

Теоретическая часть

1. Эффективность массопередачи:

$$E_{\text{ж}} := \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}}{x_{\text{н}} - x^*} \quad x^* := 0.5 \frac{\text{МГ}}{\text{КГ}}$$

2. Поток массы CO2:

$$M := L \cdot (x_{\text{н}} - x_{\text{к}}) \cdot 10^{-6}$$

3. Массовый расход воздуха:

$$G := \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot 40 \cdot L$$

4. Для хаотичной насадки скорость захлебывания

$$w_{\text{з}} := \sqrt{\frac{10^c \cdot g \cdot \varepsilon_{\text{св}}^3 \cdot \rho_{\text{ж}}}{a_v \cdot \rho_{\Gamma} \cdot \mu_{\text{ж}}^{0.16}}}$$

Для колец Рашина

$$c := -0.073 - 1.75 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}}\right)^{0.125}$$

Для насадки "Инжехим-2012"

$$c_1 := -0.47 - 1.08 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}}\right)^{0.125}$$

5. Диаметр декарбонизатора:

$$D_{\text{к}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w_{\Gamma}}}$$

$$w_{\Gamma} := 0.8 \cdot w_{\text{з}}$$

6. Коэффициент массоотдачи для колец Рашига из критериального выражения:

$$Sh_{\text{ж}} := 0.0021 \cdot Re_{\text{ж}}^{0.75} \cdot Sc_{\text{ж}}^{0.5}$$

$$Re_{\text{ж}} := \frac{4 \cdot q_{\text{ж}}}{a_v \cdot \nu_{\text{ж}}}$$

$$Sc_{\text{ж}} := \frac{\nu_{\text{ж}}}{D_{\text{ж}}}$$

При 20 °C: $\nu_{\text{ж}} := 10^{-6} \frac{\text{М}}{\text{С}}$

$$D_{\text{ж}} := 1.8 \cdot 10^{-9} \frac{\text{М}}{\text{С}}$$

Коэффициент массоотдачи

$$\beta_{\text{ж}} := Sh_{\text{ж}} \cdot \frac{D_{\text{ж}}}{\theta}$$

$$\theta := \left(\frac{\nu_{\text{ж}}^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

7. Коэффициент активной поверхности массопереноса для колец:

$$\Psi_a := \frac{b \cdot q_{\text{ж}}}{a_v \cdot (0.0367 + 0.0086 \cdot q_{\text{ж}})}$$

Для колец Рашига

$$b := 0.9$$

Для насадки "Инжехим-2012"

$$b_1 := 1$$

$$q_{\text{ж}} = \left[\frac{\text{М}^3}{\text{М}^2 \cdot \text{ч}} \right]$$

8. Число Пекле структуры потока для колец:

$$Pe_{\text{жн}} := 0.068 \cdot Re_{\text{ж}}^{0.78} \cdot Ga^{-0.33} \cdot a_v \cdot H$$

$$Ga := (\theta \cdot a_v)^{-3}$$

Для "Инжехим-2012"

$$Pe_{\text{жн}} := 2.348 \cdot H \cdot Re_{\text{ж}}^{0.248} \cdot d_{\text{э}}^{-1}$$

$$d_{\text{э}} := \frac{4 \cdot \varepsilon_{\text{св}}}{a_v}$$

9. Высота насадочного слоя при заданной эффективности

$$H := \frac{q_{\text{ж}} \cdot n}{\beta_{\chi v}} \cdot \left(\left(\frac{1}{1 - E_{\text{ж}}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \quad \text{где } n \approx \frac{Pe_{\text{жн}}}{2}$$

10. Вычисляется перепад давления и мощность на подачу воздуха

$$N_w := \frac{\Delta P_{\text{оп}} \cdot G}{\rho_{\Gamma}}$$

1. Расчёт для колец Рашига

1.1 Исходные данные:

$$a_v := 140 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3} \quad \varepsilon_{\text{св}} := 0.77 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} \quad d_{\text{э}} = 0.022 \text{ м}$$

$$L := 100 \frac{\text{т}}{\text{ч}} = 27.8 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad T_{\text{жн}} := 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad x_{\text{к}} := 3 \frac{\text{мг}}{\text{кг}} \quad x_{\text{н}} := 80 \frac{\text{мг}}{\text{кг}} \quad x^* := 0.5 \frac{\text{мг}}{\text{кг}}$$

$$T_{\text{гн}} := 15 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \varphi := 50 \%$$

Теплофизические свойства воды при: $T_{\text{жн}} := 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\rho_{\text{ж}} := 988 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\mu_{\text{ж}} := 0.549 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\nu_{\text{ж}} := 0.556 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$D_{\text{ж}} := 1.8 \cdot 10^{-9} \cdot \left(1 + 0.02 \cdot \left(\frac{T_{\text{жн}}}{^{\circ}\text{C}} - 20 \right) \right) \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = 2.88 \cdot 10^{-9} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$Sc_{\text{ж}} := \frac{\nu_{\text{ж}}}{D_{\text{ж}}} = 193.056$$

$$\rho_{\text{г}} := 1.22 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

1.2 Результаты расчета:

1.2.1 Эффективность массопередачи:

$$E_{\text{ж}} := \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}}{x_{\text{н}} - x^*} = 0.9686$$

1.2.2 Поток массы CO2:

$$M := L \cdot (x_{\text{н}} - x_{\text{к}}) = 0.00214 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

1.2.3 Массовый расход воздуха:

$$G := \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot 40 \cdot L = 1.372 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

1.2.4 Скорость захлебывания:

Для колец Рашига

$$c := -0.073 - 1.75 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0.125} = -1.68$$

$$w_{\text{э}} := \sqrt{\frac{10^c \cdot g_{\text{э}} \cdot \varepsilon_{\text{св}}^3 \cdot \rho_{\text{ж}}}{a_v \cdot \rho_{\text{г}} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\text{Па} \cdot \text{с}} \right)^{0.16}}} = 0.772 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$w_{\text{г}} := 0.8 \cdot w_{\text{э}} = 0.617 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

1.2.5 Диаметр декарбонизатора:

$$D_K := \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w_{\Gamma}}} = 1.523 \text{ м}$$

1.2.6 Коэффициент массоотдачи для колец Рашига:

$$S_K := 2 \text{ м}^2$$

$$q_{\text{ж}} := \frac{L}{\rho_{\text{ж}} \cdot S_K} = 0.014 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

$$q_{\text{ж}} = 50.607 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

$$Re_{\text{ж}} := \frac{4 \cdot q_{\text{ж}}}{a_v \cdot v_{\text{ж}}} = 722.383$$

$$Sh_{\text{ж}} := 0.0021 \cdot Re_{\text{ж}}^{0.75} \cdot Sc_{\text{ж}}^{0.5} = 4.07$$

$$\beta_{\text{ж}} := Sh_{\text{ж}} \cdot \frac{D_{\text{ж}}}{\theta} = 3.7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \theta := \left(\frac{v_{\text{ж}}^2}{g_{\text{ж}}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

1.2.7 Коэффициент активной поверхности массопереноса для колец:

Для использования эмпирического выражения вводятся безразмерные численные значения плотности орошения $q_{\text{ж.0}}$ и

удельной поверхности $a_{v.0}$, выраженных соответственно в $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$ и $\frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$.

$$q_{\text{ж.0}} := \frac{q_{\text{ж}}}{\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}} \quad a_{v.0} := \frac{a_v}{\frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}}$$

$$\Psi_a := \frac{b \cdot q_{\text{ж.0}}}{a_{v.0} \cdot (0.0367 + 0.0086 \cdot q_{\text{ж.0}})} = 0.69$$

Для колец Рашига

$$b := 0.9$$

$$\beta_{\text{жv}} := \Psi_a \cdot a_v \cdot \beta_{\text{ж}} = 0.0358 \text{ с}^{-1}$$

1.2.8 Число Пекле структуры потока для колец:

$$Ga := (\theta \cdot a_v)^{-3} = 11560775.97$$

$$Ga^{-0.33} = 0.00467$$

$$Pe_{\text{жн}} := 0.068 \cdot Re_{\text{ж}}^{0.78} \cdot Ga^{-0.33} \cdot a_v \cdot H = 11.318$$

Первоначальное приближение

$$H := 1.5 \text{ м}$$

$$n := \frac{Pe_{\text{жн}}}{2} = 5.659$$

1.2.9 Высота насадки:

$$H := \frac{q_{\text{ж}} \cdot n}{\beta_{\text{жv}}} \cdot \left[\left(\left(\frac{1}{1 - E_{\text{ж}}} \right) - 1 \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] = 1.851 \text{ м}$$

```

eps := 0.001
maxIter := 50
H_curr := H
for i ∈ [1..maxIter]
    Pe_жн := 0.068 · Re_ж0.78 · Ga-0.33 · a_v · H_curr
    if Pe_жн > 10
        n :=  $\frac{Pe_{\text{жн}}}{2}$ 
    else
        n :=  $\frac{Pe_{\text{жн}} + 1.25}{2.5}$ 
    H_new :=  $\frac{q_{\text{ж}} \cdot n}{\beta_{\text{жв}}} \cdot \left( \left( \frac{1}{1 - E_{\text{ж}}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right)$ 
    if |H_new - H_curr| < eps
        H_res := H_new
        break
H :=  $\frac{H_{\text{curr}} + H_{\text{new}}}{2}$ 
Pe_жнcurr := 0.068 · Re_ж0.78 · Ga-0.33 · a_v · H_curr

```

$$H = 1.81 \text{ м}$$

$$H_{\text{new}} = 1.759 \text{ м}$$

```

eps := 0.001
maxIter := 50
H_curr := H_new
for i ∈ [1..maxIter]
    Pe_жн := 0.068 · Re_ж0.78 · Ga-0.33 · a_v · H_curr
    if Pe_жн > 10
        n :=  $\frac{Pe_{\text{жн}}}{2}$ 
    else
        n :=  $\frac{Pe_{\text{жн}} + 1.25}{2.5}$ 
    H_new :=  $\frac{q_{\text{ж}} \cdot n}{\beta_{\text{жв}}} \cdot \left( \left( \frac{1}{1 - E_{\text{ж}}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right)$ 
    if |H_new - H_curr| < eps
        H_res := H_new
        break
H :=  $\frac{H_{\text{curr}} + H_{\text{new}}}{2}$ 
Pe_жнcurr := 0.068 · Re_ж0.78 · Ga-0.33 · a_v · H_curr

```

$$H = 1.77 \text{ м}$$

$$H_{\text{new}} = 1.784 \text{ м}$$

В настоящем расчете уточненные значения высоты насадки выполняются методом последовательных приближений с ручным обновлением начального значения (нужно каждый раз заменять значение Hcurr в ручную, копируя Hnew). Однако при необходимости данный цикл может быть реализован в автоматическом режиме (нужно будет задать точность eps и он сам будет итерировать до заданной точности)

1.2.10 Расчет перепада давления воздуха:

$$\Delta P_{\text{сyx}} := \xi_{\text{сyx}} \cdot \frac{H}{d_{\text{э}}} \cdot \frac{\rho_{\text{г}} \cdot w_{\text{г}}^2}{2 \cdot \varepsilon_{\text{св}}} \quad \xi_{\text{сyx}} := 3.92$$

$$\Delta P_{\text{сyx}} = 123.74 \text{ Па}$$

Определено графически: $\Delta P_{\text{оп}} := 223.6 \text{ Па}$

$$\frac{\Delta P_{\text{оп}}}{\Delta P_{\text{сyx}}} = 1.8$$

Мощность на подачу воздуха: $N_w := \Delta P_{\text{оп}} \cdot S_K \cdot w_{\text{г}} = 276 \text{ Вт}$

С учетом входных и выходных гидравлических сопротивлений и опорной решетки мощность следует повысить примерно в два раза, т.е. тогда

$$N_w \cdot 2 = 552 \text{ Вт}$$

2. Расчет с насадкой "Инжехим-2012"

2.1 Исходные данные:

$$a_v := 110 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \quad \varepsilon_{\text{св}} := 0.95 \frac{\text{м}}{\text{с}^3} \quad d_{\text{э}} = 0.0345 \text{ м}$$

$$L := 100 \frac{\text{Т}}{\text{ч}} = 27.8 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad T_{\text{жн}} := 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad x_{\text{к}} := 3 \frac{\text{Мг}}{\text{кг}} \quad x_{\text{н}} := 80 \frac{\text{Мг}}{\text{кг}} \quad x^* := 0.5 \frac{\text{Мг}}{\text{кг}}$$

$$T_{\text{гн}} := 15 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \varphi := 50 \%$$

Теплофизические свойства воды при:

$$\rho_{\text{ж}} := 988 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\mu_{\text{ж}} := 0.556 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\nu_{\text{ж}} := 0.556 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$D_{\text{ж}} := 1.8 \cdot 10^{-9} \cdot \left(1 + 0.02 \cdot \left(\frac{T_{\text{жн}}}{^{\circ}\text{C}} - 20 \right) \right) \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = 2.88 \cdot 10^{-9} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$Sc_{\text{ж}} := \frac{\nu_{\text{ж}}}{D_{\text{ж}}} = 193.056$$

$$\rho_{\text{г}} := 1.22 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

2.2 Результаты расчета:

2.2.1 Эффективность массопередачи:

$$E_{\text{ж}} := \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}}{x_{\text{н}} - x^*} = 0.9686$$

2.2.2 Поток массы CO₂:

$$M := L \cdot (x_H - x_K) = 0.00214 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

2.2.3 Массовый расход воздуха:

$$G := \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot 40 \cdot L = 1.372 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

2.2.4 Скорость захлебывания:

Для насадки "Инжехим-2012"

$$c := -0.47 - 1.08 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}}\right)^{0.125} = -1.46$$

$$w_{\text{с}} := \sqrt{\frac{10^c \cdot g_{\text{с}} \cdot \varepsilon_{\text{св}}^3 \cdot \rho_{\text{ж}}}{a_v \cdot \rho_{\Gamma} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\text{Па} \cdot \text{с}}\right)^{0.16}}} = 1.532 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$w_{\Gamma} := 0.8 \cdot w_{\text{с}} = 1.23 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2.2.5 Диаметр декарбонизатора:

$$D_K := \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w_{\Gamma}}} = 1.08 \text{ м}$$

2.2.6 Коэффициент массоотдачи для насадки "Инжехим-2012":

$$S_K := 1.13 \text{ м}^2$$

$$q_{\text{ж}} := \frac{L}{\rho_{\text{ж}} \cdot S_K} = 0.025 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

$$q_{\text{ж}} = 89.6 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

$$\text{Re}_{\text{ж}} := \frac{4 \cdot q_{\text{ж}}}{a_v \cdot \nu_{\text{ж}}} = 1627.3$$

$$\text{Ga} := (\theta \cdot a_v)^{-3} = 23833786.08$$

$$\text{Re}_{\text{ж}} := 1628.6 \quad \text{Ga} := 23810071.3$$

$$\varepsilon_{\text{жг}} := 0.704 \cdot \text{Re}_{\text{ж}}^{0.484} \cdot \text{Ga}^{-0.346} = 0.0708$$

$$\vec{u}_{\text{ж}} := \frac{q_{\text{ж}}}{\varepsilon_{\text{жг}}} = 0.352 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Расстояние между выступами шероховатости поверхности

$$\lambda := 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Коэффициент массоотдачи

$$\beta_{\text{ж}} := \left(\frac{D_{\text{ж}} \cdot \vec{u}_{\text{ж}}}{\lambda} \right)^{0.5} = 5.8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\beta_{\text{ж}} := 7.1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2.2.7 Коэффициент активной поверхности массопереноса для насадки:

Для насадки "Инжехим-2012"

$$b := 1$$

$$\Psi_a := 1$$

$$\beta_{жв} := \Psi_a \cdot a_v \cdot \beta_{ж} = 0.0781 \text{ с}^{-1}$$

2.2.8 Число Пекле структуры потока для насадки:

$$Pe_{жн} := 639 \quad n := 319$$

Режим идеального вытеснения жидкой фазы

2.2.9 Высота насадки:

$$H := \frac{q_{ж} \cdot n}{\beta_{жв}} \cdot \left(\left(\frac{1}{1 - E_{ж}} \right) - 1 \right)^{\frac{1}{n}} - 1 = 1.1 \text{ м}$$

2.2.10 Расчет перепада давления:

$$Re_{\Gamma} := 2580.6 \quad w_{\Gamma} := 1.1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\xi_{сyx} := \frac{6.5}{Re_{\Gamma}} = 3.47$$

$$\Delta P_{сyx} := \xi_{сyx} \cdot \frac{H}{d_{\text{э}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} \cdot w_{\Gamma}^2}{2 \cdot \varepsilon_{св}}$$

$$\Delta P_{сyx} = 90.111 \text{ Па}$$

$$q_{ж} := 50.6 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

$$\Delta P_{op} := \Delta P_{сyx} \cdot 10 = 0.002 \cdot q_{ж} \frac{\text{ч}}{\text{м}^3} = 113.8 \text{ Па}$$

Мощность на подачу воздуха: $N_w := \Delta P_{op} \cdot S_K \cdot w_{\Gamma} = 141 \text{ Вт}$