

## Лекция 4 «Теплопередача при стационарном режиме. Теплопередача через плоскую стенку. Теплопередача через цилиндрическую стенку. Средний температурный напор. Определение средних температур теплоносителей. Тепловая изоляция»

**Цель:** Опишите теплопередачу при стационарном режиме. Охарактеризуйте теплопередачу через плоскую стенку. Проанализируйте теплопередачу через цилиндрическую стенку. Опишите средний температурный напор. Дайте определение средних температур теплоносителей. Охарактеризуйте тепловую изоляцию.

**Краткий конспект лекции:** Теплопередачей называется теплообмен между двумя средами через разделяющую их перегородку. Теплопередача является сложным видом теплообмена, в котором участвуют две среды и тело. Кроме того, в нём действуют одновременно и совместно все элементарные явления переноса теплоты (теплопроводность, конвекция, лучеиспускание).

Обычно при расчетах один из видов теплообмена принимается за основной, а другой вид теплообмена второстепенным. Например, если конвективный теплообмен значительно превышает лучистый, он принимается за основной и расчетная формула для общего теплообмена имеет следующий вид:

$$q_o = (\alpha_k + \alpha_l)(t_c - t_n) = \alpha_o(t_c - t_n) \quad (1)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $\alpha_l$  – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием;  $\alpha_o$  – общий (суммарный) коэффициент теплоотдачи;  $t_c$  – температура среды;  $t_n$  – температура поверхности стенки.

Количество переданной теплоты теплопередачей при стационарном режиме определяется по основному уравнению теплопередачи:

$$Q = KF\Delta t \quad (2)$$

где  $Q$  – количество переданной теплоты, Вт;  $\Delta t = t_r - t_x$ , °С;  $t_r$  – температура горячего теплоносителя, °С;  $t_x$  – температура холодного теплоносителя, °С;  $F$  – теплообменная поверхность, м<sup>2</sup>;  $K$  – коэффициент теплопередачи, размерность которого получается из основного уравнения:

$$[K] = \left[ \frac{Q}{K\Delta t} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{с}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}} \right] = \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}} \right] \quad (3)$$

Коэффициент теплопередачи представляет собой количество теплоты, переданной через единицу поверхности в единицу времени от одного теплоносителя к другому при разности температур между ними в один градус. Коэффициент теплопередачи связывает между собой коэффициент теплопроводности и теплоотдачи.

### Теплопередача через плоскую стенку

Рассмотрим случай, когда две среды разной температуры разделены однородной плоской стенкой, ширина и высота которой достаточно велики по сравнению с ее толщиной (рис. 1).

Коэффициент теплопроводности стенки –  $\lambda$  и толщина её –  $\delta$ . Температура –  $t_{cm_1}$  и  $t_{cm_2}$ , причём  $t_{cm_1} > t_{cm_2}$ . Температура поверхностей стенки неизвестны, обозначим их как  $t_{n_1}$  и  $t_{n_2}$ . Суммарный коэффициент теплоотдачи со стороны горячего теплоносителя равен  $\alpha_1$ , а со стороны холодного –  $\alpha_2$ .

По условию задачи температурное поле одномерно, режим стационарный. В этом случае вся теплота, переданная от горячего теплоносителя к поверхности стенки, проходит сквозь стенку и отдаётся холодному теплоносителю, т.е. указанные количества теплоты равны между собой. Следовательно, для теплового потока  $q$ , где  $q = \frac{Q}{F\tau}$ , можно написать систему их трёх уравнений:

$$\begin{aligned} q &= \alpha_1(t_{cm_1} - t_{n_1}), \\ q &= \frac{\lambda}{\delta}(t_{n_1} - t_{n_2}), \\ q &= \alpha_2(t_{n_2} - t_{cm_2}), \end{aligned} \quad (4)$$

Из уравнений (4) находятся частные температурные напоры:

$$\begin{aligned} t_{cm_1} - t_{n_1} &= q \frac{1}{\alpha_1}, \\ t_{n_1} - t_{n_2} &= q \frac{\delta}{\lambda}, \\ t_{n_2} - t_{cm_2} &= q \frac{1}{\alpha_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

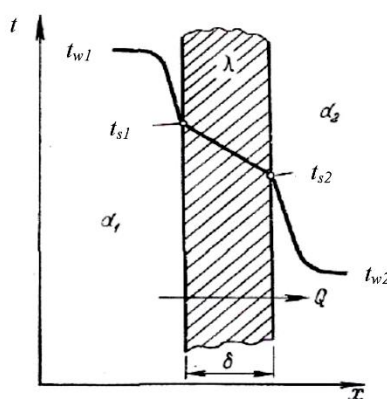


Рис. 1. К выводу уравнения теплопередачи через плоскую стенку

После сложения левых и правых частей уравнений (5) получается выражение для полного температурного напора

$$t_{cm_1} - t_{cm_2} = q \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (6)$$

откуда определяется значение удельного теплового потока:

$$q = \frac{t_{cm_1} - t_{cm_2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (7)$$

Слагаемое  $\frac{\delta}{\lambda}$  представляет собой термическое сопротивление стенки, а  $\frac{1}{\alpha_1}$  и  $\frac{1}{\alpha_2}$  являются термическими сопротивлениями теплопередаче от горячего теплоносителя к холодному.

Согласно формуле (7), тепловой поток прямо пропорционален разности температур между двумя теплоносителями и обратно пропорционален сумме термических сопротивлений.

Вводя обозначение:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (8)$$

в выражение (8), получим

$$q = K(t_{cm_1} - t_{cm_2}) \quad (9)$$

Величина  $K$  называется коэффициентом теплопередачи. Он устанавливает связь между элементарными видами теплообмена через коэффициенты теплоотдачи и коэффициент теплопроводности.

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется полным термическим сопротивлением теплопередачи:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (10)$$

где  $\left(\frac{\delta}{\lambda}\right)$  – термическое сопротивление стенки;  $\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)$  – являются термическими сопротивлениями теплоотдачи от горячего теплоносителя к холодному [2,3].

### *Теплопередача через цилиндрическую стенку*

Цилиндрическая стенка разделяет горячую и холодную жидкости с температурами  $t_{cm_1}$  и  $t_{cm_2}$ . Температуры поверхностей стенки неизвестны, обозначим их через  $t_{n_1}$  и  $t_{n_2}$ . Суммарный коэффициент теплоотдачи от горячей жидкости, протекающей внутри трубы, равен  $\alpha_1$ , а к холодной –  $\alpha_2$ .

В условиях стационарного режима количество теплоты, отданное горячей и воспринятое холодной жидкостями, одно и то же, следовательно, можно написать:

$$\begin{aligned} q_l &= \alpha_1 \pi d_1 (t_{cm_1} - t_{n_1}), \\ q_l &= \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_{n_1} - t_{n_2}), \\ q_l &= \alpha_2 \pi d_2 (t_{n_2} - t_{cm_2}). \end{aligned} \quad (11)$$

Решив эти уравнения относительно разности температур, получим:

$$\begin{aligned} t_{cm_1} - t_{n_1} &= \frac{q_l}{\alpha_1 \pi d_1}, \\ t_{n_1} - t_{n_2} &= \frac{q_l \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi\lambda}, \\ t_{n_2} - t_{cm_2} &= \frac{q_l}{\alpha_2 \pi d_2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Складывая уравнения (12), получим полный температурный напор

$$t_{cm_1} - t_{cm_2} = \frac{q_l}{\pi} \left( \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right) \quad (13)$$

Откуда значение теплового потока:

$$q_l = \frac{\pi(t_{cm_1} - t_{cm_2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} \quad (14)$$

Введём следующее обозначение

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} \quad (15)$$

После подстановки этого равенства в (14) окончательно получим:

$$q_l = K_l \pi (t_{cm_1} - t_{cm_2}) \quad (16)$$

В отличие  $K$  величина  $K_l$  представляет собой линейный коэффициент теплопередачи, отнесённый к единице длины трубы, а не к единице ее поверхности. Соответственно  $K_l$  выражается в  $Вт/(м·К)$  [2,3].

### **Средний температурный напор. Определение средних температур теплоносителей**

Процессы теплопередачи при постоянных температурах распространены относительно мало. Такие процессы протекают, например, в том случае, если с одной стороны стенки конденсируется пар, а с другой – кипит жидкость. Наиболее часто теплопередача в промышленной аппаратуре протекает при переменных температурах теплоносителей. Температуры теплоносителей обычно изменяются вдоль поверхности, разделяющей их стенки.

Теплопередача при переменных температурах зависит от взаимного направления движения теплоносителей. В непрерывных процессах теплообмена возможны следующие варианты направления движения жидкостей друг относительно друга вдоль разделяющей их стенки:

- 1) параллельный ток, или прямоток, при котором теплоносители движутся в одном и том же направлении;
- 2) противоток, при котором теплоносители движутся в противоположных направлениях;
- 3) перекрёстный ток, при котором теплоносители движутся взаимно перпендикулярно друг другу;
- 4) смешанный ток, при котором один из теплоносителей движется в одном направлении, а другой – как прямотоком, так и противотоком к первому.

Движущая сила процессов теплопередачи при переменных температурах изменяется в зависимости от вида взаимного направления движения теплоносителей. Поэтому в уравнение теплопередачи следует подставить среднее значение температурного напора

$$Q = KF\Delta t_m \quad (17)$$

После сокращения обеих частей уравнения на  $KF$  получим значение среднетемпературного напора

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}} \quad (18)$$

Уравнение (18) остаётся верным и для определения среднелогарифмического температурного напора при движении жидкости противотоком.

Если температура рабочих жидкостей вдоль поверхности изменяется незначительно, т.е. удовлетворяется условие

$$\frac{\Delta t_n}{\Delta t_k} < 2,$$

то средний температурный напор можно вычислять как среднее арифметическое из крайних напоров

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{2} \quad (19)$$

Для смешанного тока и перекрёстного тока

$$\Delta t_m = \varepsilon_{\Delta t} \Delta t_{np}, \quad (20)$$

где  $\varepsilon_{\Delta t}$  – поправочный коэффициент к средней разности температур  $\Delta t_{np}$ , вычисленный для противотока [2,3].

### **Тепловая изоляция**

Для снижения теплопередачи необходимо увеличить термическое сопротивление. Это достигается путём нанесения на стенку слоя тепловой изоляции.

Тепловой изоляцией называется всякое вспомогательное покрытие, которое способствует снижению потери теплоты в окружающую среду. Выбор и расчёт изоляции производится с учётом соображений экономического характера и требований технологии и санитарии.

Толщина изоляции для плоских стенок определяется непосредственно из формулы (7), а для трубопроводов из формулы (14) через  $d_2$ , или отношение  $\frac{d_2}{d_1}$ , где  $d_1$  – диаметр голого и  $d_2$  – изолированного трубопроводов.

Для трубопроводов определение толщины изоляции усложняется тем, что  $d_2$  в расчётное уравнение входит не только в форме  $\ln \frac{d_2}{d_1}$ , но и в виде члена  $\frac{1}{\alpha_2 d_2}$ . Тепловые потери изолированных трубопроводов уменьшаются не пропорционально увеличению толщины изоляции. Это обстоятельство объясняется тем, что при увеличении толщины термическое сопротивление слоя изоляции увеличивается:

$$R_{uz} = \frac{1}{2\lambda_{uz}} \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (21)$$

а термическое сопротивление теплоотдачи в окружающую среду уменьшается:

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha_2 d_2} \quad (22)$$

Во избежание большой толщины при изоляции трубопроводов применяют материалы с малым коэффициентом теплопроводности. Максимальные тепловые потери наблюдаются при некотором значении диаметра, который называется критическим диаметром изоляции:

$$d_{2кр} = \frac{2\lambda}{\alpha_2}, \quad (23)$$

где  $d_{2кр}$  – критический диаметр изоляции при котором будет максимум потерь теплоты, мм;  $\lambda$  – теплопроводность изоляции;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности в окружающую среду [3].

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Приведите основное уравнение теплопередачи.
2. Каков физический смысл коэффициента теплопередачи.
3. Выведите уравнение для удельного теплового потока (теплопередачу) через плоскую стенку.
4. Что такое термическое сопротивление стенки и как оно рассчитывается?
5. Выведите уравнение для удельного теплового потока (теплопередачу) через цилиндрическую стенку.

6. Приведите возможные варианты направления движения жидкостей друг относительно друга вдоль разделяющей их стенки в непрерывных процессах теплообмена.
7. Объясните физический смысл среднего значения температурного напора в уравнении (17).
8. Что называют тепловой изоляцией.
9. По какому уравнению можно рассчитать термическое сопротивление слоя изоляции?
10. Какую величину называют критическим диаметром изоляции. Опишите средний температурный напор. Дайте определение средних температур теплоносителей.

### **Литература**

1. Лекции по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии»: учебно-методическое пособие / составители: Ж.Т. Ешова, Д.Н. Акбаева. – Алматы: Қазақ университеті, 2017. – 392 с. – 40 экз.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с.