

**ЛЕКЦИЯ 9**  
**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ**  
**УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ И ПРИ ИЗМЕНЕНИИ**  
**АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ. ЗАКОН ФУРЬЕ**

**Перенос энергии в форме теплоты. Понятие о теплоотдаче и теплопередаче**  
**Механизмы переноса теплоты**

Процесс переноса теплоты называют теплообменом. В химической технологии принято называть жидкости или газы, участвующие в теплообмене, теплоносителями. В процессах теплообмена всегда присутствуют, как минимум, два теплоносителя - горячий и холодный.

Перенос теплоты осуществляется тремя способами (механизмами):

1. Теплопроводность – это молекулярный перенос теплоты между непосредственно соприкасающимися телами или частицами одного тела с различной температурой, при котором происходит обмен энергией движения структурных частиц (молекул, атомов, свободных электронов). В чистом виде теплопроводность наблюдается только в неподвижных средах - твердых телах.
2. Перенос теплоты конвекцией. Такой способ возможен только в подвижных средах, т.е. в жидкостях и газах. Теплота переносится макрообъемами среды при их перемещении под действием каких-либо сил. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью
3. Перенос теплоты излучением. В этом случае энергия переносится в виде электромагнитных волн через оптически прозрачную среду. При этом внутренняя энергия переходит в лучистую, которая впоследствии поглощается другими телами. В чистом виде такой механизм наблюдается в вакууме. Пример – Солнце и планеты.

В химической технологии существуют все три механизма переноса теплоты:

- \* в жидкостях – это конвекция и теплопроводность;
- \* в твердых телах – только теплопроводность;
- \* в газах – это одновременно теплопроводность, конвекция и излучение.

При описании процессов теплообмена, происходящих в промышленном оборудовании, различают два понятия:

1. Теплоотдача - перенос теплоты в пределах одной фазы от границы раздела или от стенки к жидкому (газообразному) теплоносителю (или наоборот);
2. Теплопередача - перенос теплоты от горячего теплоносителя к холодному через границу раздела или через разделяющую теплоносители теплопередающую твердую стенку.

Расчет теплообменной аппаратуры заключается в следующем:

1. Определение тепловых нагрузок или тепловых потоков отдельных аппаратов;
2. Определение требуемой поверхности теплопередачи с целью дальнейшего расчета основных размеров тепловых аппаратов.

### Уравнения тепловых балансов при изменении и без изменения агрегатного состояния

Количество теплоты, передаваемого от более нагретого тела к менее нагретому за единицу времени, можно охарактеризовать величиной теплового потока  $\dot{Q}$  (Вт) или величиной удельного теплового потока (плотность потока)  $\dot{q}$  (Вт/м<sup>2</sup>);

$$\dot{q} = \dot{Q} / A$$

где  $A$  - поверхность теплообмена (м<sup>2</sup>).

Теплообменник - аппарат, в котором происходит теплообмен между двумя теплоносителями: горячим (индекс 1) и холодным (индекс 2) (Рис.9.1.)

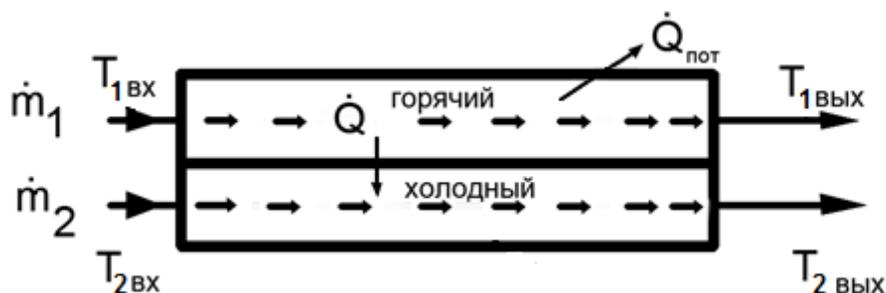


Рис.9.1. Схема потоков в теплообменном аппарате

В теплообменнике: массовые расходы горячего и холодного теплоносителей,  $\dot{m}_1$  и  $\dot{m}_2$ , соответственно; температуры горячего теплоносителя на входе  $T_{1вх}$  и выходе  $T_{1вых}$ ; температуры холодного теплоносителя на входе  $T_{2вх}$  и выходе  $T_{2вых}$ .

Количество теплоты, отдаваемой в единицу времени горячим теплоносителем  $\dot{Q}_1$  и получаемое холодным теплоносителем  $\dot{Q}_2$ , определяется по формуле:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{ном} \quad (9.1)$$

$$\dot{Q}_1 = H_{1вх} - H_{1вых} \quad (9.2)$$

$$\dot{Q}_2 = H_{2вых} - H_{2вх} \quad (9.3)$$

где  $H_{1ex}$  и  $H_{1вблх}$  – энтальпии горячего теплоносителя при температурах на входе в аппарат и выходе из аппарата, соответственно, Вт;

$H_{2ex}$  и  $H_{2вблх}$  – энтальпии холодного теплоносителя при температурах на входе в аппарат и выходе из аппарата, соответственно, Вт;

$\dot{Q}_{nom}$  – тепловые потери в окружающую среду, Вт.

### **Уравнения тепловых балансов без изменения агрегатного состояния теплоносителей**

Если теплоноситель не изменяет своего агрегатного состояния, для определения количества теплоты формулы (9.2) и (9.3) можно преобразовать к виду:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 c_1 (T_{1ex} - T_{1вблх}) \quad (9.4)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 c_2 (T_{2вблх} - T_{2ex}) \quad (9.5)$$

$\dot{m}_1$  и  $\dot{m}_2$  – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с;

$c_1$  – удельная изобарная теплоемкость горячего теплоносителя (Дж/кг·К) при его средней температуре  $T_{1cp} = \frac{T_{1ex} + T_{1вблх}}{2}$ ;

$c_2$  – удельная изобарная теплоемкость холодного теплоносителя (Дж/кг·К) при его средней температуре  $T_{2cp} = \frac{T_{2ex} + T_{2вблх}}{2}$ .

### **Уравнения тепловых балансов с изменением агрегатного состояния теплоносителей**

1. Если теплоноситель изменяет свое агрегатного состояния, например, конденсируется насыщенный пар, то для определения количества теплоты формулу (9.2) можно записать следующим образом:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 h_{1пара} - \dot{m}_1 c_{1вблх} T_{1вблх} \quad (9.6)$$

$\dot{m}_1$  – массовый расход пара, кг/с;

$h_{1пара}$  – удельная энтальпия конденсирующегося пара, (Дж/кг);

$c_{1вблх}$  – удельная изобарная теплоемкость конденсата при температуре  $T_{1вблх}$ . (Дж/кг·К).

Если конденсат пара выводится при температуре конденсации, т.е.  $T_{1вблх} = T_{1конд}$ , можно записать:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 (h_{1пара} - c_{1конд} T_{1конд}) = \dot{m}_1 r_1 \quad (9.7)$$

$r_1$  – удельная теплота конденсации насыщенного пара (Дж/кг).

2. В случае, если жидкий теплоноситель кипит, то для определения количества теплоты формулу (9.3) можно записать следующим образом:

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 (h_{2\text{пара}} - c_{2\text{жид}} T_{2\text{жид}}) = \dot{m}_2 r_2 \quad (9.8)$$

$\dot{m}_2$  – массовый расход кипящей жидкости;

$h_{2\text{пара}}$  – удельная энтальпия образующегося при кипении пара;

$c_{2\text{жид}}$  – удельная изобарная теплоемкость жидкости при температуре кипения  $T_{2\text{жид}}$  ;

$r_2$  – удельная теплота парообразования жидкости.

## Молекулярный и конвективный перенос.

### Феноменологический закон теплопроводности Фурье

*Температурным полем* называют совокупность значений температур во всех точках рассматриваемой среды. Оно характеризует распределение температур в пространстве и во времени, может быть стационарным или нестационарным.

*Изотермическая поверхность* – геометрическое место точек в среде с одинаковой температурой.

*Температурный градиент* – вектор, направленный в сторону максимального возрастания температуры, т.е. являющийся производной по нормали к изотермической поверхности.

$$\left( \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right) = \text{grad}T,$$

где  $\vec{n}$  – единичный вектор, «нормальный» к изотермической поверхности.

Фурье экспериментально установил, что при переносе теплоты теплопроводностью удельный тепловой поток  $\dot{q}$  пропорционален градиенту температур, т.е.:

$$\dot{q} = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = -\lambda_T \text{grad}T, \quad (9.9)$$

где  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)). Знак "-" указывает, что теплота переносится в сторону уменьшения температуры.

Уравнение (9.9) называется *феноменологическим законом теплопроводности Фурье*.

Коэффициент теплопроводности для металлов равен  $10 \div 400$  Вт/(м·К); для жидкостей  $0,2 \div 0,7$  Вт/(м·К); для газов  $0,01 \div 0,06$  Вт/(м·К).

## Перенос теплоты конвекцией

### Уравнение теплоотдачи

Перенос теплоты конвекцией осуществляется движущимися макрообъемами подвижной среды - жидкостью или газом. Различают:

1. Естественную (свободную конвекцию), которая вызвана разностью плотностей в различных точках объема (например, из-за разности температур);
2. Вынужденную конвекцию, возникающую в условиях принудительного движения жидкостей и газов с применением мешалок и насосов.

Конвективный перенос намного интенсивнее молекулярной теплопроводности. В ядре потока, в турбулентной области, теплота переносится в основном конвекцией, а вблизи границы раздела или твердой стенки - только теплопроводностью.

Главное термическое сопротивление переносу теплоты из ядра потока к твердой стенке или наоборот сосредоточено в тепловом пограничном слое. Уменьшая его толщину перемешиванием или увеличивая скорость потока, можно интенсифицировать теплоотдачу.

Толщина теплового пограничного слоя пропорциональна коэффициенту температуропроводности  $a$ , м<sup>2</sup>/с:

$$a = \frac{\lambda_T}{c_p \rho}, \quad (9.10)$$

Толщина гидродинамического пограничного слоя пропорциональна коэффициенту кинематической вязкости  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ , м<sup>2</sup>/с,

т.е.  $\delta_{\text{тепл}} \sim a$ ,  $\delta_{\text{гидр}} \sim \nu$ .

Отношение  $Pr = \frac{\nu}{a}$  называется теплообменным критерием Прандтля.

В общем случае  $\delta_{\text{тепл}} \neq \delta_{\text{гидр}}$ .

Если  $Pr = 1$ , то толщина теплового пограничного слоя равна толщине гидродинамического пограничного слоя. Такая картина характерна для газов. При этом будет наблюдаться подобие поля температур и поля скоростей, появляется возможность моделирования одного процесса другим.

Таким образом, можно сделать вывод, что теплоотдача - процесс достаточно сложный. Математически описать ее не просто, т.к. неизвестен температурный градиент у стенки, также неизвестен профиль температур вдоль поверхности теплообмена.

Уравнение для описания теплоотдачи было экспериментально получено И.Ньютоном. Он установил, что скорость переноса теплоты пропорциональна разности температур между ядром потока теплоносителя и температурой на стенке.

Уравнение теплоотдачи:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A (T - T_{cm}) \quad (9.11)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К,  $T$  - температура в ядре потока теплоносителя,  $T_{cm}$  - температура стенки,  $A$  - поверхность стенки, м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  показывает, сколько теплоты в единицу времени передается через единицу поверхности из ядра потока к разделяющей теплоносители стенке (или наоборот - от стенки в ядро потока) при разности температур между ядром потока и стенкой в 1 градус. Использование этой зависимости для расчета теплоотдачи на практике достаточно сложно, т.к. неизвестна температура стенки.

Величина коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  зависит от множества параметров: скорости движения теплоносителя, геометрических размеров аппарата, физическо-химических свойств (плотности, вязкости, теплоемкости и теплопроводности теплоносителя), состояния поверхности и т.д.

Получить значения коэффициента теплоотдачи аналитически, решая уравнения описывающие теплообмен, затруднительно. Поэтому, также как и в гидравлике, приходится применять теорию подобия, обобщая опытные данные в виде критериальных зависимостей для типовых случаев теплоотдачи.