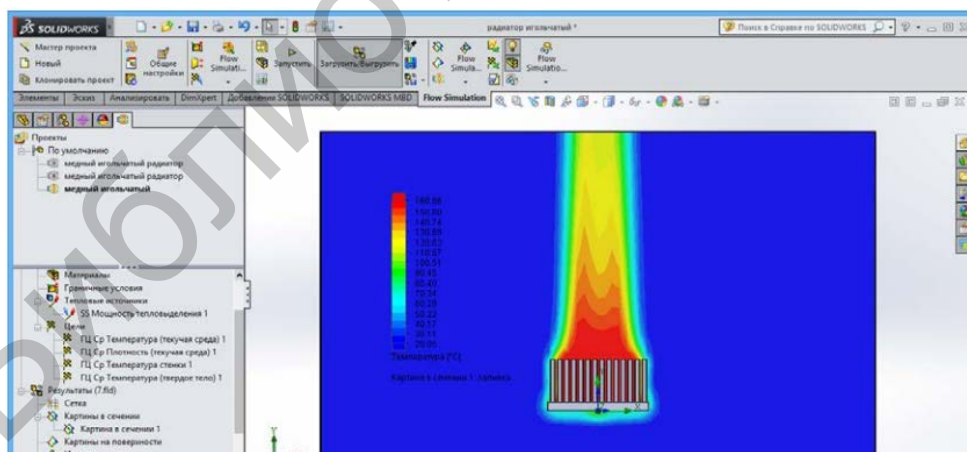


Рис. 59. Результат моделирования теплопередачи

3. Практическая часть

Аналогичным образом провести моделирование заданных преподавателем радиаторов. Сравнить результаты моделирования. Представить в отчёте результаты моделирования различных радиаторов. Сделать вывод об эффективности их применения.

4. Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Реализацию решения задачи.
5. Выводы.
6. Список использованных источников.

5. Контрольные вопросы

1. Каково назначение модуля *SolidWorks Flow Simulation*?
2. Какие основные типы задач можно решать в *SolidWorks Flow Simulation*?
3. Перечислите основные преимущества данного модуля по сравнению с другими похожими пакетами программ.
4. Какие возможности присутствуют в *SolidWorks Flow Simulation* при выводе результатов моделирования?
5. Какие граничные условия можно задать в *SolidWorks Flow Simulation*?

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЧЕРНОТЫ РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Таблица П.1.1

Значения коэффициентов черноты различных поверхностей

Материалы и состояние поверхности	Температура, °С	Коэффициенты черноты, ϵ
1	2	3
Алюминий (тщательно полированная пластина)	200–600	0,04–0,06
Алюминий (сильно окислен)	35–500	0,20–0,31
Силуминовое литье (в песчаной форме)	100–500	0,33–0,31
Силуминовое литье (в кокильной форме)	100–500	0,6–0,23
Дюралюминий Д-16	50–350	0,37–0,41
Сталь полированная	100	0,066
Сталь листовая холоднокатаная	93	0,075–0,085
Сталь листовая сильно окисленная	25	0,80–0,82
Сталь различных сортов после окисления	300–800	0,86–0,92
Латунь прокатанная	22	0,06
Латунь прокатанная и обработанная грубым наждаком	22	0,20
Латунь тусклая	50–350	0,22
Латунь хромированная полированная	100	0,075
Латунь торговая шлифованная	20	0,030
Медь, шабренная до блеска	22	0,072
Медь (пластина после нагрева свыше 600 °С)	200	0,57
Никель, проволока окисленная	70–200	0,44

1	2	3
Олово, луженое кровельное железо	100	0,07–0,08
Цинк, оцинкованное железо	25	0,23–0,27
Асбестовый картон, бумага, ткань	20–300	0,93
Бумага тонкая, наклеенная на лакированную пластину	20	0,92
Краски эмалевые, лаки различных цветов	20–100	0,92
Лак чёрный матовый	100	0,92–0,96
Муар чёрный, серый	40–100	0,96–0,98
Краска защитно-зелёная	20	0,86–0,90
Краска бронзовая	20–100	0,90
Краска алюминиевая	100	0,51
Краски алюминиевые разной давности с переменным содержанием алюминия	100	0,28
Алюминиевая фольга без масла	100	0,28–0,67
Алюминиевая фольга, покрытая слоем масла	100	0,56–0,09
Оксид металлов	–	0,04–0,08
Никелированные поверхности	20	0,05–0,07

Таблица П.2.1

Значение функции $f(T_{\text{ср}}, T_{\text{о.с}})$

$T_{\text{ср}},$ °C	$T_{\text{о.с}},$ °C														
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
10	5,03														
15	5,16	5,32													
20	5,31	5,45	5,59												
25	5,45	5,59	5,76	5,90											
30	5,59	5,76	5,90	6,05	6,20										
35	5,76	5,90	6,05	6,20	6,35	6,51									
40	5,90	6,06	6,20	6,35	6,51	6,60	6,82								
45	6,05	6,20	6,35	6,51	6,66	6,83	7,00	7,4							
50	6,20	6,35	6,51	6,67	6,83	7,00	7,17	7,35	7,50						
60	6,65	6,70	6,87	7,04	7,9	7,35	7,51	7,69	7,87	8,05					
70	6,90	7,06	7,21	7,39	7,55	7,72	7,86	8,05	8,24	8,42	8,80				
80	7,27	7,44	7,59	7,75	7,80	8,07	8,26	8,45	8,65	8,83	9,20	9,62			
90	7,63	7,82	7,98	8,13	8,3	8,49	8,67	8,86	9,04	9,25	9,65	10,03	10,46		
100	8,03	8,19	8,37	8,53	8,72	8,91	9,09	9,28	9,46	9,66	10,08	10,49	11,91	11,36	
110	8,43	8,60	8,79	8,97	9,15	9,33	9,5	9,71	9,90	10,10	10,51	10,93	11,38	11,82	12,30
120	8,85	9,02	9,20	9,40	9,56	9,77	9,98	10,17	10,35	10,56	11,01	11,42	11,87	12,31	12,80
130	9,30	9,40	9,65	9,88	10,01	10,22	10,41	10,62	10,8	11,02	11,42	11,90	12,37	12,82	13,32
140	9,75	9,65	10,12	10,30	10,50	10,72	10,90	11,10	11,31	11,51	11,94	12,40	12,89	13,40	13,85

ФУНКЦИЯ $f(T_{\text{ср}}, T_{\text{о.с}})$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Таблица П.3.1

Теплопроводность λ_m , плотность ρ и удельная теплоёмкость C_p
различных твёрдых материалов

Наименование материала	Температура, $T, ^\circ\text{C}$	Теплопроводность, $\lambda_m, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	Плотность, $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Теплоёмкость, $C_p, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
1	2	3	4	5
Алюминий	0–100	210	2700	900
Германий	20	14,7–29,3	5320	34
Дюралюминий	0–100	160–180	2750	920
Железо	0	74,4	7880	440
Кремний	20	23,3	2300	733
Латунь	0–100	90–100	8600	376
Серебро	0–100	390–420	10 500	234
Свинец	0–100	35	11 250	125
Сталь V-12	0–100	45	7900	470
Сталь 20	0–100	50	7850	460
Сталь легированная	0–100	38	7780	480
Конструкционная медь	0–100	390	8930	380
Асбест листовой	30	0,11	770	816
Асбест (волокно)	50	0,11	470	816
Бакелитовый лак	20	0,29	1400	–
Бумага	20	0,10–0,14	300–730	1507
Дерево (фанера)	20	0,15	600	1256
Картон обыкновенный	20	0,17	700	510
Плексиглаз (оргстекло)	20	0,19	180	1423–1550
Пробковая пластина	20	0,042	90	1884
Резина	20	0,15	250–1300	2050
Слюда	20	0,45–0,06	2600–3200	879
Стекло кварцевое	100–200	1,4–1,5	2500–2800	892
Стекланная вата	0	0,037	200	670

Окончание табл. П.3.1

1	2	3	4	5
Гетинакс	20	0,15–0,18	125	–
Текстолит	20	0,23–0,34	1300–1400	1460–1500
	100	2–2,5	2500–2600	1088
Компаунд ЭК-16А	50–100	0,30–0,35	1350	1200–1400

Библиотека БГУИР

ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ СУХОГО ВОЗДУХА

Таблица П.4.1

Значения плотности ρ , удельной теплоёмкости C_p , теплопроводности λ_v , кинематической вязкости ν и числа Прандтля Pr сухого воздуха при давлении 10^5 Па и различных температурах

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda_v \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1010	2,04	9,23	0,728
-20	1,395	1010	2,28	12,79	0,716
0	1,293	1000	2,44	13,28	0,707
10	1,247	1000	2,51	14,16	0,705
20	1,205	1000	2,60	15,06	0,703
30	1,165	1000	2,68	16,00	0,701
40	1,128	1000	2,76	16,96	0,699
50	1,093	1000	2,83	17,95	0,698
60	1,060	1000	2,90	18,97	0,696
70	1,029	1000	2,97	20,02	0,694
80	1,000	1000	3,05	21,09	0,692
90	0,972	1000	3,13	22,10	0,690
100	0,946	1000	3,21	23,13	0,688
120	0,898	1000	3,24	25,45	0,686

**ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ
И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Таблица П.5.1

Основные тепловые параметры ППП и ИМС

Тип ППП и ИМС	Максимальная мощность рассеивания, P_{\max} Вт	Предельная температура корпуса, °С	Тепловое сопротивление между переходом и корпусом, $R_{п-к}$, °С/Вт	Тепловое сопротивление между переходом и окружающей средой, $R_{п-с}$, °С/Вт	Диапазон температуры корпуса T_k , °С, при P_{\max}
1	2	3	4	5	6
2Д212А, Б	1	140	10	110	–
2Д213А, Б	10–12	140	1,5	70	–
2Д203 А, Б, Г	20	140	2,5	–	–
1П701А, Б	10	150	10	85	–60...+130
Ц702, П702 А	40	150	2,5	33	–60...+120
ГГ705А, Б, В, Г, Д	15	85	3	30	–40...+55
КТ 802 А	50	150	2,5	–	–25...+100
КТ 802 А, Б	10	150	8	–	–40...+85
2Т808 А, А-2, КТ808, АМ-ГМ	50	150	2	–	–60...+125
КТ829 (А-Г)	60	150	2,08	–	–40...+85
2Т856 (А-В)	75	150	1,67	–	–60...+125
2Т866А	30	200	5	–	–60...+125
П201 Э, П201 АЭ, П202 Э, П203 Э	10	85	3,5	–	–60...+70

Продолжение табл. П.5.1

1	2	3	4	5	6
П210 А, Ш	60	85	1	40	-60...+70
П304, П303, П303 А, П306, П306 А	3-10	150	10	100	-60...+120
П601 И, П601 АИ, БИ, П602 И, 602 АИ	0,5...0,75	85	15	50	-60...+70
П605, П605 А, П606, П606 А	0,5...0,75	85	15	35	-60...+70
П607, Ц607 А, П608, Ц608 (А, Б), П609, П609 (А, Б)	1,5	85	15	35	-60...+70
2Т505 (А, Б)	1...5	175	—	120...150	-60...+125
ГТ701 А	700...1200	85	1,2	—	-55...+70
1Т702 (А-В)	30...150	75	0,3	10	-60...+70
ГТ703 (А-Д)	1,6...15	85	3	30	-40...+55
1Т806 (А, В), ГТ (А-Д)	2...30	85	2	30	-55...+55
2Т837 (А-Е)	1...30	125	3,33	100	-60...+100
КТ837 (А-Ф)	1...30	125	3,33	100	-60...+100
2Т602 (А, Б), 2Т602 (АМ, БМ), КТ602 (АМ, БМ)	0,2...0,85	120...150	45	150	-60...+125

Продолжение табл. П.5.1

1	2	3	4	5	6
КТ604 (А, Б), КТ604 (АМ, БМ)	0,8...3	150	40	150	-60...+100
КТ605 (А, Б), КТ605 (АМ, БМ)	0,17...0,4	150	80	300	-40...+150
2Т608 (А, Б), КТ608 (А, Б)	0,5	150	60	200	-45...+85
КТ611 (А-Г), КТ611 (АМ, БМ)	0,3...3	150	40	150	-40...+100
КТ616 (А, Б)	0,3	150	65	260	-60...+85
КТ617 А	0,3	150	60	215	-40...+85
КТ618 А	0,5	150	60	200	-40...+85
2Т635 А, КТ 635 Б	0,1...0,3	150, 120	83,3	250	-60...+125 -45...+85
КТ902АМ	30	150	3,3	—	-60...+125
2Т903 (А, Б), КТ903 А	60	150	3,33	—	-60...+125 -45...+85
2Т912 (А, Б), КТ912 (А, Б)	35	150	20...10,4	—	-60...+125 -45...+85
2Т920 (А-Б), КТ920 (А-Г)	5-10, 25	150	20...10,4	—	-60...+125 -45...+85
2Т921 А, КТ921 (А, Б)	4,2 при T_{\max}	150	6	—	-60...+125 -45...+125
2Т921 А-У	4,2	150	6	—	-60...+125

1	2	3	4	5	6
2Т922 (А-Б), КТ922 (А-Д)	2Т922 А, КТ922 А:8	150	15	–	–60...+125 (для 2Т922 А, Б, В), –45...+85 (для КТ922 (А-Д))
	2Т922 Б, КТ922 Б, Г		6	–	
	20 Т922 Б, КТ922 Д:40		3	–	
2Т926 А	450 (имп)	150	2	–	–60...+125
КТ926 А, Б	50	150	2	–	–45...+100
КТ927 (А-В)	33,3	200	1,5	–	–60...+150
2Т929 А	6	160	20	–	–60...+125
КТ929 А	6	160	20	–	–40...+85
2Т931 А	150	160	0,8	–	–60...+125
КТ931 А	150	160	0,8	–	–40...+85
КТ936 А	28	200	4,5	–	–60...+100
КТ936 Б	83,3	200	1,5	–	–60...+100
2Т944 А	70	175	1,67	–	–60...+125
КТ944 А	70	175	1,67	–	–45...+100
2Т947 А	200	200	0,75	–	–60...+125
КТ947 А	200	200	0,75	–	–60...+100
2Т950 А	84	200	1,25	–	–60...+125
2Т950 Б	60	200	1,75	–	–60...+125
2Т951 А	45	200	2,83	–	–60...+125
2Т951 Б	80	200	4,25	–	–60...+125
2Т955 А	20	200	6,07	–	–60...+125
КТ955 А	20	200	6,07	–	–45...+85
2Т956 А	70	200	1,68	–	–60...+125
КТ956 А	70	200	1,68	–	–45...+85
2Т957 А	100	200	1,42	–	–60...+125
КТ957 А	100	200	1,42	–	–45...+85
2Т958 А	85	160	1,4	–	–60...+125
КТ958 А	85	160	1,4	–	–40...+85
2Т958 А	85	160	1,4	–	–60...+125
КТ958 А	85	160	1,4	–	–40...+85

Продолжение табл. П.5.1

1	2	3	4	5	6
КТ961 (А-В)	12,5	150	10	110	-45...+85
2Т964 А	100-200	200	0,75	-	-60...+125
2Т967 А	100	200	1,7	-	-60...+125
КТ967 А	100	200	1,7	-	-45...+100
2Т968 А	0,8-4	150	27,5	156	-60...+125
КТ969 А	1-6	150	21	125	-45...+85
2Т971 А	200	160	0,6	-	-60...+125
КТ971 А	200	160	0,6	-	-40...+85
КТ972 А, Б	8	150	15,6	-	-45...+85
2Т980 А, Б	135-300	200	0,57	-	-60...+125
2Т9111А	200	200	0,75	-	-60...+125
КТ626 (А-Д)	6,5	125	10	-	-40...+85
2Т629 А-2, КТ629 А	1	135	55	-	-60...+125
КТ639 (А-И)	1	150	10	115	-60...+125
КТ644 (А-Г)	20	150	10	115	-60...+125
1Т901 (А, Б)	15	75	2,5	-	-60...+70
1Т905 А, ГТ905 (А, Б)	60	85	9	50	-60...+70
1Т906 А, ГТ906 А, АМ	300-375	75	2,5	50	-60...+70
1Т910 АД	0,9-35	85	1,85	-	-60...+70
2Т932 А, Б	5-20	150	5	42	-60...+125
КТ932 А, Б, В	20	150	5	42	-60...+100
2Т933 (А, Б), КТ933 А, Б	0,2-5	150	20	125	-60...+125 -60...+100
2Т606 А	2,5	150	44	-	-60...+125
КТ606 А, Б	2,5	150	44	-	-40...+85
2Т624 А-2, 2Т624 АМ-2	1	135	25	-	-60...+125
КТ624 А-2, КТ624 АМ-2	0,7-1	120	25	-	-50...+85
2Т633 А	0,15-0,72	150	104	347	-60...+125
КТ633 Б	0,15-0,72	150	104	347	-45...+85

Продолжение табл. П. 5.1

1	2	3	4	5	6
2Т634 А-2	0,65–1,2	150	100	–	–60...+125
КТ634 Б-2	0,65–1,2	150	100	–	–45...+85
2Т637 А-2, КТ637 (А-2, Б-2)	0,8–2	150	83,3	–	–60...+100
2Т904А	7	150	16	–	–60...+125
КТ904 А, Б	8	120	16	–	–40...+85
2Т907 А	16	150	7,5	–	–60...+125
КТ907 А, КТ907 Б	13,5	125	7,5	–	–40...+85
2Т909 А	27	160	5	–	–60...+125
2Т909 Б	54–160	125	2,5	–	–60...+125
КТ909 А, Б	27	120	5	–	–40...+85
КТ909 В, Г	54	120	2,5	–	–40...+85
2Т911 А, Б	3	150	33	–	–60...+125
КТ911 А-Г	3	120	33	–	–40...+85
2Т913 А	4,7	150	20	–	–60...+125
2Т913 Б	8	150	10	–	–60...+125
2Т913 В	12	150	10	–	–60...+125
КТ913 А	4,7	150	20	–	–45...+85
КТ913 Б	8	150	10	–	–45...+85
КТ913 В	12	150	10	–	–45...+85
2Т916 А	30	160	4,5	–	–60...+125
КТ916 А	30	125	4,5	–	–40...+85
2Т925 А	5,5	150	20	–	–60...+125
2Т925 Б	11	150	10	–	–60...+125
2Т925 В	25	150	4,4	–	–60...+125
КТ925 А	5,5	150	20	–	–45...+85
КТ925 Б	11	150	10	–	–45...+85
КТ925 В, Г	25	150	4,4	–	–45...+85
2Т930 А	75	160	1,6	–	–60...+125
2Т930 Б	120	160	1	–	–60...+125
КТ930 А	75	160	1,8	–	–40...+85
КТ930 Б	120	160	1,2	–	–40...+85
2Т934 А	7,5	160	17,5	–	–60...+125

Продолжение табл. П.5.1

1	2	3	4	5	6
2Т934 Б	15	160	8,8	–	–60...+125
КТ934 Б, Г	8,8	160	8,8	–	–40...+85
КТ934 В, Д	15	160	4,4	–	–40...+85
2Т938 А-2	2,5	150	80	–	–60...+125
КТ938 Б-2	2,5	150	80	–	–60...+100
2Т942 А	25	200	7	–	–60...+125
2Т942 Б	22	200	8	–	–60...+125
КТ942 В	25	200	7	–	–45...+100
2Т946 А	37,5	175	4	–	–60...+125
КТ946 А	37,5	175	4	–	–45...+85
2Т960 А	70	160	1,75	–	–60...+125
КТ960 А	70	160	1,75	–	–40...+85
2Т962 А	17	160	7	–	–60...+125
2Т962 Б	27	160	4,4	–	–60...+125
2Т962 В	66	160	1,8	–	–60...+125
КТ962 А	17	160	7	–	–40...+85
КТ962 Б	27	160	4,4	–	–40...+85
КТ962 В	66	160	1,8	–	–40...+85
2Т970А	170	160	0,7	–	–60...+125
КТ970А	170	160	0,7	–	–40...+85
2Т976 А	75	160	1,7	–	–60...+175
КТ976 А	75	160	1,7	–	–40...+85
2Т979 А	75	175	2	–	–60...+125
КТ983 А	8,7	160	13,8	–	–40...+85
КТ983 Б	13	160	9,2	–	–40...+85
КТ983 В	22,5	160	5,3	–	–40...+85
2Т984 А	1,4	160	0,83	–	–60...+125
2Т984 Б	4,7	160	0,31	–	–60...+125
2Т989 А	40	195	2,7	–	–60...+125
2Т989 Б	30	195	2,7	–	–60...+125
2Т996 (А-2, Б-2)	2,5	150	40	–	–60...+125
2Т9103 (А-2, Б-2)	16,2	165	8,5	–	–60...+125
2Т9104 А	10	175	8,2	–	–60...+125

1	2	3	4	5	6
2Т9104 Б	23	175	3,1	–	–60...+125
2Т9118 А	130	175	11,5	–	–60...+125
2Т9119 А-2	5–11,5	200	2,5	–	–60...+125
2Т914 А, КТ914 А	7	150	16	–	–60...+125
2ТС613 А	0,125–0,5	150	60	125	–60...+125
2ТС613 В	0,125–0,5	150	60	125	–60...+125
КТС613 А	0,125–0,5	125	60	125	–45...+85
КТС613 Б	0,125–0,5	125	60	125	–45...+85
КТС613 В	0,125–0,5	125	60	125	–45...+85
КТС613 Г	0,125–0,5	125	60	125	–45...+85
2Т985 АС	185	160	0,65	–	–60...+125
2Т9101 АС	130	190	1,15	–	–60...+125
2Т9105 АС	160	160	0,75	–	–60...+125
1ТС609 А, Б, В	0,5–5	85	–	(0,084 С/мВт)	–60...+70
2ТС622 А, Б	0,410	150	–	218	–60...+125
КТС622 А, Б	0,4–10	120	–	218	–40...+85
2П802 А	40	–	3,1	–	–60...+125
2П905(А, Б) КП905 (А-В)	4	–	10...15	–	–60...+125
2П908 (А, Б)	0,5	–	10...15	–	–60...+85

Список использованных источников

1. Жуковский, В. С. Основы теории теплопередачи / В. С. Жуковский. – Л. : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1969. – 234 с.
2. Роткоп, Б. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры / Б. Е. Роткоп, Ю. Е. Спокойный. – М. : Советское радио, 1976. – 230 с.
3. Чернышёв, А. А. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники / А. А. Чернышёв, В. И. Иванов, А. И. Аксёнов. – М. : Энергия, 1980. – 216 с.
4. Кудреватых, А. Т. Использование SolidWorks в конструировании приборов / А. Т. Кудреватых. – Днепропетровск : ДНУ, 2016. – 19 с.

Библиотека БГУИР

Учебное издание

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В двух частях

Часть 2

**Алексеев Виктор Федорович
Пискун Геннадий Адамович
Богатко Иван Николаевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В КОНСТРУКЦИЯХ РЭС**

ПОСОБИЕ

Редактор *Е. С. Юрец*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная правка, оригинал-макет *М. В. Касабуцкий*

Подписано в печать 03.10.2017. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,53. Уч.-изд. 4,1. Тираж 80 экз. Заказ 417.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6