Основные положения теории теплообмена

Теоретическое занятие

Специальность: 13.02.02 Теплоснабжение и теплотехническое оборудование

ОП 01. Теоретические основы теплотехники

Тема 2.1. Основные положения теории теплообмена

Преподаватель: Подбережная Н.Д.

2022

Основные положения теории теплообмена

Теплопередача изучает закономерность процесса теплообмена между телами и распространение теплоты внутри одного тела. Необходимым условием теплопередачи является разность температур.

Теплота передаётся тремя способами:

1. Теплопроводностью
2. Конвекцией
3. Излучением

Теплопроводность – это процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела, имеющих разные температуры.

Конвекция — это процесс переноса тепловой энергии при перемещении жидкости.

Излучение (лучистый теплообмен, радиация) - это процесс передачи энергии электромагнитными волнами.

Количество теплоты, проходящей в единицу времени, называется тепловыми потоком (мощностью теплового потока).

Q – количество теплоты, Дж;

Q – мощность теплового потока, Вт (Дж/с)

Удельным тепловым потоком или плотностью теплового потока называется количество теплоты, проходящей через единицу поверхности в единицу времени.

$$q = \frac{Q}{Ft}, \frac{Вт}{м^2}$$

q – плотность теплового потока

Q – количество теплоты, Дж

F – поверхность (площадь), $м^2$

t – время, $с^1$

---

[1]Шапошников В.В. Общая энергетика. Учебное пособие. - Краснодар: Издательство ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2020.

Теплопроводность - перенос энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым в результате теплового движения и взаимодействия микрочастиц (атомов, молекул, ионов и т.п.).

Теплопроводность происходит:

1) в твёрдых телах;

2) в жидких телах;

3) в газообразных телах.

Теплопроводность не происходит в вакууме.

Теплопроводность различных веществ разная. Металлы обладают самой высокой теплопроводностью, причем у разных металлов теплопроводность отличается. Жидкости обладают меньшей теплопроводностью, чем твердые тела, а газы меньшей, чем жидкости.

Коэффициент теплопроводности обозначается буквой λ. Измеряется в Вт/м•К (система СИ)

В качестве обязательного условия для данного процесса считается разность температур поверхностей стенки. В такой ситуации образуется поток теплоты, который направлен от стенки с большим значением температуры к поверхности стенки с меньшей температурой.

Количество тепла, проходящее через плоскую однослойную стенку, определяется по уравнению Фурье:

$Q = \lambda \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} \cdot FT$, Дж - количество тепла

$Q = \lambda \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} \cdot F$, Вт - тепловой поток

$q = \lambda \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta}$, $\frac{Вт}{м^2}$ - удельный тепловой поток

$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{\delta}{\lambda}}$, $\frac{Вт}{м^2}$ - удельный тепловой поток,

где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м К;

t_{c1} – температура первой поверхности стенки, °С;

t_{c2} - температура второй поверхности стенки, °С;

δ – толщина стенки, м;

F – поверхность (площадь), $м^2$;

Т – время, с;

δ/λ –термическое сопротивление теплопроводности, м К/Вт.

Термическое сопротивление теплопроводности обозначается буквой «R».

$R = \delta/\lambda$, м К/Вт

Вещества с низкой теплопроводностью используют в качестве теплоизоляторов.

Теплоизоляторы — это вещества, плохо проводящие тепло. Воздух является хорошим теплоизолятором, поэтому оконные рамы делают с двойными стеклами, для того чтобы между ними был слой воздуха. Хорошими теплоизолирующими свойствами обладают дерево и различные пластмассы.

Все металлы, стекло, вода хорошо проводят тепло и являются плохими теплоизоляторами.

Коэффициенты теплопроводности различных веществ даются в таблицах.[2]

Рассмотрим процесс теплопроводности через плоскую 3-х слойную стенку.

Температура наружных поверхностей стенок $t_{ст1}$ и $t_{ст2}$, коэффициенты теплопроводности слоев λ_1, λ_2, λ_3, толщина слоев δ_1, δ_2, δ_3.

1)Удельный тепловой поток, проходящий через первый слой, определяется по формуле:

$$q = \frac{t_{ст1} - t_{сл1}}{\frac{\delta 1}{\lambda 1}}, \quad \frac{Вт}{м^2}$$

где $t_{ст1}$ – температура первой поверхности стенки, °С;

$t_{сл1}$ - температура поверхности первого слоя, °С;

λ 1 - коэффициент теплопроводности материала первого слоя, Вт/м К;

δ 1 - толщина первого слоя, м.

2)Удельный тепловой поток, проходящий через второй слой, определяется по формуле:

---

[2]Шапошников В.В. Общая энергетика. Учебное пособие. - Краснодар: Издательство ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2020.

$$q = \frac{t_{сл1} - t_{сл2}}{\frac{\delta 2}{\lambda 2}}, \quad \frac{Вт}{м^2}$$

где $t_{сл1}$ - температура поверхности первого слоя,°С;

$t_{сл2}$ - температура поверхности второго слоя, °С;

λ 2 - коэффициент теплопроводности материала второго слоя, Вт/м К;

δ 2 - толщина второго слоя, м.

3)Удельный тепловой поток, проходящий через третий слой, определяется по формуле:

$$q = \frac{t_{сл2} - t_{ст2}}{\frac{\delta 3}{\lambda 3}}, \quad \frac{Вт}{м^2}$$

где $t_{сл2}$ - температура поверхности второго слоя, °С;

$t_{ст2}$ - температура поверхности второй стенки, °С;

λ 3 коэффициент теплопроводности материала третьего слоя, Вт/м К;

δ 3 - толщина третьего слоя, м.

Складывая, почленно, получим:

$$q = \frac{t_{ст1} - t_{сл1}}{\frac{\delta 1}{\lambda 1}} + \frac{t_{сл1} - t_{сл2}}{\frac{\delta 2}{\lambda 2}} + \frac{t_{сл2} - t_{ст2}}{\frac{\delta 3}{\lambda 3}} = \frac{t_{ст1} - t_{ст2}}{\frac{\delta 1}{\lambda 1} + \frac{\delta 2}{\lambda 2} + \frac{\delta 3}{\lambda 3}}, \frac{Вт}{м^2}$$

где $\frac{\delta 1}{\lambda 1} = R1$ – термическое сопротивление первого слоя, мК/Вт;

$\frac{\delta 2}{\lambda 2} = R2$ – термическое сопротивление второго слоя, мК/Вт;

$\frac{\delta 3}{\lambda 3} = R3$ – термическое сопротивление третьего слоя слоя, мК/Вт

Переход тепла от стенки к жидкости или обратно называется теплоотдачей.

Количество тепла, которым обмениваются между собой жидкость и стенка, определяется по уравнению Ньютона – Рихмана.

Количества тепла, которое отдает первая жидкость первой стенке, определяется по формулам:

$Q = \alpha 1(t_{ж1} - t_{с1}) \cdot FT$, Дж - количество тепла;

$Q = \alpha 1(t_{ж1} - t_{с1}) \cdot F$, Вт - тепловой поток;

$q = \alpha 1(t_{ж1} - t_{с1})$, $\frac{Вт}{м^2}$ - удельный тепловой поток;

$q = \frac{t_{ж1} - t_{с1}}{\frac{1}{\alpha 1}}$, $\frac{Вт}{м^2}$ - удельный тепловой поток,

где F – поверхность (площадь), $м^2$;

T – время, с;

$\alpha 1$ – коэффициент теплоотдачи от первой жидкости к стенке, $\frac{Вт}{м^2 К}$;

$1/\alpha 1$ – термическое сопротивление теплоотдачи, $м^2$ К /Вт.

$R_{теплоотд.} = 1/\alpha$, $м^2$ К /Вт.

Количества тепла, которое отдает вторая стенка второй жидкости, определяется по формулам:

$Q = \alpha 2(t_{с2} - t_{ж2}) \cdot FT$, Дж - количество тепла;

$Q = \alpha 2(t_{с2} - t_{ж2}) \cdot F$, Вт - тепловой поток;

$q = \alpha 1(t_{с2} - t_{ж2})$, $\frac{Вт}{м^2}$ - удельный тепловой поток;

$q = \frac{t_{с2} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha 1}}$, $\frac{Вт}{м^2}$ - удельный тепловой поток.[3]

Совместный процесс теплопроводности и конвекции называется конвективным теплообменом. Конвективный теплообмен - перенос тепла соприкосновением.

Коэффициент теплоотдачи зависит от следующих факторов:

1. Характера конвекции:

а) свободная конвекции (естественная) происходящие из-за разности плотности нагретых и холодных жидкостей;

б) вынужденная конвекции происходит под действием внешних сил (насоса, вентилятора).

2. Режима течения жидкости:

а) ламинарный (медленное течение, без перемешивания частиц жидкости);

б) турбулентный (бурное течение с перемешиванием частиц жидкости).

3. Скорости движения теплоносителя.

4. Направления теплового потока

[3]Шапошников В.В. Общая энергетика. Учебное пособие. - Краснодар: Издательство ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2020.

а) нагревание;

б) охлаждение.

5. Физических свойств теплоносителя

а) коэффициента теплопроводности λ, Вт/м К;

б) теплоемкости c_p, кДж/кг К;

в) плотности ρ, $\frac{кг}{м^3}$;

г) вязкости:

ν, $\frac{м^2}{с}$ – кинематическая вязкость

μ, Па с – динамическая вязкость

6. Формы стенки и её размеров.

7. Температурного напора (разности температур между температурой стенки и температурой жидкости).

Установить зависимость коэффициента теплоотдачи от перечисленных факторов теоретическим путём невозможно. Для определения коэффициента теплоотдачи (α) проводились опыты на моделях, подобных самим аппаратом в которых проходят явления теплоотдачи.

При конвективном теплообмене существует однозначная зависимость между комплексами величин, которые характеризуют процессы теплообмена. Эти комплексы называются критериями подобия.

1. Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$$

где w – скорость жидкости, м/с;

l – определяющий геометрический размер, м

(для труб d – диаметр, для вертикальной плоскости h – высота, для горизонтальной поверхности l – длина);

ν – кинематическая вязкость в жидкости, $м^2$ /с.

2. Критерий Прандтля

$$Pr = \frac{\nu \rho C_p}{\lambda}$$

где ρ – плотность, кг/м^3;

C_p – теплоемкость, Дж/кг К;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м К

3. Критерий Грасгофа для свободной (естественной) конвекции

$$Gr = \frac{\beta g \rho^3 \Delta t}{\nu^2}$$

где β – температурный коэффициент объемного расширения, к$^{-1}$;

$$\beta = \frac{1}{t + 273},$$

где g – ускорение свободного падения, м/с ^{2}, g = 9,81 м/с ^{2};

Δt – разность температур между жидкостями и стеной (температурный напор), С.

4. Критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м^2 К.

Критерий Нуссельта зависит от критерия Рейнольдса, критерия Прандтля, критерия Грасгофа.

$$Nu = f(Re, Pr, Gr)$$

После определения всех критериев определяется коэффициент теплоотдачи α, Вт/м2 К, по формуле

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$

Для трубы некруглого сечения используется понятие эквивалентного диаметра, который определяется по формуле

$$d_э = \frac{4F}{U}$$

где F – площадь сечения трубы, м^2;

U – периметр, м.[4]

Теплопередача -теплообмен между двумя средами через разделяющую их твердую стенку.

---

[4]Шапошников В.В. Общая энергетика. Учебное пособие. - Краснодар: Издательство ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2020.

Удельный тепловой поток, проходящий через плоскую однослойную стенку определяется по формуле

$$q = \frac{t_1 - t_2}{1/\alpha_1 + d/\lambda + 1/\alpha_2}, \text{Вт/м}^2$$

Коэффициент теплопередачи K, Вт/м^2 K, определяется по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Уравнение теплопередачи

$Q = K(t_1 - t_2)\, F\, \tau$, Дж - количество тепла

$Q = K(t_1 - t_2)\, F$, Вт – тепловой поток

$q = K(t_{ж1} - t_{ж2})$, Вт/м^2 - удельный тепловой поток, где K – коэффициент теплопередачи, Вт/м^2 K;

t_1-температура первой жидкости, °C;

t_2-температура первой жидкости, °C;

F - поверхность, м^2;

τ - время, с.

Термическое сопротивление теплопередаче определяется по формуле

R= 1/K , м^2 K/Вт

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

Удельный тепловой поток, проходящий через плоскую многослойную стенку, определяется по формуле:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{a_1} + \frac{d_1}{l_1} + \frac{d_2}{l_2} + \frac{d_3}{l_3} + \frac{1}{a_2}} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{a_1} + \sum \frac{d_i}{l_i} + \frac{1}{a_2}}, \text{Вт/м}^2$$

Коэффициент теплопередачи для плоской многослойной стенки определяется по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \sum \frac{d_i}{l_i} + \frac{1}{a_2}}, \text{Вт/м}^2 \text{Ж}^5$$

[5]Шапошников В.В. Общая энергетика. Учебное пособие. - Краснодар: Издательство ФГБОУ ВО

Энергия излучения переносится электромагнитными колебаниями и фотонами. Генерация лучистой энергии происходит в результате сложных внутриатомных и молекулярных процессов. Всякое тело, имеющее температуру, отличную от абсолютного нуля, способно излучать лучистую энергию. Наряду с потоком лучистой энергии от более нагретых тел к менее нагретым всегда имеется и обратный поток энергии от менее нагретых тел к более нагретым. Конечный результат такого обмена и представляет собой количество переданной излучением теплоты. Лучистый теплообмен связан с двойным превращением энергии: на поверхности тела-излучателя теплота трансформируется в энергию электромагнитных колебаний, которая распространяется в лучепрозрачной среде (или в вакууме) и при поглощении ее каким-либо другим телом вновь.

Излучение всех тел зависит от температуры. С увеличением температуры излучение увеличивается, так как увеличивается внутренняя энергия тела. При излучении интенсивность передачи теплоты значительно больше зависит от температуры, чем при теплопроводности и конвекции. Поэтому при низких температурах главную роль играет конвективный теплообмен, а при высоких – теплообмен излучением.[6]

Лучистый теплообмен (теплообмен излучением или радиацией) – может происходить между телами, находящимися на расстоянии друг от друга.

В зависимости от длины волны излучения классифицируются следующим образом:

- ультрафиолетовое излучение (длина волны) 0,05...04 мкм;

- световое (видимое излучение) 0,4...0,76 мкм;

- инфракрасное излучение 0,76...1000 мкм.

Тепловому излучению соответствует область длины волны 0,4...25 мкм.

Процесс теплообмена излучением между двумя телами состоит из трех последующих процессов:

«КубГТУ», 2020.

[6]Шапошников В.В. Общая энергетика. Учебное пособие. - Краснодар: Издательство ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2020.

1. Превращение тепловой энергии первого тела в энергию электромагнитных волн.

2. Перенос энергии в пространстве в форме энергии электромагнитных волн от первого тела к второму.

3. Превращение энергии электромагнитных волн в тепловую энергию второго тела.

Излучение свойственно всем телам.

Тем выше температура, тем выше излучение.

Тела обладают поглощательной, отражательной и пропускной способностями.

Тела, полностью поглощающие падающую на них лучистую энергию, называют абсолютно черными. Тела, обладающие свойством пассивного отражения лучистой энергии - абсолютно белые. Тела, полностью пропускающие сквозь себя падающую лучистую энергию - абсолютно прозрачные.

Законы теплового излучения

1. Закон Стефана-Больцмана:

q, E_0 – удельный тепловой поток излучения, Вт/м^2.

Энергия излучения абсолютно черного тела определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4, \ \text{Вт/м}^2,$$

где C_0=5,67 Вт/м^2·К^4 – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Т – абсолютная температура, К.

Излучение реальных тел (серых) определяется по формуле:

$$E = C \left(\frac{T}{100}\right)^4, \ \text{Вт/м}^2,$$

где С – коэффициент излучения данного тела.

$$C = C_0 \varepsilon, \ \text{Вт/м}^2,$$

где ε – степень черноты тела.

Степень черноты – отношение излучательной особенности данного тела к излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре.

$$e = \frac{E}{E_0} = \frac{C}{C_0}$$

Закон Ламберта

Количество энергии, излучаемой поверхностью абсолютно черного тела по разным направлениям, пропорционально косинусу угла между заданным направлением и перпендикуляром к поверхности тела.

$$E_j = E_н \times \cos j ,$$

где $E_н$ – количество энергии, посылаемой по нормали.

Наибольшее количество энергии излучается в направлении, перпендикулярном к поверхности.

Интенсивность излучения по касательной к поверхности равна нулю.[7]

Список использованной литературы

[7]Шапошников В.В. Общая энергетика. Учебное пособие. - Краснодар: Издательство ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2020.

1. Куликов А.А., Иванова И.В., Верхоланцев А.А., Егоров М.Ю., Дюкова И.Н. Теплообмен. Теплопроводность. Учебное пособие для студентов бакалавриата всех форм обучения направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2021. – 88 с.

2. Шапошников В.В. Общая энергетика. Учебное пособие. - Краснодар: Издательство ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2020. – 287 с.