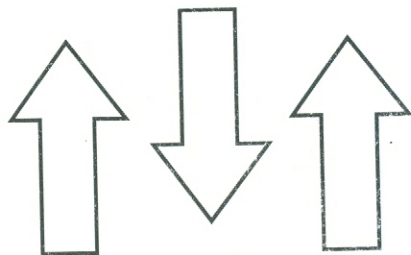


А.Г. Лаптев, А.М. Конахин, Н.Г. Минеев

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РАСЧЕТ АППАРАТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ СМЕСЕЙ



«Теплотехник»

6.15. Примеры расчета абсорберов [22]*

6.15.1. Абсорбция аммиака водой

Рассчитать насадочный абсорбер с кольцами Рашига 10×10 мм со свободным объемом $V_{св}=0,7$, с удельной поверхностью $a_v=440$ для абсорбции воздушно-аммиачной смеси при $t=20^\circ\text{C}$ и $p=1$ атм. Начальная концентрация аммиака в воздухе $y_H=0,15$ мольных долей, массовый расход газовой смеси $G=0,11$ кг/с. Начальная концентрация аммиака в жидкости (воде) $x_H=0$. Степень извлечения $\varphi=0,88$, $m=1$, число насадочных элементов в $1\text{ м}^3 N=250000$ штук.

Концентрация компонента в газовой фазе на выходе из аппарата (6.10)

$$y_K=(1-\varphi)y_H=(1-0,88)\cdot 0,15=1,8\cdot 10^{-2} \text{ мольн. дол.}$$

Относительная массовая концентрация (6.8)

$$\bar{Y}_H = \frac{M_a y_H}{M_b (1 - y_H)} = \frac{17 \cdot 0,15}{29(1 - 0,15)} = 0,1034 \frac{\text{кг} \cdot \text{NH}_3}{\text{кг} \cdot \text{возд}},$$

$$\bar{Y}_K = \frac{M_a y_K}{M_b (1 - y_K)} = \frac{17 \cdot 1,8 \cdot 10^{-2}}{29(1 - 1,8 \cdot 10^{-2})} = 1,075 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг} \cdot \text{NH}_3}{\text{кг} \cdot \text{возд}},$$

где $M_a=17$ – молекулярная масса аммиака (табл. 1 прил.), $M_b=29$ – молекулярная масса воздуха.

*Расчеты выполнены Е.С. Сергеевой

Количество переданной массы M (6.9):

$$M = \bar{G}(\bar{Y}_H - \bar{Y}_K) = 0,0997 \cdot (0,1034 - 1,075 \cdot 10^{-2}) = 9,24 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с,}$$

где $\bar{G} = G_H \left(1 - \frac{M_a y_H}{M_{смг}} \right) = 0,11 \left(1 - \frac{17 \cdot 0,15}{27,2} \right) = 0,0997 \text{ кг/с.}$

Молекулярная масса смеси газов $M_{смг}$:

$$M_{смг} = (M_a y_H + M_b (1 - y_H)) = 17 \cdot 0,15 + 29(1 - 0,15) = 27,2 \text{ кмоль/кг.}$$

Коэффициент распределения m , \bar{m} (6.4), (6.5) (для аммиака в воздухе $m \approx 1$):

$$m \approx 1 \left(\frac{\text{мольн. д.}}{\text{мольн. д.}} \right), \quad \bar{m} = m \frac{M_{смж}}{M_{смг}} = 1 \frac{18}{27,2} = 0,66 \frac{\text{масс. д.}}{\text{масс. д.}}$$

Минимальный расход жидкого поглотителя \bar{L}_{\min} (6.17):

$$\bar{L}_{\min} = \frac{M}{\bar{X}_K^* - \bar{X}_H} = \frac{9,24 \cdot 10^{-3}}{0,1567 - 0} = 5,9 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с,}$$

где $\bar{X}_K^* = \bar{Y}_H / \bar{m} = \frac{0,1034}{0,66} = 0,1567 \text{ кг NH}_3/\text{кг H}_2\text{O.}$

Рабочий расход поглотителя \bar{L} (6.18):

$$\bar{L} = \phi \bar{L}_{\min} = 1,5 \cdot 5,9 \cdot 10^{-2} = 8,85 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с.}$$

Концентрация поглотителя в жидкости на выходе \bar{X}_K :

$$\bar{X}_K = \bar{X}_H + \frac{M}{\bar{L}} = 0 + \frac{9,24 \cdot 10^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-2}} = 0,1044 \text{ кг NH}_3/\text{кг H}_2\text{O.}$$

Для данной насадки – кольца Рашига в навал с параметрами (табл. 22 прил. с учетом табл. 4) $V_{св} = 0,7 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $a_v = 440 \text{ м}^2/\text{м}^3$ – уравнение (6.23) примет вид:

$$\lg \left(\frac{W_3^2 a_v \rho_r \mu_{ж}^{0,16}}{g V_{св}^3 \rho_{ж}} \right) = A - B \left(\frac{\bar{L}}{\bar{G}} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \right)^{0,125},$$

$$\lg \left(\frac{W_3^2 \cdot 440 \cdot 1,2 \cdot 1^{0,16}}{9,81 \cdot 0,7^3 \cdot 1000} \right) = -0,073 - 1,75 \cdot \left(\frac{8,85 \cdot 10^{-2}}{0,0997} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{1,2}{1000} \right)^{0,125}$$

или после вычислений

$$\lg(0,1569 W_3^2) = -0,806,$$

Из данного выражения получим:

$$W_3 = \sqrt{\frac{10^{-0,806}}{0,1569}} = 0,998 \text{ м/с;}$$

где $\rho_{ж} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\rho_r = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\mu_{ж} = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ (табл. 3, 7, 8 прил.).

Рабочая скорость газа W (6.24):

$$W = b W_3 = 0,75 \cdot 0,998 = 0,7485 \text{ м/с.}$$

Диаметр колонны D_K (6.25):

$$D_K = \sqrt{\frac{G}{\rho_r 0,785 W}} = \sqrt{\frac{0,11}{1,2 \cdot 0,785 \cdot 0,7485}} = 0,395 \text{ м.}$$

Из табл. 6.4, 6.5 выбираем колонну диаметром $D_{ст} = 0,4 \text{ м}$. Тогда площадь колонны:

$$S_k = \frac{\pi D_{\text{гост}}^2}{4} = \frac{\pi 0,4^2}{4} = 0,1257 \text{ м}^2.$$

Уточняем скорость газа $W = G / (\rho_{\Gamma} S_k)$ ($W = 0,73 \text{ м/с}$).

Коэффициент растекания жидкости \tilde{D} (6.27):

$$\tilde{D} = a_1 + b_1 \lg d_{\text{нас}} = 0,135 + 0,572 \lg 1 = 0,135 \text{ см.}$$

По рис. 6.10 для $\tilde{D} = 0,135 \text{ см}$ число точек орошения $n = 40$ при высоте растекания $h = 1 \text{ м}$.

Средняя движущая сила массопередачи $\Delta \bar{Y}_{\text{cp}}$ (6.20):

$$\Delta Y_{\text{cp}} = \frac{\Delta \bar{Y}_{\text{H}} - \Delta \bar{Y}_{\text{K}}}{\ln \frac{\Delta \bar{Y}_{\text{H}}}{\Delta \bar{Y}_{\text{K}}}} = \frac{3,45 \cdot 10^{-2} - 1,075 \cdot 10^{-2}}{\ln \frac{3,45 \cdot 10^{-2}}{1,075 \cdot 10^{-2}}}$$

$$= 2,0367 \cdot 10^{-2} \text{ кг NH}_3/\text{кг возд.},$$

где $\Delta \bar{Y}_{\text{H}} = \bar{Y}_{\text{H}} - \bar{Y}_{\text{H}}^* = 0,1034 - 6,89 \cdot 10^{-2} = 3,45 \cdot 10^{-2} \text{ кг NH}_3/\text{кг возд.},$

$\Delta \bar{Y}_{\text{K}} = \bar{Y}_{\text{K}} - \bar{Y}_{\text{K}}^* = 1,075 \cdot 10^{-2} - 0 = 1,075 \cdot 10^{-2} \text{ кг NH}_3/\text{кг возд.},$

$$\bar{Y}_{\text{H}}^* = \bar{m} \bar{X}_{\text{K}} = 0,66 \cdot 0,1044 = 6,89 \cdot 10^{-2}, \quad \bar{Y}_{\text{K}}^* = \bar{m} \bar{X}_{\text{H}} = 0,66 \cdot 0 = 0.$$

Число единиц переноса $n_{\text{ог}}$ (6.22):

$$n_{\text{ог}} = \frac{\bar{Y}_{\text{H}} - \bar{Y}_{\text{K}}}{\Delta \bar{Y}_{\text{cp}}} = \frac{0,1034 - 1,075 \cdot 10^{-2}}{2,0367 \cdot 10^{-2}} = 4,55.$$

Критерий Рейнольдса газа Re_{Γ} (6.44):

$$\text{Re}_{\Gamma} = \frac{4W\rho_{\Gamma}}{a_{\nu}\mu_{\Gamma}} = \frac{4 \cdot 0,73 \cdot 1,2}{440 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} = 453,$$

где $\mu_{\Gamma} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ (табл. 8 прил.).

Коэффициент гидравлического сопротивления λ (6.43):

$$\lambda = \frac{16}{\text{Re}_{\Gamma}^{0,2}} = \frac{16}{453,64^{0,2}} = 4,71.$$

Сопротивление сухого насадочного слоя $\Delta \bar{P}'_{\text{сух}}$ (6.41):

$$\Delta P'_{\text{сух}} = \lambda \frac{1}{d_{\text{экв}}} \frac{\rho_{\Gamma} \left(\frac{W}{V_{\text{св}}} \right)^2}{2} = 4,71 \cdot \frac{1}{6,36 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1,2 \cdot \left(\frac{0,73}{0,7} \right)^2}{2} = 508 \text{ Па/м,}$$

$$\text{где } d_{\text{экв}} = \frac{4V_{\text{св}}}{a_{\nu}} = \frac{4 \cdot 0,7}{440} = 6,36 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Сопротивление орошаемого насадочного слоя $\Delta P'_{\text{оп}}$ (6.45):

$$\Delta P'_{\text{оп}} = \Delta P'_{\text{сух}} 10^{b'q} = 508 \cdot 10^{184 \cdot 7,04 \cdot 10^{-4}} = 684 \text{ Па/м,}$$

$$\text{где } q = \frac{\bar{L}}{S_k \rho_{\text{ж}}} = \frac{8,85 \cdot 10^{-2}}{0,1257 \cdot 1000} = 7,04 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Коэффициент смачиваемости ψ (6.38):

$$\psi = 1 - \exp\left(-0,16 \cdot 6,4^{0,4}\right) = 0,286,$$

$$\text{где } \text{Re}_{\text{ж}} = \frac{4q\rho_{\text{ж}}}{a_{\nu}\mu_{\text{ж}}} = \frac{4 \cdot 7,04 \cdot 10^{-4} \cdot 1000}{440 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 6,4.$$

Диссипация энергии газового потока $\epsilon_{\Gamma-\text{ж}}$ (6.36):

$$\epsilon_{\Gamma-\text{ж}} = \frac{\Delta P'_{\Gamma-\text{ж}} W}{V_{\text{св}} - \delta_{\text{ж}}} = \frac{321,86 \cdot 0,73}{0,7 - 2,299 \cdot 10^{-2}} = 355,8 \text{ Вт/м}^3,$$

$$\delta_{\text{ж}} = \delta_{\text{жст}} + \delta_{\text{жд}} = 2,34 \cdot 10^{-5} + 2,296 \cdot 10^{-2} = 2,299 \cdot 10^{-2},$$

$$\delta_{\text{жст}} = b_2 d_{\text{ш}}^{-p} \mu_{\text{ж}}^m \sigma_{\text{ж}}^n \rho_{\text{ж}}^{-0,37} =$$

$$= 0,00005 \cdot (2,37 \cdot 10^{-2})^{-1,21} (1 \cdot 10^{-3})^{0,02} (0,0728)^{0,99} (1000)^{-0,37} = 2,34 \cdot 10^{-5},$$

$$d_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{a_v}{\pi N}} = \sqrt{\frac{440}{3,14 \cdot 250000}} = 2,37 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \sigma_{\text{ж}} = 0,0728 \text{ Н/м},$$

$$\delta_{\text{жд}} = 0,38 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,56} \text{Ga}^{-0,33} = 0,38 \cdot 6,4^{0,56} \cdot 115162,47^{-0,33} = 2,296 \cdot 10^{-2}.$$

Критерий Галилея Ga (6.40):

$$\text{Ga} = \frac{g \rho_{\text{ж}}^2}{\mu_{\text{ж}}^2 a_v^3} = \frac{9,81 \cdot 1000^2}{(1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 440^3} = 115162,47.$$

Коэффициент массоотдачи в газе $\beta_{\text{Г}}$ (6.35):

$$\beta_{\text{Г}} = 0,013 \frac{\left(\varepsilon_{\text{Г-ж}} \frac{v_{\text{Г}}}{\rho_{\text{Г}}} \right)^{0,25}}{\text{Sc}_{\text{Г}}^{\frac{2}{3}} q^{0,4}} = 0,013 \frac{\left(355,85 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-5}}{1,2} \right)^{0,25}}{0,84^{0,6} (7,04 \cdot 10^{-4})^{0,4}} = 6,88 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$$

$$\text{при } \text{Sc}_{\text{Г}} = \frac{v_{\text{Г}}}{D_{\text{Г}}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-5}}{1,79 \cdot 10^{-5}} = 0,84, \quad v_{\text{Г}} = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1,8 \cdot 10^{-5}}{1,2} = 1,5 \cdot 10^{-5},$$

где

$$P(v_A^3 + v_B^3)^2$$

$$= \frac{4,3 \cdot 10^{-7} T^{\frac{3}{2}}}{P \left(\frac{1}{v_A^3} + \frac{1}{v_B^3} \right)} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} = \frac{4,3 \cdot 10^{-7} 293^{\frac{3}{2}}}{1 \left(\frac{1}{25,8^3} + \frac{1}{29,9^3} \right)} \sqrt{\frac{1}{17} + \frac{1}{29}} = 1,79 \cdot 10^{-5}.$$

Коэффициент массоотдачи в жидкости $\beta_{\text{ж}}$ (6.46):

$$\beta_{\text{ж}} = 0,93 \sqrt{\frac{q a_v \psi_M D_{\text{ж}}}{\pi V_{\text{св}} \delta_{\text{жд}}}} = 0,93 \cdot \sqrt{\frac{7,04 \cdot 10^{-4} \cdot 440 \cdot 0,286 \cdot 1,8 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 0,7 \cdot 2,296 \cdot 10^{-2}}} = 5,23 \cdot 10^{-5},$$

$$D_{\text{ж}} = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с} \text{ (табл. 19 прил.)}$$

Коэффициент массопередачи $K_{\text{ог}}$ (6.34):

$$K_{\text{ог}} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{\text{Г}}} + \frac{\bar{m} \left(\frac{\rho_{\text{Г}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)}{\beta_{\text{ж}}}} = \left[\left(\frac{1}{6,88 \cdot 10^{-2}} \right) + \left(\frac{0,66 \cdot \frac{1,2}{1000}}{5,23 \cdot 10^{-5}} \right) \right]^{-1} = 3,37 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}.$$

Высота единиц переноса $h_{\text{ог}}$ (6.47):

$$h_{\text{ог}} = \frac{\bar{G}}{\rho_{\text{Г}} K_{\text{ог}} \text{Sc}_{\text{к}} a_v \psi_a} = \frac{0,0997}{1,2 \cdot 3,37 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1257 \cdot 440 \cdot 0,0549} = 0,806,$$

$$\text{где } \psi_a = A_3 W_{\text{ж}}^{0,455} (\sigma)^{-m_3} = 2,26 \cdot 0,704^{0,455} \cdot (0,0728 \cdot 10^3)^{-0,83} = 0,0549,$$

при $W_{ж} = q\rho_{ж} = 7,04 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 = 0,704$ и
 $m_3 = b_3 d_{нас}^{-p_3} = 0,83 \cdot 1^{-0,48} = 0,83$.

Высота слоя насадки H_H (6.48):

$$H_H = h_{ог} n_{ог} = 0,806 \cdot 4,55 = 3,67 \text{ м.}$$

Поверхность массопередачи F (6.49) и (6.50):

$$F = a_v \psi_a S_K H = 440 \cdot 0,0549 \cdot 0,1257 \cdot 3,67 = 11,15,$$

$$F = \frac{M}{K_{ог} \Delta \bar{Y}_{ср} \rho_{Г}} = \frac{9,24 \cdot 10^{-3}}{3,37 \cdot 10^{-2} \cdot 2,0367 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2} = 11,23.$$

Поверхности массопередачи F , рассчитанные по формулам (6.49) и (6.50), согласуются с погрешностью около 1 %, следовательно, расчет выполнен правильно.

Высота секции насадки в абсорбере:

$$H_{сек} = 4D_K = 4 \cdot 0,4 = 1,6 \text{ м.}$$

Число секций $n = H_H / H_{сек} = 3,67 / 1,6 = 2,3$, т.е. принимается $n=3$,
 $H_{сек}=1,23$ м.

6.15.2. Абсорбция ацетилена водой

Рассчитать насадочный абсорбер с кольцами Рашига 25×25 мм со свободным объёмом $V_{св}=0,78$, с удельной поверхностью $a_v=140$ для абсорбции смеси азота и ацетилена водой при $t=20$ °С и $p=765$ мм рт. ст. Начальная концентрация ацетилена в азоте $Y_H=0,284$ мольных долей, конечная концентрация ацетилена в азоте $Y_K=0,0284$ мольных долей. Массовый расход газовой смеси $G=0,24$ кг/с. Начальная концентрация диоксида углерода в жидкости (воде) $X_H=0$. Число насадочных элементов в $1 \text{ м}^3 N=20$ 200 штук.

Степень извлечения (6.10)

$$\varphi = \frac{y_H - y_K}{y_H} = \frac{0,284 - 0,0284}{0,284} = 0,9.$$

Относительная массовая концентрация (6.8)

$$\bar{Y}_H = \frac{M_a y_H}{M_b (1 - y_H)} = \frac{26 \cdot 0,284}{28(1 - 0,284)} = 0,3683 \frac{\text{кг} \cdot \text{C}_2\text{H}_2}{\text{кг} \cdot \text{N}_2},$$

$$\bar{Y}_K = \frac{M_a y_K}{M_b (1 - y_K)} = \frac{26 \cdot 0,0284}{28(1 - 0,0284)} = 0,0271 \frac{\text{кг} \cdot \text{C}_2\text{H}_2}{\text{кг} \cdot \text{N}_2},$$

где $M_a=26$ – молекулярная масса ацетилена, $M_b=28$ – молекулярная масса азота (табл. 20 приложения).

Количество переданной массы M (6.9):

$$M = \bar{G} (\bar{Y}_H - \bar{Y}_K) = 0,175(0,3683 - 0,0271) = 0,059 \text{ кг/с.}$$

где $\bar{G} = G_H \left(1 - \frac{M_a y_H}{M_{смг}} \right) = 0,24 \left(1 - \frac{26 \cdot 0,284}{27,432} \right) = 0,175 \text{ кг/с.}$

Молекулярная масса смеси газов $M_{смг}$:

$$M_{смг} = (M_a y_H + M_b (1 - y_H)) = 26 \cdot 0,284 + 28(1 - 0,284) = 27,432 \text{ кмоль/кг.}$$

Коэффициент распределения m, \bar{m} (6.4), (6.5) для ацетилена в азоте:

$$m = \frac{E}{p},$$

где E – константа Генри, зависящая от температуры и от природы газа и жидкости, по табл. 21 прил. $E=0,92 \cdot 10^6$, p – парциальное давление газовой смеси.

$$m = \frac{0,92 \cdot 10^6}{765 \cdot 28,4} = 42,35 \left(\frac{\text{мольн. д.}}{\text{мольн. д.}} \right),$$

$$\bar{m} = m \frac{M_{\text{смж}}}{M_{\text{смг}}} = 42,35 \frac{18}{27,432} = 27,789 \frac{\text{масс. д.}}{\text{масс. д.}}$$

Минимальный расход жидкого поглотителя \bar{L}_{min} (6.17):

$$\bar{L}_{\text{min}} = \frac{M}{\bar{X}_{\text{к}}^* - \bar{X}_{\text{н}}} = \frac{0,059}{0,013 - 0} = 4,538 \text{ кг/с,}$$

где $\bar{X}_{\text{к}}^* = \bar{Y}_{\text{н}} / \bar{m} = \frac{0,3683}{27,789} = 0,013 \text{ кг C}_2\text{H}_2/\text{кг H}_2\text{O}$.

Рабочий расход поглотителя \bar{L} (6.18):

$$\bar{L} = \phi \bar{L}_{\text{min}} = 1,5 \cdot 4,538 = 6,807 \text{ кг/с.}$$

Концентрация поглотителя в жидкости на выходе $\bar{X}_{\text{к}}$:

$$\bar{X}_{\text{к}} = \bar{X}_{\text{н}} + \frac{M}{L} = 0 + \frac{0,059}{6,807} = 0,0087 \text{ кг C}_2\text{H}_2/\text{кг H}_2\text{O}.$$

Для данной насадки – кольца Рашига в навал с параметрами $V_{\text{св}} = 0,78 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $a_v = 140 \text{ м}^2/\text{м}^3$ – уравнение (6.23) примет вид:

$$\lg \left(\frac{W_3^2 a_v \rho_{\Gamma} \mu_{\text{ж}}^{0,16}}{g V_{\text{св}}^3 \rho_{\text{ж}}} \right) = -0,073 - 1,75 \left(\frac{\bar{L}}{G} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,125},$$

$$\lg \left(\frac{W_3^2 140 \cdot 1,215 \cdot 1^{0,16}}{9,81 \cdot 0,78^3 \cdot 1000} \right) = -0,073 - 1,75 \cdot \left(\frac{6,807}{0,175} \right)^{0,25} \left(\frac{1,215}{1000} \right)^{0,125}.$$

или

$$\lg(0,0365 W_3^2) = -1,966,$$

Отсюда:

$$W_3 = \sqrt{\frac{10^{-1,966}}{0,0365}} = 0,5443 \text{ м/с;}$$

где $\rho_{\text{ж}} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\rho_{\Gamma} = 1,215 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\mu_{\text{ж}} = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ (табл. 3, 7, 8 прил.).

Рабочая скорость газа W (6.24):

$$W = b W_3 = 0,75 \cdot 0,5443 = 0,4082 \text{ м/с.}$$

Диаметр колонны $D_{\text{к}}$ (6.25):

$$D_{\text{к}} = \sqrt{\frac{G}{\rho_{\Gamma} 0,785 W}} = \sqrt{\frac{0,24}{1,215 \cdot 0,785 \cdot 0,4082}} = 0,7851 \text{ м.}$$

Из табл. 6.4, 6.5 выбираем колонну диаметром $D_{\text{ст}} = 0,8 \text{ м}$. Тогда площадь колонны

$$S_{\text{к}} = \frac{\pi D_{\text{ст}}^2}{4} = \frac{\pi 0,8^2}{4} = 0,5026 \text{ м}^2.$$

Уточняем скорость газа $W = G / (\rho_{\Gamma} S_{\text{к}})$ ($W = 0,4 \text{ м/с}$).

Коэффициент растекания жидкости \tilde{D} (6.27):

$$\tilde{D} = a_1 + b_1 \lg d_{\text{нас}} = 0,135 + 0,572 \lg 2,5 = 0,363 \text{ см.}$$

По рис. 6.10 для $\tilde{D} = 0,363 \text{ см}$ число точек орошения $n = 30$ при высоте растекания $h = 1 \text{ м}$.

Средняя движущая сила массопередачи $\Delta \bar{Y}_{\text{ср}}$ (6.20):

$$\Delta \bar{Y}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \bar{Y}_{\text{н}} - \Delta \bar{Y}_{\text{к}}}{\ln \frac{\Delta \bar{Y}_{\text{н}}}{\Delta \bar{Y}_{\text{к}}}} = \frac{0,1265 - 0,0271}{\ln \frac{0,1265}{0,0271}} = 0,065 \text{ кг C}_2\text{H}_2/\text{кг N}_2,$$

где $\Delta \bar{Y}_{\text{н}} = \bar{Y}_{\text{н}} - \bar{Y}_{\text{н}}^* = 0,3683 - 0,2418 = 0,1265 \text{ кг C}_2\text{H}_2/\text{кг N}_2$,

$$\Delta Y_K = Y_K - \bar{Y}_K^* = 0,0271 - 0 = 0,0271 \text{ кг C}_2\text{H}_2 / \text{кг N}_2.$$

$$\bar{Y}_H^* = \bar{m} \bar{X}_K = 27,789 \cdot 0,0087 = 0,2418; \quad \bar{Y}_K^* = \bar{m} \bar{X}_H = 27,789 \cdot 0 = 0.$$

Число единиц переноса $n_{ог}$ (6.22):

$$n_{ог} = \frac{\bar{Y}_H - \bar{Y}_K}{\Delta \bar{Y}_{cp}} = \frac{0,3683 - 0,0271}{0,065} = 5,25.$$

Критерий Рейнольдса газа Re_Γ (6.44):

$$Re_\Gamma = \frac{4W\rho_\Gamma}{a_v\mu_\Gamma} = \frac{4 \cdot 0,4 \cdot 1,215}{140 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} = 787,$$

где $\mu_\Gamma = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ (6.43):

$$\lambda = \frac{16}{Re_\Gamma^{0,2}} = \frac{16}{787^{0,2}} = 4,216.$$

Сопротивление сухого насадочного слоя $\Delta \bar{P}'_{сух}$ (6.41):

$$\begin{aligned} \Delta P'_{сух} &= \lambda \frac{1}{d_{эКВ}} \frac{\rho_\Gamma \left(\frac{W}{V_{св}} \right)^2}{2} = \\ &= 4,216 \frac{1}{0,0223} \frac{1,215 \cdot \left(\frac{0,4}{0,78} \right)^2}{2} = 31,4 \text{ Па/м,} \end{aligned}$$

где $d_{эКВ} = \frac{4V_{св}}{a_v} = \frac{4 \cdot 0,78}{140} = 0,0223$ м.

Сопротивление орошаемого насадочного слоя $\Delta P'_{ор}$ (6.45):

$$\Delta P'_{ор} = \Delta P'_{сух} 10^{b'q} = 31,4 \cdot 10^{1,84 \cdot 0,0135} = 9587,4 \text{ Па/м,}$$

$$\text{где } q = \frac{\bar{L}}{S_K \rho_{ж}} = \frac{6,807}{0,5026 \cdot 1000} = 0,0135 \text{ м/с.}$$

Коэффициент смачиваемости ψ (6.38):

$$\psi = 1 - \exp\left(-0,16 \cdot 385,714^{0,4}\right) = 0,82,$$

$$\text{где } Re_{ж} = \frac{4q\rho_{ж}}{a_v\mu_{ж}} = \frac{4 \cdot 0,0135 \cdot 1000}{140 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 385,7.$$

Диссипация энергии газового потока $\epsilon_{\Gamma-ж}$ (6.36):

$$\epsilon_{\Gamma-ж} = \frac{\Delta P'_{\Gamma-ж} W}{V_{св} - \delta_{ж}} = \frac{9582,193 \cdot 0,4}{0,78 - 0,07338} = 5535,438 \text{ Вт/м}^3,$$

где $\Delta P'_{\Gamma-ж} = \Delta P'_{ор} - \Delta P'_{сух}(1 - \psi_M) = 9587,4 - 31,4 \cdot (1 - 0,82) = 9582$ Па/м,

$$\delta_{ж} = \delta_{жст} + \delta_{жд} = 1,012 \cdot 10^{-5} + 0,07337 = 0,07338,$$

$$\begin{aligned} \delta_{жст} &= b_2 d_{ш}^{-p} \mu_{ж}^m \sigma_{ж}^n \rho_{ж}^{-0,37} = \\ &= 0,00005 (0,047)^{-1,21} (1 \cdot 10^{-3})^{0,02} (0,0728)^{0,99} (1000)^{-0,37} = 1,021 \cdot 10^{-5}, \end{aligned}$$

$$d_{ш} = \sqrt{\frac{a_v}{\pi N}} = \sqrt{\frac{140}{3,14 \cdot 20200}} = 0,047 \text{ м, } \sigma_{ж} = 0,0728 \text{ Н/м,}$$

$$\delta_{жд} = 0,38 Re_{ж}^{0,56} Ga^{-0,33} = 0,38 \cdot 385,714^{0,56} \cdot 3575072,9^{-0,33} = 0,07337.$$

Критерий Галилея Ga (6.40):

$$Ga = \frac{g \rho_{ж}^2}{\mu_{ж}^2 a_v^3} = \frac{9,81 \cdot 1000^2}{(1 \cdot 10^{-3})^2 140^3} = 3575072,9.$$

Коэффициент массоотдачи в газе β_r (6.35):

$$\beta_r = 0,013 \frac{\left(\varepsilon_{r-ж} \frac{v_r}{\rho_r} \right)^{0,25}}{Sc_r^{\frac{2}{3}} q^{0,4}} =$$

$$= 0,013 \frac{\left(5535,438 \frac{1,48 \cdot 10^{-5}}{1,215} \right)^{0,25}}{1,08^{0,667} (0,0135)^{0,4}} = 0,0352 \text{ м/с,}$$

при $Sc_r = \frac{v_r}{D_r} = \frac{1,48 \cdot 10^{-5}}{1,37 \cdot 10^{-5}} = 1,08$; $v_r = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1,8 \cdot 10^{-5}}{1,215} = 1,48 \cdot 10^{-5}$,

где

$$D_r = \frac{4,3 \cdot 10^{-7} T^{\frac{3}{2}}}{P \left(\frac{1}{v_A^3} + \frac{1}{v_B^3} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} = \frac{4,3 \cdot 10^{-7} T^{\frac{3}{2}}}{P \left(\frac{1}{v_A^3} + \frac{1}{v_B^3} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} =$$

$$= \frac{4,3 \cdot 10^{-7} 293^{\frac{3}{2}}}{765 \cdot 133,3 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{37^3} + \frac{1}{31,2^3} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{26} + \frac{1}{28}} = 1,37 \cdot 10^{-5}.$$

Коэффициент массоотдачи в жидкости $\beta_{ж}$ (6.46):

$$\beta_{ж} = 0,93 \sqrt{\frac{q a_v \psi_M D_{ж}}{\pi V_{св} \delta_{жд}}} =$$

$$= 0,93 \sqrt{\frac{0,0135 \cdot 140 \cdot 0,8231 \cdot 1,8 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 0,78 \cdot 0,07337}} = 1,16 \cdot 10^{-4},$$

$$D_{ж} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{AB \sqrt{\mu_{ж}} \left(\frac{1}{V_A^3} + \frac{1}{V_B^3} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} =$$

$$= \frac{1 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 4,7 \cdot \sqrt{1} \left(\frac{1}{37^3} + \frac{1}{18,9^3} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{26} + \frac{1}{18}} = 1,8 \cdot 10^{-9}.$$

Коэффициент массопередачи $K_{ог}$ (6.34):

$$K_{ог} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_r} + \frac{1}{\beta_{ж}}} = \left[\left(\frac{1}{0,0352} \right) + \left(27,789 \frac{1,215}{1,16 \cdot 10^{-4}} \right) \right]^{-1} = 0,0031 \text{ м/с.}$$

Высота единиц переноса $h_{ог}$ (6.47):

$$h_{ог} = \frac{\bar{G}}{\rho_r K_{ог} S_k a_v \psi_a} = \frac{0,175}{1,215 \cdot 0,0031 \cdot 0,5026 \cdot 140 \cdot 0,745} = 0,886,$$

где $\psi_a = A_3 W_{ж}^{0,455} (\sigma)^{-m_3} = 2,26 \cdot 13,5^{0,455} \cdot (0,0728 \cdot 10^3)^{-0,535} = 0,745$,

при $W_{ж} = q \rho_{ж} = 0,0135 \cdot 1000 = 13,5$ и $m_3 = b_3 d_{нас}^{-p_3} = 0,83 \cdot 2,5^{-0,48} = 0,535$.

Высота слоя насадки H_n (6.48):

$$H_H = h_{ог} n_{ог} = 0,886 \cdot 5,25 = 4,65 \text{ м.}$$

Поверхность массопередачи F (6.49) и (6.50):

$$F = a_v \psi_a S_K H = 140 \cdot 0,745 \cdot 0,5026 \cdot 4,65 = 243,76,$$

$$F = \frac{M}{K_{ог} \Delta \bar{X}_{cp} \rho_{г}} = \frac{0,059}{0,0031 \cdot 0,065 \cdot 1,215} = 240,99.$$

Поверхности массопередачи F , рассчитанные по формулам (6.49) и (6.50), согласуются с погрешностью около 1 %, следовательно, расчет выполнен правильно.

Расчет абсорбера можно выполнить так же используя число единиц переноса n_{ox} , высоту единиц переноса h_{ox} и коэффициент массопередачи отнесенных к концентрациям жидкой фазы (концентрация C_2H_2 в воде). Ниже приводится пример такого расчета.

Первоначально рассчитываются движущие силы массопередачи внизу абсорбера:

$$\Delta \bar{X}_H = \bar{X}_H^* - \bar{X}_H = 0,0009 - 0 = 0,0009,$$

вверху абсорбера:

$$\Delta \bar{X}_K = \bar{X}_K^* - \bar{X}_K = 0,013 - 0,0087 = 0,0043,$$

где $\bar{X}_H^* = \bar{Y}_K / m = 0,0271 / 27,789 = 0,0009$ - равновесная концентрация компонента в газовой фазе на входе в аппарат, кг/кг.

Средняя движущая сила массопередачи

$$\Delta \bar{X}_{cp} = \frac{\Delta \bar{X}_K - \Delta \bar{X}_H}{\ln \frac{\Delta \bar{X}_K}{\Delta \bar{X}_H}} = \frac{0,0009 - 0,0043}{\ln \frac{0,0009}{0,0043}} = 0,0022 \text{ кг/кг.}$$

Число единиц переноса n_{ox} равно:

$$n_{ox} = \frac{\bar{X}_K - \bar{X}_H}{\Delta \bar{X}_{cp}} = \frac{0,0087 - 0}{0,0022} = 3,95.$$

Коэффициент массопередачи:

$$K_{ox} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{г} m (\rho_{г} / \rho_{ж})} + \frac{1}{\beta_{ж}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0,0352 \cdot 27,789 (1,215 / 1000)} + \frac{1}{1,16 \cdot 10^{-4}}} = 1,06 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Высота единиц переноса:

$$h_{ox} = \frac{\bar{L}}{\rho_{ж} K_{ox} S_K a_v \psi_a} = \frac{6,807}{1000 \cdot 1,06 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5026 \cdot 140 \cdot 0,745} = 1,22.$$

Высота слоя насадки H_H в абсорбере

$$H_H = h_{ox} n_{ox} = 1,22 \cdot 3,95 = 4,82 \text{ м.}$$

Поверхность массопередачи F равна

$$F = a_v \psi_a S_K H = 140 \cdot 0,745 \cdot 0,5026 \cdot 4,82 = 252,67 \text{ м}^2.$$

Поверхность массопередачи по основному уравнению массопередачи

$$F = \frac{M}{K_{ox} \Delta \bar{X}_{cp} \rho_{ж}} = \frac{0,059}{1,06 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0022 \cdot 1000} = 253 \text{ м}^2.$$

Значения F , полученные по обоим выражениям, согласуются с предыдущими результатами, следовательно, расчет выполнен правильно.

Насадку в абсорбере следует размещать по секциям, чтобы устранить каналобразование («пристеночный эффект»). Высота каждой секции должна быть не более $H_{сек}=(3-4)D_k$. Отсюда:

$$H_{сек}=4 \cdot 0,8=3,2 \text{ м}$$

Число секций равно:

$$n_{сек}=H_n/H_{сек}=4,82/3,2=1,5,$$

т.е. число секций принимаем $n_{сек}=2$, с высотой $H_{сек}=2,41$ м.

Между секциями размещаются распределительные устройства.

Энергия на подачу газа вычисляется по формуле

$$N = \Delta P_{ор} G / \rho_r \text{ (Вт)}$$

где $\Delta P_{ор} = \Delta P'_{ор} H + \Delta P_M$ - гидравлическое сопротивление всей колонны с насадкой; ΔP_M - сопротивление распределителей и оросительных устройств.

Общий вид насадочных колонн дан в приложении.

Контрольные вопросы

1. Раскройте принципы процессов абсорбции и десорбции. Для решения каких практических задач применяют эти процессы?
2. Сформулируйте закон Генри. Для каких систем применим этот закон?
3. Как составляется материальный баланс абсорбции? Раскройте понятие рабочей линии процессов абсорбции и десорбции.
4. Как составляется тепловой баланс процесса абсорбции? Как влияет изменение температуры в системе на положение линии равновесия?
5. Что называют минимальным и оптимальным удельными расходами абсорбента? Как влияет изменение удельного расхода абсорбента на расход абсорбента и объем абсорбера?
6. Покажите особенности кинетики процессов абсорбции и хемосорбции.
7. Перечислите основные требования к абсорбционным аппаратам. Дайте их классификацию.

8. Раскройте принцип действия пленочных абсорберов. В каких случаях применение этих аппаратов наиболее рационально?
9. Сопоставьте характеристики работы противоточных и прямоточных пленочных абсорберов.
10. Как находится диаметр и высота абсорбера?
11. Что является движущей силой массопередачи?
12. Поясните схему и устройство насадочного абсорбера.
13. Дайте сравнительную характеристику распыливающих абсорберов. В каких случаях абсорберы этого типа имеют преимущества перед другими?
14. Какие показатели являются основными при выборе конструкции абсорбера для проведения конкретного процесса абсорбции?
15. Каков порядок расчета абсорберов?
16. Как влияет брызгоунос на эффективность тарельчатых колонн?
17. Перечислите методы проведения регенерации абсорбента.
18. Приведите примеры схем установок с однократным и многократным использованием абсорбента.
19. Перечислите методы регенерации абсорбента.
20. Процесс хемосорбции.

Варианты заданий для расчета и проектирования абсорбционных установок

Рассчитать и спроектировать абсорбционную установку непрерывного действия для улавливания указанного в задании компонента из воздушно – газовой смеси водой.

Исходные данные:

Количество газовой смеси, поступающей на установку V , м³/ч;

Температура газовой смеси t_r , °С;

Температура газовой смеси, подаваемой в абсорбер t_a , °С;

Начальная концентрация компонента в газовой фазе Y_H , мольных долей;

Степень извлечения φ ;

Начальная концентрация компонента в воде X_H , мольных долей;

Начальная температура воды, поступающей в абсорбер t_b , °С;

Начальная температура охлаждающей воды – 15°С;

Степень насыщения воды распределяемым компонентом η ;

Давление в абсорбере – атмосферное;

В установке подобрать насос для подачи воды в абсорбер, газодувку для подачи газовой смеси.

Разработать мероприятия по энергосбережению и подобрать соответствующее оборудование.

Таблица 25 Наименование поглощаемого вещества (компонента)

№ задания	Поглощаемый компонент	Насадка (кольца Рашига)
1	Аммиак	10×10×1,5мм неупор.
2	Оксид углерода	15×15×2мм неупор.
3	Диоксид углерода	25×25×3мм неупор.
4	Хлористый водород	50×50×5мм упор.
5		50×50×5мм упор.

Таблица 26. Варианты заданий

№ варианта	V	t_T	y_H	φ	x_H	t_n	η	t_a
1	5	450	0,12	0,95	0,120	18	0,75	30
2	8	480	0,1	0,94	0,15	20	0,78	31
3	10	400	0,14	0,96	0,2	22	0,80	31
4	6	410	0,08	0,96	0	21	0,76	28
5	12	425	0,12	0,94	0,13	19	0,77	27
6	9	375	0,11	0,93	0,11	16	0,72	25
7	7	420	0,09	0,97	0,08	20	0,74	32
8	11	415	0,13	0,92	0,07	22	0,82	28
9	13	410	0,12	0,94	0,11	17	0,77	27
10	7,5	460	0,10	0,95	0,1	18	0,80	25