

9. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ КОНСТРУКЦИЙ РЭС

Влияние теплового режима на эффективность и качество конструкции РЭС

Основными тенденциями развития современных РЭС в микроэлектронном исполнении являются увеличение их сложности и снижение габаритов, с одной стороны, и увеличение требований к стабильности - с другой. Эти тенденции противоречивы, так как увеличение сложности и уменьшение габаритов приводят к увеличению напряженности теплового режима, а требования стабильности параметров системы связано с необходимостью его облегчения.

Перенос тепловой энергии из одной части РЭС в другую его часть или в окружающую среду называется теплообменом РЭС, а его температурное состояние, т.е. пространственно-временное изменение температуры, - тепловым режимом РЭС.

Тепловой режим характеризуется совокупностью температур всех элементов, из которых состоит РЭС, т.е. его температурным полем.

Если температура в любой точке температурного поля РЭС не выходит за допустимые пределы, то тепловой режим называется нормальным.

Тепловой режим характеризуется напряженностью и стационарностью.

Стационарный тепловой режим характеризуется неизменностью температурного поля во времени вследствие наступления термодинамического баланса между источником и поглотителем тепловой энергии.

Нестационарный тепловой режим характеризуется зависимостью температурного поля от времени. Этот режим имеет место при быстром изменении подводимой к РЭС мощности (включении и выключении, разовых и повторно-кратковременных режимах работы), когда часть её идёт на нагрев конструкции, часть рассеивается в окружающую среду и часть на обеспечение полезной функции.

Если плотность теплового потока не превышает 5 Вт/см^2 (перегрев поверхности аппаратуры относительно окружающей среды не более $0,5^\circ\text{C}$), то тепловой режим считается нетеплонапряженным. В теплонапряженном режиме требуется обеспечение нормального теплового режима, например за счёт естественной конвекции.

Увеличение напряженности теплового режима характеризуется плотностью теплового потока:

в конце 60-х годов - $0,1 \dots 0,3 \text{ Вт/см}^2$, в 70-е годы - $0,5 \dots 1,0 \text{ Вт/см}^2$,
в настоящее время $8 \dots 10 \text{ Вт/см}^2$.

Воздействие отрицательных и положительных температур может снизить надежность РЭС. Различают параметрическую надёжность, характеризующую постепенным отклонением выходных параметров от номинальных значений, и надёжность, характеризующую интенсивностью внезапных отказов.

Причинами постепенных отказов, вызванных тепловыми воздействиями, являются:

- снижение изоляционных свойств материалов;
- увеличение токов утечки;
- снижение пробивного напряжения;
- изменение коэффициента усиления и нулевого тока коллектора транзистора;
- изменение параметров магнитных сердечников;
- изменение емкости конденсаторов; электрической прочности, потерь;
- изменение сопротивлений резисторов;
- увеличение тепловых шумов в резисторах и транзисторах и т.д.

Все эти явления могут привести к искажению сигнала до уровня, при котором нормальное функционирование РЭС становится невозможным.

Внезапные отказы РЭС, вызванные изменением температуры, обусловлены:

1. нарушением целостности элементов конструкции вследствие различия ТКЛР её материалов:
 - обрыв проводников;
 - растрескивание металлостеклянных спаев;
 - отслаивание и растрескивание подложек;
 - появление внутренних напряжений, приводящих к нарушению паяных, сварных и клеевых соединений;
 - растрескивание компаундов;
 - заклинивание кинематических пар и т.д.
2. замерзанию влаги, приводящим к расширению микротрещин в подложках;
3. отслаиванием печатных проводников, расслаиванием МПП;
4. конденсацией влаги, создающей закорачивающие перемычки и условия для возникновения электрохимической коррозии;
5. затвердением или размягчением резины, что снижает качество герметизирующих прокладок и элементов амортизации;
6. изменением вязкости смазок;
7. выделением газообразных составляющих из диэлектрических конструкционных материалов, что ведет к снижению электрической прочности и образованию агрессивных сред;
8. старением припоев (перекристаллизация, образование пор) и т.д.

Эффективность и качество конструкций РЭС в значительной степени зависят от их способности отводить теплоту и использованием системы обеспечения нормального теплового режима (СОТР).

Способы теплообмена

Процесс переноса тепловой энергии из одной части пространства в другую осуществляется тремя способами:

1. конвекцией,
2. теплопроводностью (кондукцией),
3. излучением.

Обычно все три способа переноса тепловой энергии существуют одновременно и в своей совокупности определяют тепловой режим РЭС.

Конвекцией называется перенос тепла при перемещении объемов газа или жидкости в пространстве. Теплообмен между жидкостью или газом и поверхностью твердого тела называют конвективным теплообменом.

Теплопроводностью называется молекулярный перенос тепла в сплошной среде, обусловленный разностью температур и возникает при неравномерном распределении температуры в сплошной среде. В этом случае теплота передается за счёт непосредственного соприкосновения частиц, имеющих различную температур. Что приводит к обмену энергией между молекулами, атомами или свободными электронами.

Тепловое излучение – это процесс распространения теплоты с электромагнитными волнами. Этот вид передачи теплоты обусловлен превращением внутренней энергии вещества в энергию излучения, переносом излучения (в форме электромагнитных волн) и его поглощением веществом.

В конструкции РЭС при нормальных климатических условиях и охлаждении 60% тепла отводится за счёт конвекции, 30% тепла отводится за счет излучения и 10%- за счёт теплопроводности.

Теплоотвод конвекцией

Перенос теплоты конвекцией связан с движением жидкой или газообразной среды, соприкасающейся с твердым телом (элементом конструкции). Тепловая энергия при конвекции передается как между твердым телом и средой, так и в самой среде.

Конвекция называется *естественной*, если она осуществляется при свободном движении среды за счёт разности плотностей холодной и горячей её областей.

В невесомости естественная конвекция отсутствует.

Конвекция называется *принудительной*, если движение среды происходит за счёт внешних сил (вентилятора, насоса).

Конвекционный теплообмен может быть усилен поглощением теплоты при испарении (парообразовании).

Передача теплоты с помощью конвекции подчиняется закону Ньютона-Рихмана:

$$P = \alpha_k S_{\Delta} T,$$

где P - мощность теплового потока, Вт, переносимого при конвективном теплообмене газом или жидкостью в окружающую среду или из окружающей среды.
 α_k - коэффициент теплоотдачи конвекцией от компонента к окружающей среде, Вт/(м²·°C).
 S - площадь нагретой поверхности, м²,
 ΔT - перегрев поверхности относительно окружающей среды или среды относительно поверхности, °C, $\Delta T = t - t_c$

Произведение конвективного коэффициента α_k на площадь S называется конвективной составляющей тепловой проводимости σ_k , величиной обратной тепловому сопротивлению при конвекции R_k .

$$\alpha_k \cdot S = \sigma_k = \frac{1}{R_k}$$

Коэффициент передачи конвекцией α_k численно характеризует мощность, которую рассеивает или воспринимает единица поверхности твердого тела путем конвекции при разности температур между телом и средой в 1°С.

Вся сложность процесса теплоотдачи в формуле Ньютона-Рихмана концентрируется в одной величине – коэффициенте теплоотдачи α_k , который представляет собой сложную функцию большого числа параметров, существенно влияющих на процесс теплообмена.

Конкретное значение α_k определяется физико-механическими и кинематическими свойствами жидкостей или газов, скоростью их перемещения, формой, шероховатостью и размерами поверхностей.

$$\alpha_k = \alpha(t, t_c, \beta, \lambda, C_p, \nu, a, g, \Phi),$$

где β - коэффициент объемного расширения жидкости или газа, 1/°C;
 λ - коэффициент теплопроводности жидкости или газа, Вт/(м·°C);
 C_p - удельная теплоемкость жидкости или газа при постоянном давлении, Дж/(кг·°C);
 ν - коэффициент кинематической вязкости жидкости или газа, м²/сек;
 g - ускорение силы тяжести, м/сек²;
 a - коэффициент температуропроводности жидкости или газа м²/сек,

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}$$

 γ - плотность жидкости или газа,
 Φ - символическое обозначение совокупности параметров, характеризующих форму, строение поверхности и её размеры.

Большое значение в исследованиях процесса теплообмена имеет теория подобия.

На основе теории подобия можно объединить физические и геометрические параметры; в этом случае тот же сложный процесс можно описать с помощью небольшого числа безразмерных комплексов (критериев) – определенным образом составленных из этих физических величин.

Пользуясь теорией подобия процесс теплообмена конвекцией можно описать следующими критериями:

1. Критерий Нуссельта (Nu) $Nu = \frac{\alpha_k \cdot L}{\lambda}$;
2. Критерий Грасгофа (Gr) $Gr = \beta g \frac{L^3}{\nu^2} (t - t_c)$;
3. Критерий Прандтля (Pr) $Pr = \frac{\nu}{a}$;
4. Критерий Рейнольдса (Re) $Re = \frac{\nu \cdot L}{\nu}$

где L - определяющий размер конструкции, м,
 ν - скорость потока жидкости или газа, м/сек.

Первые три критерия описывают естественную конвекцию, принудительная конвекция описывается четырьмя критериями.

Естественная конвекция в неограниченном пространстве

В общем случае явление естественной конвекции определяется десятью физическими величинами, от которых зависит α_k . Воспользовавшись теорией подобия, процесс теплообмена в условиях естественной конвекции будет описываться не десятью параметрами, а тремя критериями. Зависимость между многочисленными параметрами можно представить в виде критериального уравнения, связывающего три критерия подобия:

$$Nu = F(GrPr)$$

Обработка экспериментальных данных в виде критериального уравнения облегчает задачу анализа теплового режима. Была предложена общая зависимость для коэффициента теплоотдачи конвекцией тел с одним определяющим размером (вертикальная плита, плоскость, бесконечно длинные проволоки, трубы, шары):

$$Nu_m = C(GrPr)_m^n,$$

где C и n – эмпирические коэффициенты, а индекс m указывает, что значения физических параметров газа или жидкости следует выбирать для средней арифметической температуры, $t_m = 0,5(t + t_c)$.

Значения C и n приведены для разных значения аргумента в таблице....

В соответствии с показателем n различают четыре закона теплообмена конвекции, соответствующие четырем режимам движения среды.

Табл.

$(Gr Pr)_m$	C	N	Закон теплообмена	Режим движения среды
$<1 \cdot 10^{-3}$	0,5	0,0	-	Пленочный
$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8	Закон 1/8 степени	Ламинарный
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	Закон 1/4 степени	Интенсивный ламинарный
$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3	Закон 1/3 степени	Вихревой

1. *Пленочный режим* – при котором у поверхности тела образуется почти неподвижная плёнка нагретой жидкости или газа. интенсивность теплообмена мала. Этот режим движения среды может иметь место у тел с плавными очертаниями при небольших температурных напорах. Теплообмен обусловлен явлением теплопроводности.
2. *Закон 1/8 степени* соответствует ламинарному движению жидкости или газа. Интенсивность теплообмена незначительна. Этот режим типичен для среды, омывающей тонкие провода.
3. *Закон 1/4 степени* соответствует интенсивному ламинарному и локонообразному движению жидкости или газа. Интенсивность теплообмена увеличивается. Такой режим движения среды имеет место около плоских и цилиндрических кожухов аппаратуры средних размеров, около плоских ребер радиаторов и т.д.
4. *Закон 1/3 степени* соответствует вихревому движению жидкости или газа, при котором теплообмен происходит интенсивно. Размер тела не влияет на интенсивность теплообмена. Такой режим движения среды наблюдается около внешних поверхностей кожухов аппаратуры больших размеров.

После преобразования критериального уравнения для естественной конвекции в неограниченном пространстве получим рабочие формулы, удобные для расчетов конвективных коэффициентов тел различной конфигурации в условиях естественной конвекции и неограниченного пространства.

1. При анализе теплового режима радиодеталей необходимо знать конвективные коэффициенты теплоотдачи различных проводников и с удовлетворительной точностью такие расчёты можно проводить по формуле для неограниченного цилиндра. Определяющий размер – диаметр.

$$\alpha_k = A_1 \cdot \left(\frac{t - t_c}{d^5} \right)^{1/8},$$

где d – диаметр проводника, мм.

В коэффициент A_1 вошли все физические параметры среды.

$$A_1 = 1,18(\beta \cdot g \cdot \text{Pr})_m^{1/8} \cdot \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/4}}$$

2. Теплоотдача плоской и цилиндрической поверхностей – это плоские и цилиндрические поверхности стенок кожуха аппаратуры, шасси вне кожуха, плоские поверхности ребер и т.д.

Вначале определяют неравенство, позволяющее оценить закон движения около нагретой поверхности:

$$(t - t_c) \leq \left(\frac{840}{L} \right)^3,$$

где L - определяющий размер поверхности.

Если неравенство выполняется, то движение среды подчиняется закону 1/4 степени, в противном случае имеет место закон 1/3 степени.

- Теплообмен по закону 1/4 степени.

- a) Для вертикально ориентированной поверхности высотой L или цилиндр диаметром L

$$\alpha_k = A_2 \cdot \left(\frac{t - t_c}{L} \right)^{1/4}.$$

- b) Для горизонтально ориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вверх. Определяющий размер L – наименьшая сторона поверхности.

$$\alpha_k = 1,3 \cdot A_2 \cdot \left(\frac{t - t_c}{L} \right)^{1/4}$$

- c) Для горизонтально ориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вниз.

$$\alpha_k = 0,7 \cdot A_2 \cdot \left(\frac{t - t_c}{L} \right)^{1/4}$$

В коэффициент A_2 вошли все физические параметры среды.

$$A_2 = 0,54 \cdot (\beta \cdot g \cdot \text{Pr})_m^{1/4} \cdot \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/2}}$$

- Теплообмен по закону 1/3 степени.

- a) Для вертикально ориентированной плоской поверхности, цилиндрической поверхности или сферы.

$$\alpha_k = A_3 \cdot (t - t_c)^{1/3}$$

- b) Для горизонтально ориентированной плоской поверхности, обращенной нагретой стороной вверх.

$$\alpha_k = 1,3 \cdot A_3 \cdot (t - t_c)^{1/3}$$

- c) Для горизонтально ориентированной плоской поверхности, обращенной нагретой стороной вниз.

$$\alpha_k = 0,7 \cdot A_3 \cdot (t - t_c)^{1/3}$$

В коэффициент A_3 вошли все физические параметры среды.

$$A_3 = 0,135 \cdot (\beta \cdot g \cdot \text{Pr})_m^{1/3} \cdot \frac{\lambda_m}{\nu_m^{2/3}}$$

Естественная конвекция в ограниченном пространстве.

Теплообмен излучением

Нагретое тело передает часть энергии в окружающее пространство в виде электромагнитных волн. Этот процесс называется тепловым излучением. Тепловое излучение обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

Волновые свойства излучения объясняют явление дифракции и интерференции, а корпускулярные свойства такие явления как отражение, поглощение, испускание.

Если на пути тепловому излучению встречается вещество, то тепловая энергия частично поглощается, частично отражается и частично проходит сквозь тело.

Закон сохранения энергии:

$$Q_0 = Q_A + Q_R + Q_D$$

где Q_0 - количество падающей энергии,

Q_A - количество поглощенной энергии,

Q_R - количество отраженной энергии,

Q_D - количество энергии, прошедшей сквозь вещество.

После преобразования выражения закона сохранения энергии имеем:

$$1 = \frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_D}{Q_0},$$

где $\frac{Q_A}{Q_0} = A$ - поглощательная способность тела,

$\frac{Q_R}{Q_0} = R$ - отражательная способность тела,

$\frac{Q_D}{Q_0} = D$ - пропускательная способность тела.

Каждая из величин изменяется от 0 до 1.

В зависимости от значения А, R, D различают три крайних случая:

1. $A=1, R=0, D=0$ - падающая лучистая энергия полностью поглощается телом. Такие тела называются *абсолютно чёрные*.
2. $R=1, A=0, D=0$ - падающая энергия полностью отражается. Такие тела называются *абсолютно белые*.

3. $D=1, A=0, R=0$ - падающая энергия полностью проходит сквозь тело. Такие тела называются *абсолютно прозрачные*.

Мощность теплового потока передаваемая при излучении с i -го тела на j -ое определяется выражением

$$P_{ij} = \alpha_{ijn} \cdot (t_i - t_j) \cdot S_i$$

где S_i - площадь поверхности i -го тела

Влияние экранов на теплообмен излучением

Для защиты от теплового излучения обычно применяют экраны, расположенные между взаимно излучающими поверхностями. В этом случае приведенная степень черноты системы двух поверхностей с расположенными между ними экранами снижается.

Действие плоского экрана.

Если между двумя неограниченными параллельными поверхностями со степенью черноты ε_1 и ε_2 размещено n экранов, причем степени черноты поверхностей i -го экрана равными ε_i' и ε_i'' , то приведенная степень черноты поверхности определяется

$$\varepsilon_{np12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\varepsilon_i'} + \frac{1}{\varepsilon_i''} - 1 \right)}$$

Если степени черноты поверхностей и экранов одинаковы и равны ε , следовательно

$$\varepsilon_{np12} = \frac{1}{(n+1) \cdot \left(\frac{2}{\varepsilon} - 1 \right)}$$

Таким образом теплообмен будет снижен в $(n+1)$ раз. Чем ниже степень черноты экрана, тем меньше теплообмен излучением в системе.

Действие цилиндрического экрана.

Обозначим приведенную степень черноты двух цилиндрических тел без экрана через ε_g

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \cdot \frac{S_1}{S_2}}$$

Обозначим через ε_n' - приведенную степень черноты поверхности системы двух цилиндрических тел между которыми n – экранов.

$$\varepsilon_n' = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_n} + \frac{S_1}{S_2} + \sum_{i=1}^n \frac{S_1}{S_{\varepsilon_i}} \cdot \left(\frac{2}{\varepsilon_{\varepsilon_i}} - 1\right)}$$

где S_1, S_2 - площадь цилиндрических поверхностей 1-го и 2-го тела,

S_{ε_i} - площадь экрана,

$\varepsilon_{\varepsilon_i}$ - степень черноты поверхности i -го экрана.

При применении одного экрана между двумя цилиндрическими телами имеем

$$\varepsilon_n' = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_n} + \frac{S_1}{S_2} + \frac{S_1}{S_3} \cdot \left(\frac{2}{\varepsilon_3} - 1\right)}$$

Следует отметить, что в отличие от плоского экрана действие цилиндрического экрана зависит от его расположения между цилиндрическими телами, так как при изменении положения экрана изменяется соотношение $\frac{S_1}{S_3}$.

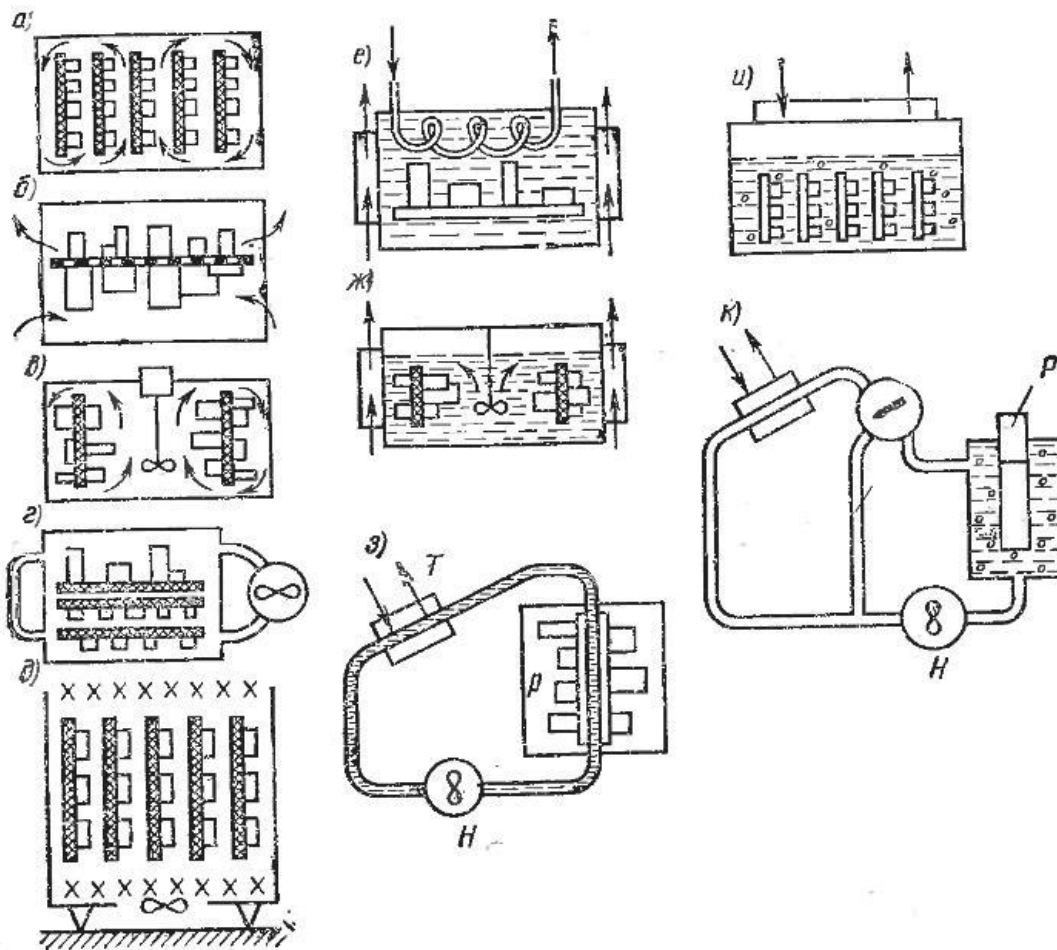
Если $S_3 \rightarrow S_1$ следовательно ε_n' имеет малое значение которым будет соответствовать и относительно малые значения результирующих тепловых потоков, т.е. экранирование получается более эффективным при расположении экрана вблизи первого тела.

9.2 Системы охлаждения РЭС

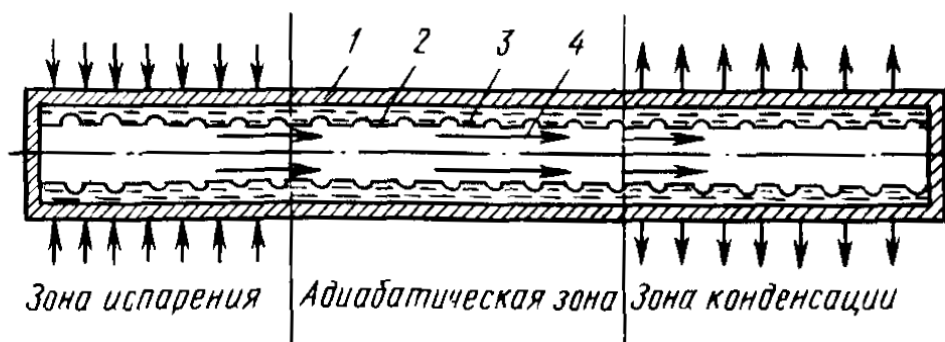
Системой охлаждения (СО) называется совокупность устройств и элементов, предназначенных для охлаждения РЭС.

Системы охлаждения подразделяются на:

- Воздушные.
- Жидкостные.
- Испарительные.
- Кондуктивные.
- Радиационные.
- Специальные.
- Комбинированные.



ТЕПЛОВЫЕ трубы



Интенсивность теплопередачи различных способов охлаждения

Способ теплопередачи	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² К)
Естественная конвекция и излучение	2 - 10
Принудительная конвекция в воздухе и парах	10 - 100
Естественная конвекция в масле и других жидкостях той же плотности	200 - 300
Принудительная конвекция в масле и других жидкостях той же плотности	300 - 1000
Естественная конвекция в воде	200-600
Принудительная конвекция в воде	1000 - 3000
Кипение воды	500 - 45000
Капельная конденсация водяных паров	40000 - 120000

Основные формулы теплопередачи

Определяемая величина	Формула
Теплоотдача конвекцией	$P_K = \alpha_K \cdot S(t_1 - t_2), \text{ Вт}$ (1)
Теплопередача излучением	$P_L = 5,67 \varepsilon_n \varphi_{12} S \frac{\left(\frac{t_1+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_2+273}{100}\right)^4}{t_1 - t_2}, \text{ Вт}$ (2)
Теплопередача теплопроводностью через плоскую стенку толщиной δ	$P_T = \frac{\lambda S}{\delta} (t_1 - t_2), \text{ Вт}$ (3)
Тепловое сопротивление плоской стенки толщиной δ , площадью S	$R_n = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}, \text{ К/Вт}$ (4)
Тепловое сопротивление цилиндрической стенки длиной L	$R_{ц} = \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{r_2}{r_1}, \text{ К/Вт}$ (5)
Коэффициент теплоотдачи конвективного теплообмена по закону степени 1/8	$\alpha_k = 1,18(\beta g P_r)_m^{1/8} \cdot \frac{\lambda_m}{v_m^{1/4}} \cdot \left(\frac{t_1 - t_{\text{окр.ср.}}}{L^5}\right)^{1/8} \cdot N, \text{ Вт/м}^2\text{К}$ (6)
Коэффициент теплоотдачи конвективного теплообмена по закону степени 1/4	$\alpha_k = 0,54(\beta g P_r)_m^{1/4} \cdot \frac{\lambda_m}{v_m^{1/2}} \cdot \left(\frac{t_1 - t_{\text{окр.ср.}}}{L}\right)^{1/4} \cdot N, \text{ Вт/м}^2\text{К}$ (7)
Коэффициент теплоотдачи конвективного теплообмена по закону степени 1/3	$\alpha_k = 0,135(\beta g P_r)_m^{1/3} \cdot \frac{\lambda_m}{v_m^{2/3}} \cdot (t_1 - t_{\text{окр.ср.}})^{1/3} \cdot N, \text{ Вт/м}^2\text{К}$ (8)
Коэффициент теплообмена излучением	$\alpha_L = \varepsilon_{n1} \varphi_{12} f(t_1, t_2), \text{ Вт/м}^2\text{К}$ (9)
Конвективно-кондуктивный коэффициент для ограниченного пространства по закону степени 1/4	$K = N \cdot \left[6,25 - 5,25 \left(1 + \frac{\delta}{l} \right)^{-1,67} \right] \cdot 0,24 \lambda \frac{(\beta g P_r)^{1/4}}{v^{1/2}} \cdot \sqrt[4]{\frac{t_1 - t_2}{\delta}}, \text{ Вт/м}^2\text{К}$ (10) где $l = \sqrt{l_1 \cdot l_2}$
Критерий Нуссельта при вынужденном движении среды	$Nu_f = \frac{a}{\lambda_f} l'$ (11)
Критерий Рейнольдса при вынужденном движении среды	$Re_f = \frac{v l'}{v_f}$ (12)
Критерий Прандтля при параметрах температуры жидкости (f) и стенки (w)	$Pr_f = \frac{v_f}{a_f}; \quad Pr_w = \frac{v_w}{a_w}$ (13)