

### Задание:

1. Рассмотреть алгоритм решения задач практических занятий.
2. Решить задачи к практическим занятиям согласно списку:

**Вариант 1:** Банкетов, Бузин, Волнухина, Ермиличев, Захарова;  
Краснощекова, Кузнецов, Медведева, Лынный; Мустафин;

**Вариант 2:** Неповиннова, Осипова, Пундикова, Санкевич, Сатин;  
Сердягин, Токторов, Ханвалиева, Хорошев, Щербаков

4. Выполненное задание отправить на эл. почту [bandreeva68@mail.ru](mailto:bandreeva68@mail.ru) не позже 15.00 14.05.2020

### Практическое занятие

#### Решение задач по теме «Тепловые процессы».

#### Уравнение теплового баланса.

Количество теплоты, переносимой в единицу времени, называют *тепловым потоком*. Если теплоносители не меняют своего агрегатного состояния (не происходит их конденсации и испарения), то уравнение теплового баланса (1) принимает вид

$$G_1 * c_1(T_{1н} - T_{1к}) = G_2 * c_2(T_{2к} - T_{2н}) + Q_{п} \quad (1)$$

где  $G_1$ ,  $G_2$  — массовые расходы веществ, участвующих в процессе теплообмена, кг/с;  $c_1$ ,  $c_2$  — удельные теплоемкости этих веществ, Дж/(кг • К);  $T_{1н}$ ,  $T_{1к}$  — начальная и конечная температуры горячего теплоносителя, К;  $T_{2н}$ ,  $T_{2к}$  — начальная и конечная температуры холодного теплоносителя, К;  $Q_{п}$  — тепловые потери, Вт.

Если теплообмен между двумя средами сопровождается фазовым переходом (кипение, конденсация), в уравнениях теплового баланса необходимо учитывать теплоту фазового перехода. Для конденсатора, в котором происходит конденсация паров горячего теплоносителя вследствие нагревания холодного теплоносителя, уравнение теплового баланса имеет вид

$$G_1 * r_1 = G_2 * c_2(T_{2к} - T_{2н}) + Q_{п} \quad (2)$$

где  $r_1$  — удельная теплота конденсации горячего теплоносителя, Дж/кг.

**Задача 1.** Требуется при атмосферном давлении конденсировать 30 т/час бензола. Температура конденсации бензола 80°C. Удельная теплота конденсации бензола 395 кДж/кг). В качестве хладагента используется обратная вода, которая нагревается от 20°C до 45°C. Удельная теплоемкость воды 4,18 кДж/кг\*К. Плотность воды  $\rho_v$  996 кг/м<sup>3</sup>. Потерей теплоты в

окружающую среду пренебречь. Определить расход охлаждающей воды в  $\text{м}^3/\text{час}$ .

**Решение:**

Т.к. по условию задачи  $Q_{\text{п}}=0$ , уравнение теплового баланса имеет вид  $G_{\text{б}} \cdot r_{\text{б}} = G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} (T_{\text{вк}} - T_{\text{вн}})$

Т.к. массовый расход бензола задан в т/час, необходимо включить в расчет перевод в кг/с:

$$G_{\text{в}} = G_{\text{б}} \cdot r_{\text{б}} / c_{\text{в}} (T_{\text{вк}} - T_{\text{вн}}) = 30 \cdot 1000 \text{ кг} / 3600 \text{ с} \cdot 395 \text{ кДж/кг} / 4,18 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К} \cdot (45 - 20) \text{ К} = 31,5 \text{ кг/с}.$$

Для того, чтобы определить расход охлаждающей воды в  $\text{м}^3/\text{час}$ , используем плотность воды:

$$V_{\text{в}} = 31,5 \text{ кг/с} \cdot 3600 / 996 \text{ кг/м}^3 = 114 \text{ м}^3/\text{час}$$

**Задача 2.** Требуется испарять этиловый спирт в количестве 15 т/час. Этанол в кипятильник подаётся при температуре кипения при атмосферном давлении  $78^\circ\text{C}$ . В качестве теплоносителя используется водяной пар с абсолютным давлением 4 ат. (температура конденсации  $143^\circ\text{C}$ , удельная теплота конденсации водяного пара  $2141 \text{ кДж/кг}$ ). Удельная теплота испарения этанола  $851 \text{ кДж/кг}$ . Потерей теплоты в окружающую среду пренебречь. Определить расход водяного пара в кг/с.

**Решение:**

По условию задачи требуется испарять, т.е. переводить в пар этиловый спирт. Этот процесс требует подвода теплоты. Следовательно, этанол – это холодный поток, а водяной пар – горячий. Причем оба процесса протекают при постоянной температуре – изотермические.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$G_{\text{в}} \cdot r_{\text{в}} = G_{\text{э}} \cdot r_{\text{э}}$$

$$G_{\text{в}} = G_{\text{э}} \cdot r_{\text{э}} / r_{\text{в}} = 15 \cdot 1000 \text{ кг} \cdot 851 \text{ кДж/кг} / 3600 \text{ с} \cdot 2141 \text{ кДж/кг} = 1,66 \text{ кг/с}$$

**Основной закон теплопроводности** — закон Фурье гласит, что количество теплоты  $Q$ , передаваемой теплопроводностью в единицу времени через плоскую стенку, прямо пропорционально ее площади  $S$  и разности температур  $T_{\text{ст1}} - T_{\text{ст2}}$  ее поверхностей и обратно пропорционально толщине стенки  $\delta$ :

$$Q = (\lambda / \delta) S (T_{ст1} - T_{ст2}),$$

где  $\lambda$  — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплопроводности, Вт/(м · К).

**Задача 3.** Определить количество теплоты, которое передается в единицу времени через стенки картера авиадвигателя, если толщина стенок 5,5 мм, площадь поверхности стенок 0,6 м<sup>2</sup>, температура на внутренней поверхности картера 75°С, на наружной 68°С, а средний коэффициент теплопроводности стенок  $\lambda = 175$  Вт/м·К.

### Решение

$$Q = (\lambda / \delta) S (T_{ст1} - T_{ст2}),$$

$$Q = (175 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} / 0,0055 \text{ м}) * 0,6 \text{ м}^2 * (75 - 68) \text{ К} = 1,34 * 10^5 \text{ Вт}.$$

**Основное уравнение теплопередачи.** Количество теплоты, передаваемой в единицу времени, определяется *основным уравнением теплопередачи*.

$$Q = KS (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Численное значение *коэффициента теплопередачи*  $K$  определяется количеством теплоты, которое передается от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку площадью 1 м<sup>2</sup> в течение 1 с при разности температур теплоносителей 1 К. Размерность коэффициента теплопередачи — Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Коэффициент теплопередачи  $K$  можно определить (без учета загрязнений с обеих сторон стенки), решив уравнение:

$$K = 1 / (1/\alpha_1 + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + 1/\alpha_2) \quad (5),$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю соответственно;  $\lambda_{ст}$  — коэффициент теплопроводности стенки;  $\delta_{ст}$  — ее толщина .

**Задача 4.** В котле вода нагревается за счет сжигания угля, толщина стенки котла 20 мм, температура дымовых газов 1000 °С, температура воды 200 °С. Коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_1 = 100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), от стенки к воде  $\alpha_2 = 2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а коэффициент теплопроводности материала стенки 50 Вт/(м·К). Определить количество теплоты, передаваемой в единицу времени, если площадь поверхности котла 15 м<sup>2</sup>.

## Решение

$$Q = KS (T_1 - T_2)$$

$$K = 1 / (1/\alpha_1 + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + 1/\alpha_2) = 1 / (1/100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) + 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}/50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) + 1/2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})) = 91,74 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

$$Q = KS (T_1 - T_2) = 91,74 \cdot 15 \cdot (1000 - 200) = 1,1 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

## Задачи для самостоятельного решения:

Вариант 1	Вариант 2
<p>1. Определить количество теплоты, которое передается в единицу времени через стенку толщиной 20 мм, площадь поверхности 0,1 м<sup>2</sup>, если стенка выполнена из стали (<math>\lambda = 60 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}</math>). Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными и равными 80°C и 50°C.</p>	<p>1. Определить количество теплоты, которое передается в единицу времени через стенку, если стенка выполнена из бетона (<math>\lambda = 1,1 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}</math>). Толщина стенки 50 мм, площадь поверхности 0,5 м<sup>2</sup>. Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными и равными 100°C и 90°C.</p>
<p>2. В котле вода нагревается за счет сжигания угля, толщина стенки котла 10 мм, температура дымовых газов 800 °С, температура воды 150 °С. Коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке <math>\alpha_1 = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})</math>, от стенки к воде <math>\alpha_2 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})</math>, коэффициент теплопроводности материала стенки 25 Вт/(м·К). Определить количество теплоты, передаваемой в единицу времени, если площадь поверхности котла 20 м<sup>2</sup>.</p>	<p>2. В котле вода нагревается за счет сжигания угля, толщина стенки котла 15 мм, температура дымовых газов 700 °С, температура воды 115 °С. Коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке <math>\alpha_1 = 55 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})</math>, от стенки к воде <math>\alpha_2 = 900 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})</math>, коэффициент теплопроводности материала стенки 30 Вт/(м·К). Определить количество теплоты, передаваемой в единицу времени, если площадь поверхности котла 10 м<sup>2</sup>.</p>
<p>3. Требуется при атмосферном давлении конденсировать 25 т/час бензола. Температура конденсации бензола 78 °С. Удельная теплота конденсации бензола 395 кДж/кг.) В качестве хладагента используется обратная вода, которая нагревается от 22°C до 50°C. Удельная теплоемкость воды 4,18 кДж/кг·К. Потерей теплоты в окружающую среду пренебречь. Определить расход охлаждающей воды в кг/с.</p>	<p>3. Требуется испарять этиловый спирт в количестве 10 т/час. Этанол в кипятильник подается при температуре кипения 78 °С. В качестве теплоносителя используется водяной пар с температурой конденсации 135° С, удельная теплота конденсации водяного пара 2141кДж/кг. Плотность воды <math>\rho_v = 990 \text{ кг}/\text{м}^3</math>. Удельная теплота испарения этанола 851 кДж/кг. Потерей теплоты в окружающую среду пренебречь. Определить расход водяного пара в м<sup>3</sup>/час.</p>

## Практическое занятие.

### Решение задач «Средняя разность температур».

Движущей силой тепловых процессов является разность температур взаимодействующих сред. Значения температуры теплоносителей изменяются вдоль поверхности разделяющей их стенки, поэтому в расчетах используют среднюю разность температур  $\Delta T_{\text{ср}}$ .

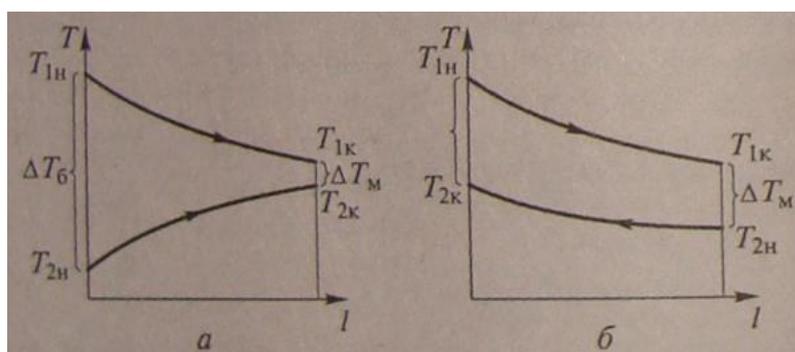


Рис. 1. Характер изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при их прямоточном (а) и противоточном (б) движении:  $T_{1н}$ ,  $T_{1к}$  — начальная и конечная температуры горячего теплоносителя;  $T_{2н}$ ,  $T_{2к}$  начальная и конечная температуры холодного теплоносителя;  $\Delta T_б$ ,  $\Delta T_м$  — большая и меньшая разности температур теплоносителей

На рис. 1 показан характер изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при их прямоточном и противоточном движении. Один из теплоносителей охлаждается от температуры  $T_{1н}$  до  $T_{1к}$ , другой нагревается от  $T_{2н}$  до  $T_{2к}$ . При прямотоке разность температур теплоносителей на входе в теплообменник

$$\Delta T_б = T_{1н} - T_{2н}, \text{ а на выходе из теплообменника } \Delta T_м = T_{1к} - T_{2к}$$

Средняя разность температур находят как среднелогарифмическую величину:

$$\Delta T_{\text{ср}} = (\Delta T_б - \Delta T_м) / \ln(\Delta T_б / \Delta T_м)$$

**Задача 1.** Требуется охладить толуол от температуры кипения  $111^\circ\text{C}$  до  $40^\circ\text{C}$ . Охлаждающая вода нагревается от  $20^\circ\text{C}$  до  $40^\circ\text{C}$ . Определить среднюю разность температур для прямотока и противотока.

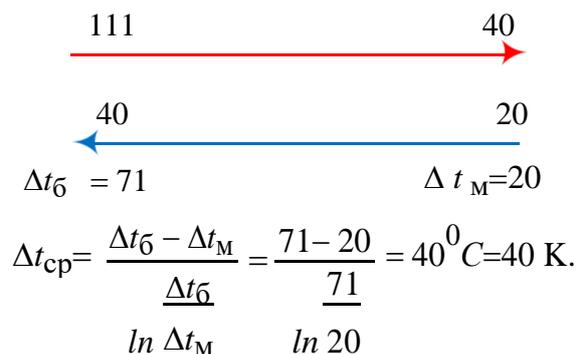
Прежде всего, определяем, какой конкретно процесс передачи теплоты происходит данном случае. Согласно условию, горячий поток (толуол) охлаждается, а холодный (вода) нагревается. Средняя разность температур для прямотока и противотока будет иметь различные значения.

Находим среднюю разность температур для прямотока:



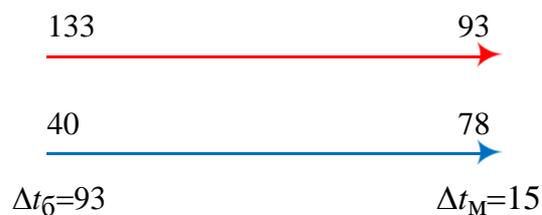
Делаем вывод, что, так как движущая сила процесса на одном из концов аппарата равна нулю, то **организация прямотока невозможна**.

Для противотока:



**Задача 2.** Требуется подогреть этанол от 40°C до температуры кипения 78°C. В качестве теплоносителя используется конденсат водяного пара давлением 3 ат (абс). Температура конденсации при этих условиях 133 °С. Конденсат охлаждается до температуры 93°C. Определить среднюю разность температур для прямотока и противотока.

1. Вычисляем среднюю разность температур для прямотока



$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\frac{\Delta t_{\text{Г}} - \Delta t_{\text{М}}}{\ln \Delta t_{\text{М}}}}{\frac{\Delta t_{\text{Г}}}{\ln 15}} = \frac{93 - 15}{\frac{93}{\ln 15}} = 43^{\circ}\text{C} = 43 \text{ К.}$$

2. Вычислим среднюю разность температур для противотока

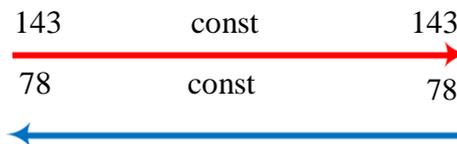
133	93
78	40
$\Delta t_{\text{б}} = 55$	$\Delta t_{\text{М}} = 53$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{М}}}{\Delta t_{\text{б}}}}{\ln \Delta t_{\text{М}}} = \frac{55 - 53}{\ln 55} = 54^{\circ} \text{C} = 54 \text{ K.}$$

**Задача 3.** Требуется испарять этиловый спирт в количестве 15 т/час. Этанол в кипятильник подаётся при температуре кипения при атмосферном давлении 78°C. В качестве теплоносителя используется водяной пар с абсолютным давлением 4 ат. (температура конденсации 143°C, удельная теплота конденсации водяного пара 2141 кДж/кг.). Удельная теплота испарения этанола 851 кДж/кг. Потерей теплоты в окружающую среду пренебречь. Определить среднюю разность температур для прямотока и противотока.

По условию задачи требуется испарять, т.е. переводить в пар этиловый спирт. Этот процесс требует подвода теплоты. Следовательно, этанол – это холодный поток, а водяной пар – горячий. Причем оба процесса протекают при постоянной температуре – изотермические.

Средняя разность температур в рассматриваемом случае не зависит от способа организации теплообмена и равна



$$\Delta t_{\text{ср}} = 143 - 78 = 65^{\circ} \text{C} = 65 \text{ K.}$$

### Задачи для самостоятельного решения:

<b>Вариант 1</b>	<b>Вариант 2</b>
1. Требуется подогреть ацетон от 35°C до температуры кипения 56°C. В качестве теплоносителя используется конденсат водяного пара с температурой 110 °C. Конденсат охлаждается до температуры 75°C. Определить среднюю разность температур для прямотока и противотока.	1. Требуется подогреть метанол от 30°C до температуры кипения 65°C. В качестве теплоносителя используется конденсат водяного пара с температурой 120°C. Конденсат охлаждается до температуры 80°C. Определить среднюю разность температур для прямотока и противотока.
2. Требуется при атмосферном давлении конденсировать бензол. Температура конденсации бензола 80°C. В качестве хладагента используется обратная вода, которая нагревается от 20°C до 45°C. Определить разность температур для прямотока и противотока.	2. Требуется при атмосферном давлении конденсировать гексан. Температура конденсации гексана 69°C. В качестве хладагента используется обратная вода, которая нагревается от 15°C до 40°C. Определить разность температур для прямотока и противотока.