Министерство науки и высшего образования РФ
РОССИЙСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА
КАФЕДРА Процессов и аппаратов химической технологии

Всероссийская студенческая олимпиада по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии»

Примеры заданий для рассылки

Москва
2022

Задание 5

Экспериментально установлено, что в случае турбулентного течения жидкостей в гладких трубах в широком интервале значений скоростей движения, коэффициент гидравлического трения λ зависит от скорости течения w, плотности ρ, вязкости μ среды и диаметра трубы d. На основе метода анализа размерностей найти общую зависимость коэффициента гидравлического трения от определяющего критерия подобия.

Решение

Принимаем (гипотетически) степенную зависимость λ от упомянутых величин: $\lambda = A w^{x} d^{y} \rho^{z} \mu^{n}$, где A – некоторая постоянная (безразмерная) величина.

Учитывая равенство размерностей левой и правой части уравнения, получим:

$$м^{0} \cdot кг^{0} \cdot с^{0} = м^{x} \cdot с^{-x} \cdot м^{y} \cdot кг^{z} \cdot м^{-3z} \cdot кг^{n} \cdot с^{-n} \cdot м^{-n}$$

Для каждой основной размерности:

$$\begin{aligned} &кг: && z + n = 0 \\ &м: && x + y - 3z - n = 0 \\ &с: && -x - n = 0 \end{aligned}$$

Выразим все показатели степеней через n

$$x = -n; \quad y = -n; \quad z = -n$$

В результате получим:

$$\lambda = A\left(w\, d\, \rho\right)^{-n} \mu^{n} \quad \Rightarrow \quad \lambda = A\,\mathrm{Re}^{-n}$$

Это соответствует экспериментальным данным для турбулентного течения в гидравлически гладких трубах в широком интервале Re.

Задание 7

Емкость сферической формы радиусом R наполовину заполнена жидкостью (рис. 7.1). На нижней стенке емкости имеется отверстие площадью S_0, закрытое заглушкой. Емкость сообщается с атмосферой. Определить время полного истечения жидкости при открытой заглушке. Объемный расход жидкости при истечении определяется по формуле $Q = \alpha S_0 \sqrt{2 g H}$, где α – коэффициент расхода, H – уровень жидкости над отверстием.

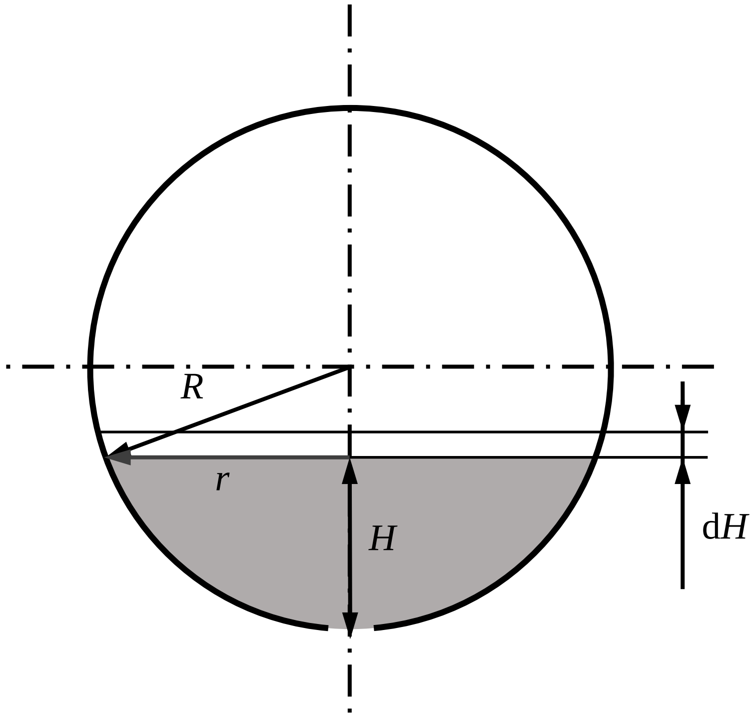

Рис. 7.1. Сферическая емкость

Решение

$$r^2 = R^2 - (R - H)^2 = 2\,R\,H - H^2\,.$$

$$-\mathrm{d}V = -\pi\left(2\,R\,H - H^2\right)\mathrm{d}H = \alpha\,S_0\sqrt{2\,g\,H}\;\mathrm{d}\tau\,.$$

$$\mathrm{d}\tau = \frac{-\pi}{\alpha\,S_0\sqrt{2\,g}}\left(2\,R\,H - H^2\right)H^{-\frac{1}{2}}\,\mathrm{d}H\,.$$

$$\tau = \frac{\pi}{\alpha S_0\sqrt{2g}}\int\limits_0^{H=R}\left(2RH^{\frac{1}{2}} - H^{\frac{3}{2}}\right)\mathrm{d}H =$$

$$= \frac{\pi}{\alpha S_0\sqrt{2g}}\left(\frac{4}{3}H^{\frac{3}{2}}R - \frac{2}{5}H^{\frac{5}{2}}\right)\Bigg|_0^R = \frac{14}{15}\frac{\pi}{\alpha\,S_0\sqrt{2\,g}}R^{\frac{5}{2}}\,.$$

Задание 34

В кожухотрубном испарителе насыщенный греющий пар непрерывно конденсируется в межтрубном пространстве, а в трубах кипит жидкость. Температура конденсации пара t_1 и температура кипения жидкости t_2 постоянны. Коэффициент теплоотдачи от пара к внешним поверхностям стенок труб выражается формулой $\alpha_1 = A\left(t_1 - t_{\text{ст}1}\right)^{-1/4}$; коэффициент теплоотдачи от внутренних поверхностей стенок труб к кипящей жидкости $\alpha_2 = C\, q^n = C^{\frac{1}{1-n}} \left(t_{\text{ст2}} - t_2\right)^{\frac{n}{1-n}}$, где A, C и n – известные величины; $t_{\text{ст1}}$ и $t_{\text{ст2}}$ – температуры внешних и внутренних поверхностей стенок труб. На основе данной информации, а также суммы термических сопротивления стенок и их загрязнений Σr_{i}, составить уравнение для определения коэффициента теплопередачи в испарителе.

Решение

Плотность теплового потока:

$$q = \alpha_1 \left(t_1 - t_{\text{ст1}}\right) = A \left(t_1 - t_{\text{ст1}}\right)^{3/4} = K\, \Delta t\,, \tag{34.1}$$

где $\Delta t = t_1 - t_2$;

$$q = \frac{1}{\Sigma r_i} \left(t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}\right) = K\, \Delta t\,; \tag{34.2}$$

$$q = \alpha_2 \left(t_{\text{ст2}} - t_2\right) = C^{\frac{1}{1-n}} \left(t_{\text{ст2}} - t_2\right)^{\frac{1}{1-n}} = K\, \Delta t\,. \tag{34.3}$$

Из (34.1) следует: $t_1 - t_{\text{ст1}} = \left(\dfrac{K}{A}\right)^{\frac{4}{3}} \Delta t^{\frac{4}{3}}$,

из (34.2) следует: $t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}} = K\, \Sigma r_i\, \Delta t$,

из (34.3) следует: $t_{\text{ст2}} - t_2 = \dfrac{\left(K\, \Delta t\right)^{1-n}}{C}$.

Сумма левых и правых частей уравнений приводит к следующему нелинейному уравнению: $\left(\dfrac{K}{A}\right)^{\frac{4}{3}} \Delta t^{\frac{1}{3}} + \Sigma r_i\, K + \dfrac{K^{1-n} \Delta t^{-n}}{C} = 1.$

Задание 38

В кожухотрубном испарителе насыщенный греющий водяной пар с температурой t_1 непрерывно подается в межтрубное пространство. Обечайка испарителя покрыта слоем изоляции с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{из}}$. Тепловому потоку, теряемому испарителем в окружающую среду, препятствуют: 1) термическое сопротивление при конденсации пара на внутренней стороне обечайки; 2) термическое сопротивление металлической стенки испарителя, 3) термическое сопротивление изоляции; 4) термическое сопротивление при теплоотдаче к окружающему воздуху. Первыми двумя термическими сопротивлениями, ввиду их малой величины, можно пренебречь. Тогда температура внешней стенки обечайки $t_{ст}$ будет равна температуре пара. Коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляции к окружающему воздуху: $\alpha = a + b\,(t_{ст2} - t_2)$, где a и b – константы, $t_{ст2}$ – температура внешней поверхности стенки, t_2 – температура окружающего воздуха. Заданы: плотность теплового потока q, а также a, b, t_1, t_2, $\lambda_{из}$. Определить толщину слоя изоляции считая стенку обечайки плоской.

Решение

Из уравнения $q = \left[a + b\left(t_{ст2} - t_2\right)\right]\left(t_{ст2} - t_2\right)$ найдем $\Delta t = t_{ст2} - t_2$

$$\Delta t = -\frac{a}{2\,b} + \sqrt{\frac{a^2}{4\,b^2} + \frac{q}{b}}\,.$$

Запишем плотность теплового потока через изоляцию и через пограничный слой со стороны воздуха:

$$q = \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}}\left(t_1 - t_{ст2}\right),\; q = \left[a + b\left(t_{ст2} - t_2\right)\right]\left(t_{ст2} - t_2\right),$$

выразим из этих уравнений движущие силы:

$$t_1 - t_{ст2} = q\frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}},$$

$$t_{ст2} - t_2 = \frac{q}{a + b\left(t_{ст2} - t_2\right)} = \frac{q}{\dfrac{a}{2} + \sqrt{\dfrac{a^2}{4} + q\,b}}\,.$$

Найдем сумму левых и правых частей уравнений:

$$t_1 - t_2 = q\left[\frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \left(\frac{a}{2} + \sqrt{\frac{a^2}{4} + q\,b}\right)^{-1}\right] \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad \delta_{из} = \left[\frac{t_1 - t_2}{q} - \left(\frac{a}{2} + \sqrt{\frac{a^2}{4} + q\,b}\right)^{-1}\right]\lambda_{из}$$

или $\quad \dfrac{\lambda_{из}}{\delta_{из}}\left(t_1 - t_2 + \dfrac{a}{2\,b} - \sqrt{\dfrac{a^2}{4\,b^2} + \dfrac{q}{b}}\right) = q \quad \Rightarrow$

$$\Rightarrow \quad \delta_{из} = \left[t_1 - t_2 + \frac{a}{2b} - \sqrt{\frac{a^2}{4b^2} + \frac{q}{b}} \right] \frac{\lambda_{из}}{q}.$$

Задание 55

По горизонтальной трубе (рис. 55.1) с диаметром 200 мм течет жидкость со скоростью 0,005 м/с. Жидкость заполняет часть сечения трубы. Расстояние от нижней точки трубы до поверхности жидкости h = 80 мм. Определить расход жидкости и эквивалентный диаметр сечения потока. Площадь сегмента выражается формулой:

$$S = \frac{R^2}{2}(\alpha - \sin\alpha).$$

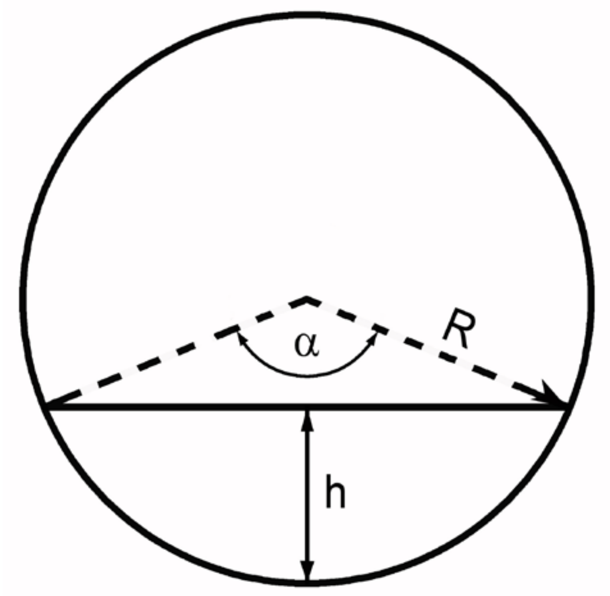

Рис. 55.1. Частично заполненная труба

Решение

Определение угла α:

$$h = R\left(1 - \cos\frac{\alpha}{2}\right);$$

$$1 - \cos\frac{\alpha}{2} = \frac{80}{100} \quad \Rightarrow \quad \cos\frac{\alpha}{2} = 0,2 \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad \alpha = 2\arccos 0,2 = 156,9261^\circ = \frac{156,9261}{180} \cdot 3,1416 = 2,739 \text{ рад}.$$

Площадь сегмента круга:

$$S = \frac{R^2}{2}\left(\alpha - \sin\alpha\right) = \frac{0,1^2}{2}\left(2,739 - \sin 156,9261\right) = 0,0117 \text{ м}^2.$$

Расход жидкости:

$$Q = 0,0117 \cdot 0,005 = 5,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Смоченный периметр:

$$\Pi = R \cdot 2\pi \cdot \frac{\alpha}{2\pi} = 0,1 \cdot 2,739 = 0,274 \text{ м}.$$

Эквивалентный диаметр:

$$d_э = \frac{4S}{\Pi} = \frac{4 \cdot 0,0117}{0,274} = 0,171 \text{ м}.$$

Задание 64

Посеребренные станки сосуда Дюара обращены друг к другу. Температура жидкости в сосуде 100 °С, температура окружающей среды 20 °С. Принять, что стенки сосуда имеют те же температуры. Степень черноты посеребренных стенок $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,02$. Переделите плотность лучистого теплового потока между стенками. Найдите также толщину теплоизоляции из пробки, через которую будет проходить тот же тепловой поток. Коэффициент теплопроводности пробки: $\lambda = 0,047$ Вт/(м·К). Приведенная степень черноты может быть определена по формуле:

$$\varepsilon_{пр} = \left[1 + \left(\varepsilon_1^{-1} - 1\right) \cdot \varphi_{1-2} + \left(\varepsilon_2^{-1} - 1\right) \cdot \varphi_{2-1}\right],$$

где φ_{1-2} и φ_{2-1} – угловые коэффициенты. Постоянная Стефана – Больцмана: $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4).

Решение

Результирующая плотность потока лучистого тепла:

$$q_{рез} = \varepsilon_{пр}\,\sigma_0\,\varphi_{1-2}\left(T_1^4 - T_2^4\right),\ \varphi_{1-2} = 1;$$

$$\varepsilon_{пр} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,02} + \frac{1}{0,02} - 1\right)^{-1} = 0,0101;$$

$$q_{рез} = 0,0101 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot \left[\left(273 + 100\right)^4 - \left(273 + 20\right)^4\right] = 6,8 \text{ Вт}/\text{м}^2 .$$

Определение толщины изоляции:

$$q_{\text{рез}} = \frac{\lambda}{\delta}\left(t_1 - t_2\right) \quad \Rightarrow \quad \delta = \frac{\lambda\left(t_1 - t_2\right)}{q_{\text{рез}}} = \frac{0{,}047\left(100 - 20\right)}{6{,}8} = 0{,}553\,\text{м}\,.$$

Более точно толщина изоляции может быть определена по формуле из теоретического задания 38:

$$\delta_{\text{из}} = \left[t_1 - t_2 + \frac{a}{2\,b} - \sqrt{\frac{a^2}{4\,b^2} + \frac{q}{b}}\right]\frac{\lambda_{\text{из}}}{q}\,,$$

где a = 9,7; b = 0,07;

что дает следующий результат: δ = 0,548 м.

Задание 69

В тарельчатой ректификационной колонне разделяется бинарная смесь с начальным содержанием легколетучего компонента 0,15 мольн. дол.; содержание ЛК в кубовом остатке 0,02 мольн. дол. Уравнение рабочей линии нижней (исчерпывающей) части колонны:

$$x_{\text{n}} = 0{,}556 \cdot y_{\text{n}-1} + 8{,}9 \cdot 10^{-3}.$$

Равновесие фаз описывается уравнением:

$$y^* = \frac{2{,}4\,x}{1{,}4\,x + 1}\,.$$

Коэффициенты массоотдачи в фазах, отнесенные к площади тарелки: $\beta_{\text{y}} = 0{,}0625\,\text{кмоль}\big/\left(\text{м}^2 \cdot \text{с}\right)$, $\beta_{\text{x}} = 0{,}333\,\text{кмоль}\big/\left(\text{м}^2 \cdot \text{с}\right)$. Число единиц переноса на тарелке выражается формулой:

$$n_{\text{Oy}} = \frac{K_{\text{fy}}\,M}{q}\,,$$

где $q = 2{,}43\,\text{кг}\big/\left(\text{м}^2 \cdot \text{с}\right)$ – средняя плотность потока массы пара на тарелках нижней части колонны; $M = 88\,\text{кг}/\text{кмоль}$ – молекулярная масса паров нижней части колонны. Жидкость на тарелке полностью перемешана, а пар движется по модели идеального вытеснения. Эффектами брызгоуноса и байпасирования жидкости пренебречь. Определите необходимое число тарелок в нижней части колонны.

Решение

Коэффициент массопередачи:

$$K_{\text{fy}} = \frac{1}{\dfrac{1}{\beta_{\text{fy}}} + \dfrac{m}{\beta_{\text{fx}}}} = \frac{1}{\dfrac{1}{0,0625} + \dfrac{m}{0,333}} = \frac{1}{16 + 3m};$$

$$m = \frac{\mathrm{d}\,y^*}{\mathrm{d}\,x} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\,x}\left(\frac{2,4x}{1,4x+1}\right) = 2,4\left[\frac{(1,4x+1) - x \cdot 1,4}{(1,4x+1)^2}\right] = \frac{2,4}{(1,4x+1)^2}\ .$$

$$n_{\text{Oy}} = \frac{K_{\text{fy}}\,M}{q} = \frac{K_{\text{fy}}\,88}{2,43} = \frac{36,2}{16 + \dfrac{3 \cdot 2,4}{(1,4x+1)^2}}\,. \qquad (69.1)$$

Эффективность по Мэрфри:

$$E_{\text{my}} = 1 - e^{-n_{\text{Oy}}}\,. \qquad (69.2)$$

Уравнения, связывающие концентрации фаз, входящих на тарелку n ($y_{\text{n}-1}$; $x_{\text{n}+1}$) и уходящих с тарелки (y_{n}; x_{n}):

$$y_{\text{n}} = y_{\text{n-1}} + E_{\text{my}}\left(y^*(x_{\text{n}}) - y_{\text{n-1}}\right); \qquad (69.3)$$

$$x_{\text{n+1}} = 0,556 \cdot y_{\text{n}} + 8,9 \cdot 10^{-3}. \qquad (69.4)$$

Определяя концентрации фаз на тарелках по уравнениям (69.1)–(69.4) от $x = 0,02$ до 0,15, получим необходимое число тарелок.

Первая тарелка (нижняя):

$$x_1 = 0,02;\ n_{\text{Oy}} = \frac{36,2}{16 + \dfrac{3 \cdot 2,4}{(1,40,02+1)^2}} = 1,587;\ E_{\text{my}} = 1 - e^{-1,587} = 0,795;$$

$$y_1 = 0,02 + 0,795\left(\frac{2,4 \cdot 0,02}{1,4 \cdot 0,02 + 1} - 0,02\right) = 0,041;$$

$x_2 = 0,556 \cdot 0,041 + 8,9 \cdot 10^{-3} = 0,0317$.

Повторяя расчет «от тарелки к тарелке», получим следующие результаты:

Номер тарелки	1	2	3	4	5	6	7	8
x	0,02	0,0317	0,0458	0,0623	0,809	0,401	0,122	0,1434
E_{my}	0,795	0,798	0,802	0,805	0,810	0,814	0,818	0,821
y	0,0410	0,0664	0,0960	0,1290	0,1658	0,2030	0,2420	0,2786

Граничные условия для верхней тарелки (x_{n+1} = 0,15):

$$y_{n} = \frac{x_{n+1}}{0,556} - \frac{8,9 \cdot 10^{-3}}{0,556} = 0,2539,$$

следовательно, необходимое число тарелок будет при условии $y_{n} \geq 0,2539$, что соответствует n = 8.