

## Задачи по гидравлике

**Задача 8.** Определить режим течения воды в кольцевом пространстве теплообменника типа «труба в трубе». Наружная труба 96x3,5 мм, внутренняя 57x3 мм, расход воды  $V$  м<sup>3</sup>/ч, кинематический коэффициент вязкости воды  $10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. а)  $V=1,8$  м<sup>3</sup>/ч; б)  $V=2,2$  м<sup>3</sup>/ч; в)  $V=2,6$  м<sup>3</sup>/ч; г)  $V=3,0$  м<sup>3</sup>/ч; д)  $V=3,4$  м<sup>3</sup>/ч; е)  $V=4,0$  м<sup>3</sup>/ч.

**Дано:**

$$d_1 = 89 \text{ мм}$$

$$d_2 = 57 \text{ мм}$$

$$V = 1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Режим течения – ?

**СИ:**

$$0,089 \text{ м}$$

$$0,057 \text{ м}$$

$$5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

**Решение:**

Введем обозначения: нижний индекс 1 относится к наружной трубе, 2 – к внутренней.

Чтобы определить режим течения, необходимо определить критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{\text{экв}}}{\nu}, \quad (8.1)$$

где  $\omega$  – скорость потока,

$d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр межтрубного пространства:

$$d_{\text{экв}} = d_1 - d_2. \quad (8.2)$$

Скорость потока определяется из уравнения расхода:

$$V = \omega \cdot S,$$

$$\omega = \frac{V}{S}, \quad (8.3)$$

где  $S$  – площадь сечения межтрубного пространства:

$$S = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2). \quad (8.4)$$

Подставим (8.4) в (8.3):

$$\omega = \frac{4V}{\pi(d_1^2 - d_2^2)}. \quad (8.5)$$

Подставим (8.2) и (8.5) в (8.1):

$$\text{Re} = \frac{\frac{4V}{\pi(d_1^2 - d_2^2)} \cdot (d_1 - d_2)}{\nu},$$

$$\text{Re} = \frac{4V}{\pi\nu(d_1 + d_2)}. \quad (8.6)$$

Вычислим критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 10^{-6} \cdot (0,089 + 0,057)} = 4360.$$

$2320 < \text{Re} < 10000$ , значит, режим течения – переходная область (между ламинарным и турбулентным течениями).

**Ответ:** переходная область.

**Задача 19.** За какое время заполнится емкость на 200 л, если в неё поступает вода по трубе диаметром 20 мм со скоростью  $\omega$ ? а)  $\omega=1,0$  м/с, б)  $\omega=1,5$  м/с, в)  $\omega=1,6$  м/с, г)  $\omega=1,9$  м/с, д)  $\omega=2,2$  м/с, е)  $\omega=2,5$  м/с.

**Дано:**

$$W = 200 \text{ л}$$

$$d = 20 \text{ мм}$$

$$\omega = 1 \text{ м/с}$$

$$t - ?$$

**СИ:**

$$0,2 \text{ м}^3$$

$$0,02 \text{ м}$$

**Решение:**

Время заполнения емкости равно отношению емкости к расходу:

$$t = \frac{W}{V}. \quad (19.1)$$

Расход воды определяется по формуле:

$$V = \omega \cdot S. \quad (19.2)$$

Площадь сечения трубы:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (19.3)$$

Подставим (19.3) в (19.2):

$$V = \frac{\pi d^2 \omega}{4}. \quad (19.4)$$

Подставим (19.4) в (19.1):

$$t = \frac{4W}{\pi d^2 \omega}. \quad (19.5)$$

Вычислим время:

$$t = \frac{4 \cdot 0,2}{3,14 \cdot 0,02^2 \cdot 1} \approx 637 \text{ с} = 10 \text{ мин } 37 \text{ с}.$$

**Ответ:** 10 мин 37 с.

## Задачи по массообмену

**Задача 8.** В реактор загрузили 6 кг водного раствора NaOH с концентрацией A% (масс.), 3 кг воды и 1 кг NaOH. Найти концентрацию полученного раствора. а) A = 10, б) A = 13, в) A = 17, г) A = 21, д) A = 25, е) A = 30.

**Дано:**

$$m_1^{расв} = 6 \text{ кг}$$

$$A = 10\%$$

$$m_2^{H_2O} = 3 \text{ кг}$$

$$m_2^{NaOH} = 1 \text{ кг}$$

$$w - ?$$

**Решение:**

Введем обозначения: нижний индекс 1 относится к первому раствору до смешивания, 2 – второму.

Концентрацию полученного раствора найдем по формуле:

$$w = \frac{m^{NaOH}}{m^{расв}}, \quad (8.1)$$

где  $m^{NaOH}$  – масса гидроксида натрия в полученном растворе:

$$m^{NaOH} = m_1^{NaOH} + m_2^{NaOH}, \quad (8.2)$$

$m^{расв}$  – масса полученного раствора:

$$m^{расв} = m_1^{расв} + m_2^{H_2O} + m_2^{NaOH}. \quad (8.3)$$

Найдем массу гидроксида натрия в первом растворе:

$$m_1^{NaOH} = A \cdot m_1^{расв}. \quad (8.4)$$

Подставим (8.4) в (8.2):

$$m^{NaOH} = A \cdot m_1^{расв} + m_2^{NaOH}, \quad (8.5)$$

Подставим (8.3) и (8.5) в (8.1):

$$w = \frac{A \cdot m_1^{расв} + m_2^{NaOH}}{m_1^{расв} + m_2^{H_2O} + m_2^{NaOH}}. \quad (8.6)$$

Вычислим концентрацию полученного раствора:

$$w = \frac{0,1 \cdot 6 + 1}{6 + 3 + 1} = 0,16 = 16\%.$$

**Ответ:** 16%.

**Задача 19.** Из ректификационной колонны выходит 800 кг/ч дистиллята с концентрацией 96% (масс.) НК и 1200 кг/ч кубового остатка с содержанием А% (масс.) ВК. Определить состав питания. а) А=93, б) А=94,2, в) А=94,8, г) А=95,2, д) А=95,6, е) А=96,5.

**Дано:**

$$P = 800 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

$$W = 1200 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

$$x_P^{HK} = 96\%$$

$$x_W^{BK} = A = 93\%$$

$$x_F^{BK} - ?$$

$$x_F^{HK} - ?$$

**СИ:**

$$\frac{2 \text{ кг}}{9 \text{ с}}$$

$$\frac{1 \text{ кг}}{3 \text{ с}}$$

**Решение:**

Уравнение материального баланса для всего количества смеси имеет вид:

$$F = P + W. \quad (19.1)$$

Напишем уравнение материального баланса для высококипящего компонента:

$$F \cdot x_F^{BK} = P \cdot x_P^{BK} + W \cdot x_W^{BK}. \quad (19.2)$$

Выразим из (19.2) массовую долю высококипящего компонента:

$$x_F^{BK} = \frac{P \cdot x_P^{BK} + W \cdot x_W^{BK}}{F}. \quad (19.3)$$

Подставляя (19.1) в (19.3), получим

$$x_F^{BK} = \frac{P \cdot x_P^{BK} + W \cdot x_W^{BK}}{P + W}. \quad (19.4)$$

Очевидно, что

$$x_F^{HK} + x_F^{BK} = 1, \quad (19.5)$$

$$x_W^{HK} + x_W^{BK} = 1, \quad (19.6)$$

$$x_P^{HK} + x_P^{BK} = 1. \quad (19.7)$$

Выразив  $x_P^{BK}$  из (19.7) и подставив в (19.4), получим расчетную формулу:

$$x_F^{BK} = \frac{P \cdot (1 - x_P^{HK}) + W \cdot x_W^{BK}}{P + W}. \quad (19.8)$$

Из формул (19.5) и (19.8) получим вторую расчетную формулу:

$$x_F^{HK} = 1 - \frac{P \cdot (1 - x_P^{HK}) + W \cdot x_W^{BK}}{P + W}. \quad (19.9)$$

Определим состав питания:

$$x_F^{BK} = \frac{\frac{2}{9} \cdot (1 - 0,96) + \frac{1}{3} \cdot 0,93}{\frac{2}{9} + \frac{1}{3}} = \frac{\frac{2 \cdot 0,04}{9} + \frac{3 \cdot 0,93}{9}}{\frac{2}{9} + \frac{3}{9}} = \frac{0,08 + 2,79}{5} = 0,558 = 55,8\% .$$

$$x_F^{HK} = 1 - 0,558 = 0,442 = 44,2\% .$$

**Ответ:** 55,8%; 44,2%.

## Задачи по теплообмену

**Задача 8.**  $G$  кг/ч хлороформа необходимо нагреть от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $61^{\circ}\text{C}$  насыщенным водяным паром с температурой конденсации  $100^{\circ}\text{C}$ . Можно ли для этого использовать теплообменник с 37 трубками диаметром  $25 \times 2$  мм длиной 2 м при коэффициенте теплопередачи  $250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$ ? Теплоемкость хлороформа  $965 \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{К})$ , а)  $G=4000$  кг/ч, б)  $G=5000$  кг/ч, в)  $G=6000$  кг/ч, г)  $G=3000$  кг/ч, д)  $G=7000$  кг/ч, е)  $G=8000$  кг/ч.

**Дано:**

$$G^X = 4000 \text{ кг/ч}$$

$$t_1^X = -10^{\circ}\text{C}$$

$$t_2^X = 61^{\circ}\text{C}$$

$$t^B = 100^{\circ}\text{C}$$

$$n = 37$$

$$d_{\text{внеш}} = 29 \text{ мм}$$

$$l = 2 \text{ м}$$

$$K = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

$$c^X = 965 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$G_{\text{реаль}}^X - ?$$

**СИ:**

$$\frac{10}{9} \text{ кг/с}$$

$$0,029 \text{ м}$$

**Решение:**

Введем следующие обозначения: верхний индекс «X» относится к хлороформу, верхний индекс «B» – к воде.

При решении задачи учитываем тот факт, что  $1^{\circ}\text{C} = 1\text{К}$ , поэтому нет необходимости переходить из шкалы Цельсия в абсолютную.

Реальный расход хлороформа определим из формулы для тепловой мощности, идущей на нагревание хлороформа:

$$Q^X = c^X \cdot G_{\text{реаль}}^X \cdot (t_2^X - t_1^X).$$

$$G_{\text{реаль}}^X = \frac{Q^X}{c^X \cdot (t_2^X - t_1^X)}. \quad (8.1)$$

Для определения тепловой мощности воспользуемся формулой Ньютона-Рихмана применительно к нашей задаче:

$$Q^X = K \cdot S \cdot \Delta t_{cp}, \quad (8.2)$$

где  $S$  – площадь поверхности теплообмена,

$\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор (средняя разность температур).

Площадь поверхности теплообмена с учетом того, что трубы представляют собой полый цилиндр и количество труб равно  $n$ , определим по формуле:

$$S = \pi d_{\text{внеш}} \cdot l \cdot n. \quad (8.3)$$

Для определения среднего температурного напора составим температурную схему конденсатора:

$$100^{\circ}\text{C} \leftarrow 100^{\circ}\text{C};$$

$$-10^{\circ}\text{C} \rightarrow 61^{\circ}\text{C}.$$

$$\Delta t_M = t^B - t_2^X,$$

$$\Delta t_B = t^B - t_1^X,$$

$$\frac{\Delta t_B}{\Delta t_M} = \frac{t^B - t_1^X}{t^B - t_2^X} = \frac{100 - (-10)}{100 - 61} = 2 \frac{32}{39}.$$

Так как  $\frac{\Delta t_B}{\Delta t_M} > 2$ , то средний температурный напор определяется по формуле Грасгоффа

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}},$$

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{t_2^X - t_1^X}{\ln \frac{t^B - t_2^X}{t^B - t_1^X}}. \quad (8.4)$$

Подставим (8.3) и (8.4) в (8.2):

$$Q^X = K \cdot \pi d_{\text{внеш}} \cdot l \cdot n \cdot \frac{t_2^X - t_1^X}{\ln \frac{t^B - t_2^X}{t^B - t_1^X}}. \quad (8.5)$$

Подставим (8.5) в (8.1):

$$G_{\text{реаль}}^X = \frac{K \cdot \pi d_{\text{внеш}} \cdot l \cdot n \cdot \frac{t_2^X - t_1^X}{\ln \frac{t^B - t_2^X}{t^B - t_1^X}}}{c^X \cdot (t_2^X - t_1^X)},$$

$$G_{\text{реаль}}^X = \frac{\pi d_{\text{внеш}} l K n}{c^X \cdot \ln \frac{t^B - t_2^X}{t^B - t_1^X}}. \quad (8.6)$$

Вычислим реальный расход хлороформа:

$$G_{\text{реаль}}^X = \frac{3,14 \cdot 0,029 \cdot 2 \cdot 250 \cdot 37}{965 \cdot \ln \frac{100 - 61}{100 - (-10)}} \approx 1,68 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \approx 6064 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

$G_{\text{реаль}}^X > G^X$ , значит, данный теплообменник подходит для нагревания хлороформа с исходным расходом  $G^X$ .

**Ответ:** можно.

**Задача 19.** Аппарат диаметром 1 м и длиной 4 м покрыт стекловатой толщиной 20 мм с коэффициентом теплопроводности 0,04 Вт/(м × К). Температура стенки аппарата t°С, воздуха в помещении 20°С. Коэффициент теплоотдачи к воздуху 10 Вт/(м<sup>2</sup> × К). Найти тепловой поток к воздуху, а) t=120°С, б) t=150°С, в) t=200°С, г) t=220°С, б) t=240°С, в) t=270°С.

Дано:	СИ:	Решение:
$d = 1 м$		
$l = 4 м$		
$\delta = 20 мм$	0,02 м	При решении задачи учитываем тот факт, что $1^{\circ}C = 1K$ , поэтому нет необходимости переходить из шкалы Цельсия в абсолютную.
$\lambda = 0,04 Вт/(м \cdot К)$		Предположим, что температура аппарата не меняется, а воздух в помещении является термостатом.
$t = 120^{\circ}C$		
$t_0 = 20^{\circ}C$		Для определения теплового потока к воздуху воспользуемся формулой Ньютона-Рихмана применительно к нашей задаче:
$K = 10 Вт/(м^2 \cdot К)$		
$Q - ?$		
		$Q = K \cdot S \cdot (t_{zp} - t_0), \quad (8.1)$

где  $S$  – площадь поверхности теплообмена,  
 $t_{zp}$  – температура на поверхности (границе) теплообмена.

Допустим, аппарат занимает место в помещении от пола до потолка, тогда теплообмен в помещении осуществляется через цилиндрическую поверхность. Поэтому площадь поверхности теплообмена определяется по формуле:

$$S = \pi(d + 2\delta)l. \quad (8.2)$$

Подставим (8.2) в (8.1):

$$Q = \pi(d + 2\delta) \cdot l \cdot K \cdot (t_{zp} - t_0), \quad (8.3)$$

Воздух получает тепло от аппарата через слой стекловаты. По закону Фурье уравнение теплопроводности для цилиндрической поверхности применительно к нашей задаче имеет вид:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l(t - t_{ep})}{\ln \frac{d+2\delta}{d}}. \quad (8.4)$$

Выразим из (8.3)  $t_{ep}$ :

$$t_{ep} = \frac{Q}{\pi(d+2\delta) \cdot l \cdot K} + t_0. \quad (8.5)$$

Чтобы найти  $Q$ , подставим (8.5) в (8.4):

$$Q = \frac{2\pi\lambda l \left( t - \frac{Q}{\pi(d+2\delta) \cdot l \cdot K} - t_0 \right)}{\ln \frac{d+2\delta}{d}},$$

$$Q \cdot \ln \frac{d+2\delta}{d} = 2\pi\lambda l(t - t_0) - \frac{2\lambda Q}{(d+2\delta) \cdot K},$$

$$Q \left( \ln \frac{d+2\delta}{d} + \frac{2\lambda}{(d+2\delta)K} \right) = 2\pi\lambda l(t - t_0),$$

$$Q = \frac{2\pi\lambda l(t - t_0)}{\ln \frac{d+2\delta}{d} + \frac{2\lambda}{(d+2\delta)K}}. \quad (8.6)$$

Вычислим  $Q$ :

$$Q = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \cdot 4 \cdot (120 - 20)}{\ln \frac{1+2 \cdot 0,02}{1} + \frac{2 \cdot 0,04}{(1+2 \cdot 0,02) \cdot 10}} \approx 2143 \text{ Вт} \approx 2,14 \text{ кВт}.$$

**Ответ:** 2,14 кВт.