

## Задача №1

Рассчитать и подобрать по каталогу трубчатую печь для нагрева и частичного испарения 150 т/ч нефти или нефтяной фракции относительной плотности 0,81 с начальной температурой 220°C. В печи сырье нагревается до 320°C и  $\epsilon = 0,15$  % его испаряется. Относительная плотность испарившейся части – 0,7, неиспарившейся – 0,83. топливо – газ. Содержание компонентов топливного газа приведено в объемных процентах:

$H_2$	12
$CH_4$	80
$C_2H_6$	5
$C_3H_8$	3

Пересчитаем состав топлива из объемных в массовые проценты:

Компоненты	$M_i$	Мольная (объемная) доля, $r_i$	$M_i \cdot r_i$	$g_i = \frac{M_i \cdot r_i}{\sum M_i \cdot r_i} \cdot 100$
$H_2$	2	0,12	0,24	1,51
$CH_4$	16	0,80	12,8	80,71
$C_2H_6$	30	0,05	1,50	9,46
$C_3H_8$	44	0,03	1,32	8,32
Сумма	-	1,00	15,86	100,00

Определим элементный состав топлива в массовых процентах:

1. Содержание углерода:

$$C = \sum_{CH_4}^{C_3H_8} C_i = \sum \frac{g_i \cdot 12 \cdot n_i}{M_i} = \frac{80,71 \cdot 12 \cdot 1}{16} + \frac{9,46 \cdot 12 \cdot 2}{30} + \frac{8,32 \cdot 12 \cdot 3}{44} = 74,91 \% \text{ масс.}$$

где  $n_i$  – число атомов углерода в данных компонентах топлива.

2. Содержание водорода:

$$C = \sum_{CH_4}^{C_3H_8} H_i = \sum \frac{g_i \cdot m_i}{M_i} = \frac{1,51 \cdot 2}{2} + \frac{80,71 \cdot 4}{16} + \frac{9,46 \cdot 6}{30} + \frac{8,32 \cdot 8}{44} = 25,09 \% \text{ масс.}$$

где  $m_i$  – число атомов водорода в данных компонентах топлива.

Найдем теоретический расход воздуха на 1 кг топлива:

$$L_o = \frac{0,0267C + 0,08H}{0,23} = \frac{0,0267 \cdot 74,91 + 0,08 \cdot 25,09}{0,23} = 17,42 \text{ кг / кг.}$$

Для печей ЦС-1 коэффициент избытка воздуха примем  $\alpha = 1,06$  [2].

Тогда действительный расход воздуха составит:

$$L_o = L_o \cdot \alpha = 17,42 \cdot 1,06 = 18,47 \text{ кг / кг.}$$

2. Состав дымовых газов, полученных при сжигании 1 кг топлива:

$$m_{CO_2} = 0,0367 \cdot C = 0,0367 \cdot 74,91 = 2,75 \text{ кг/кг},$$

$$m_{H_2O} = 0,09 \cdot H = 0,09 \cdot 25,09 = 2,26 \text{ кг/кг},$$

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot L_o (\alpha - 1) = 0,23 \cdot 17,42(1,06 - 1) = 0,24 \text{ кг/кг},$$

$$m_{N_2} = 0,77 \cdot L_o = 0,77 \cdot 18,47 = 14,22 \text{ кг/кг},$$

Суммарное количество дымовых газов, полученных при сжигании 1 кг топлива:

$$\sum m_i = 2,75 + 2,26 + 0,24 + 14,22 = 19,47 \text{ кг/кг}.$$

Проверка:

$$\sum m_i = 1 + L_o \cdot \alpha = 1 + 17,42 \cdot 1,06 = 19,47 \text{ кг/кг}.$$

Содержанием влаги в воздухе пренебрегаем.

3. Допустимую концентрацию кислорода в дымовых газах, по которой ведется контроль за избытком воздуха:

$$C_{O_2} = \frac{m_{O_2} \cdot 100}{\sum m_i} = \frac{0,24 \cdot 100}{19,47} = 1,23\%.$$

4. Низшую теплоту сгорания топлива находим по формуле Менделеева:

$$Q_p^n = 339 \cdot C + 1030 \cdot H = 339 \cdot 74,91 + 1030 \cdot 25,09 = 51237,19 \text{ кДж/кг}.$$

5. КПД печи.

Рассчитаем энтальпию дымовых газов, полученных из 1 кг топлива при различных температурах по уравнению:

$$q_T = t(\sum m_i \cdot C_i),$$

где  $t$  – температура продуктов сгорания, °С;

$C_i$  – средние массовые теплоемкости продуктов сгорания, кДж/(кг·К)

[2].

$$q_{27} = 27(2,75 \cdot 0,8286 + 2,26 \cdot 1,8632 + 0,24 \cdot 0,9169 + 14,22 \cdot 1,0308) = 576,92 \text{ кДж/кг}.$$

Сведем результаты расчета в таблицу 1.

$T, \text{ К}$	273	300	500	700	900	1100	1300
$q_T, \text{ кДж/кг}$	0	576,92	4945,64	9525,32	14351,04	19379,70	24629,89

Принимаем температуру уходящих из печи дымовых газов на 100°С выше начальной температуры сырья:

$$t_{yx} = t_1 + 100 = 220 + 100 = 320 \text{ °С}.$$

Энтальпию дымовых газов температуре 320°С,  $q_{yx} = 7500 \text{ кДж/кг}$  (таб. 1).

Найдем КПД печи:

$$\eta = 1 - \left( \frac{q_{nom}}{Q_p^n} + \frac{q_{yx}}{Q_p^n} \right),$$

где  $\frac{q_{nom}}{Q_p^n}$  - потери тепла в окружающую среду, принимаем 0,06.

$$\eta = 1 - \left( 0,06 + \frac{7500}{51237,19} \right) = 0,7936.$$

5. Определим полезную нагрузку печи:

$$Q_{пол} = G_c [e \cdot q_{t_2}^n + (1 - e)q_{t_2}^{жс} - q_{t_1}^{жс}] = 150000 [0,15 \cdot 1063,24 + (1 - 0,15)783,57 - 506,7] = 47,82 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч} = 13283,33 \text{ кВт},$$

где  $q_{t_1}^{жс} = q_{220}^{жс} = 506,7 \text{ кДж/кг}$  при  $\rho = 0,8$  [2, стр. 329],

$q_{t_2}^{жс} = q_{320}^{жс} = 783,57 \text{ кДж/кг}$  при  $\rho = 0,83$  [2, стр. 330],

$q_{t_2}^n = q_{320}^n = 1063,24 \text{ кДж/кг}$  при  $\rho = 0,7$  [2, стр. 333].

7. Расход топлива:

$$B = \frac{Q_{пол}}{Q_p^n \cdot \eta} = \frac{47,82 \cdot 10^6}{51237,19 \cdot 0,7936} = 1176,04 \text{ кг/ч}.$$

8. Поверхность радиантных труб:

Принимаем температуру дымовых газов на выходе из радиантных труб  $t_n = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ , и по таблице 1 определяем энтальпию дымовых газов:

$$q_{t_n} = 18700 \text{ кДж/кг}.$$

Пусть потери тепла в топке составляют 4%, тогда  $\eta_T = 1 - 0,04 = 0,96$ .

Тепловая нагрузка радиантных труб:

$$Q_p = B(Q_p^n \cdot \eta_T - q_{t_n}) = 1176,04(51237,19 \cdot 0,96 - 18700) = 35,8548 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч} = 9959,6549 \text{ кВт}$$

Принимаем допустимую теплонапряженность радиантных труб для печи ЦС-1 установки АВТ:  $q_p = 34,8 \text{ кВт/м}^2$  [4, стр. 21].

Необходимая поверхность радиантных труб:

$$F_p = \frac{Q_p}{q_p} = \frac{9959,6549}{34,8} = 286,197 \text{ м}^2.$$

С учетом необходимой теплопроизводительности и поверхности радиантных труб подбираем из каталога [4, стр. 21] стандартную печь ЦС-1  $\frac{345}{15}$  со

следующей технической характеристикой:

- поверхности нагрева радиантных труб: 345 м<sup>2</sup>
- рабочая длина радиантных труб: 15 м
- теплопроизводительности: 16000 кВт
- среднедопускаемая теплонапряженность радиантных труб: 34,8 кВт
- внутренний диаметр корпуса: 5,5 м

9. Находим необходимое число горелок типа ГП-1:

$$n_{гор} = \frac{Q_{затр}}{q_{гор}} = \frac{Q_{пол}}{\eta \cdot q_{гор}} = \frac{13283,33}{0,7936 \cdot 1979} = 8,46 \approx 9 \text{ горелок,}$$

где  $q_{гор} = 1,7 \text{ Гкал/ч} = 1979 \text{ кВт}$  — тепловая мощность горелки [6, стр. 50].

## Задача № 2

Используя исходные данные задачи №1, определить количества водяного пара, которое можно получить, установив газотрубный котел-утилизатор для использования тепла уходящих из печи дымовых газов. Температура питательной воды –  $t_i = 100^\circ \text{C}$ , избыточное давление получаемого насыщенного водяного пара –  $p = 4 \text{ атм}$ , температура дымовых газов после котла-утилизатора –  $t_{\text{ог}} = 190^\circ \text{C}$ .

Определить площадь поверхности теплопередачи котла-утилизатора, выбрав ориентировочное значение коэффициента теплопередачи от дымовых газов к кипящей воде.

Средняя разность температур:

$$\begin{array}{ccc}
 320^\circ \text{C} & \longrightarrow & 190^\circ \text{C} \\
 151,1^\circ \text{C} & \longleftarrow & 100^\circ \text{C} \\
 \hline
 \Delta t_{\text{г}} = 168,9^\circ \text{C} & & \Delta t_{\text{м}} = 90^\circ \text{C}
 \end{array}$$

где  $t = 151,1^\circ \text{C}$  - температура водяного пара при избыточном давлении 4 атм. [1, стр. 547].

$$\frac{\Delta t_{\text{г}}}{\Delta t_{\text{м}}} = \frac{168,9}{90} = 1,88 < 2.$$

$$\text{Тогда, } \Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{г}} + \Delta t_{\text{м}}}{2} = \frac{168,9 + 90}{2} = 129,45^\circ \text{C}.$$

Количество тепла, передаваемого сырью в котле – утилизаторе:

$$Q = B(q_{\text{д.г.}}^{320} - q_{\text{д.г.}}^{190}) = 1176,04(7500 - 4500) = 3528120 \text{ кДж/ч},$$

где  $q_{\text{д.г.}}^{320}$ ,  $q_{\text{д.г.}}^{190}$  - из графика задания № 1.

Количество насыщенного водяного пара найдем из уравнения:

$$Q = G_{\text{в.п.}}(q_{\text{в.п.}}^{151,1} - c \cdot t),$$

где  $c$  – теплоемкость воды при  $t = 100^\circ \text{C}$  [1, рис. XI];

$q_{\text{в.п.}}^{151,1}$  – энтальпия насыщенного водяного пара при  $t = 151,1^\circ \text{C}$  [1];

$t$  – температура кипения воды.

Расход насыщенного водяного пара:

$$G_{\text{в.п.}} = \frac{3528120}{2754,2 - 4,19 \cdot 100} = 1510,843 \text{ кг/ч}.$$

Площадь поверхности теплопередачи котла – утилизатора:

$$F = \frac{Q}{\Delta t_{\text{ср}} \cdot K} = \frac{3528120}{129,45 \cdot 50} = 545,094 \text{ м}^2,$$

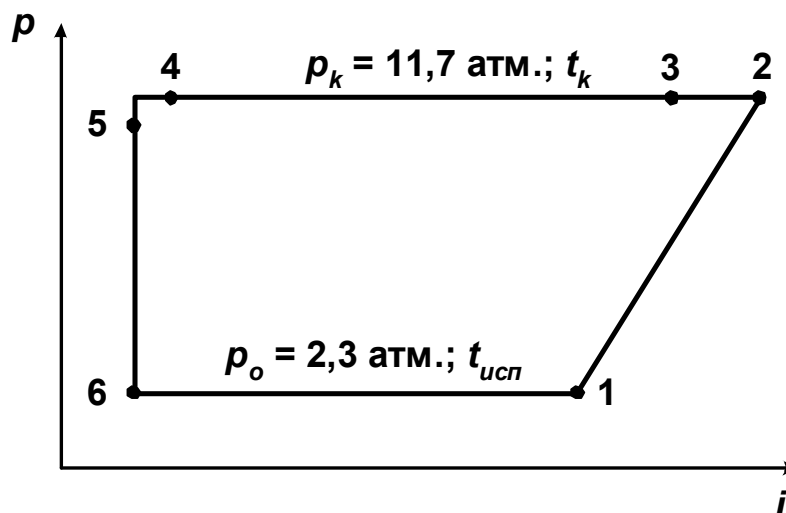
где  $K = 50 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$  - коэффициент теплопередачи в котле – утилизаторе [1, стр. 169].

### Задача № 3

Определить действительную мощность компрессора одноступенчатой холодильной парокompрессионной машины с сухим циклом, холодильный эффект и расход воды в конденсаторе.

Начальную и конечную температуры воды принять самостоятельно.

Хладагент – пропан, холодопроизводительность – 125 кВт,  $t_u = -22^\circ\text{C}$ ,  $t_k = 30^\circ\text{C}$ ,  $t_n = 25^\circ\text{C}$ .



Параметры хладагента в узловых точках холодильного цикла:

параметры	Точки цикла					
	1	2	3	4	5	6
$p, \text{МПа}$	0,23	1,17	1,17	1,17	1,17	0,23
$t, ^\circ\text{C}$	-22	47	30	30	25	-22
$i, \text{кДж/кг}$	448,33	536,32	506,99	167,60	159,22	159,22
$v, \text{м}^3/\text{кг}$	0,19					

Удельная холодопроизводительность:

$$q_o = i_1 - i_6 = 448,33 - 159,22 = 289,11 \text{ кДж/кг}.$$

Работа сжатия в компрессоре:

$$l_{ad} = i_2 - i_1 = 536,32 - 448,33 = 87,99 \text{ кДж/кг}.$$

Холодильный коэффициент идеального цикла:

$$\varepsilon_u = \frac{T_o}{T_k - T_o} = \frac{251}{303 - 251} = 4,8.$$

Холодильный коэффициент реального цикла:

$$\varepsilon_p = \frac{q_o}{l_{ad}} = \frac{289,11}{87,99} = 3,3.$$

По отношению к идеальному циклу КПД составит:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_u} \cdot 100 = \frac{3,3}{4,8} \cdot 100 = 68,8\% .$$

Количество циркулирующего хладагента найдем по формуле:

$$G = \frac{Q_o}{q_o} = \frac{125000}{289110} = 0,43 \text{ кг/с} = 1548 \text{ кг/ч} ,$$

где  $Q_o$  – холодопроизводительность установки, Вт.

Найдем объем циркулирующего хладагента:

$$V = G \cdot v = 1548 \cdot 0,19 = 294,12 \text{ м}^3/\text{ч} ,$$

где  $v$  – удельный объем пара хладагента на входе в компрессор.

Адиабатическая мощность компрессора:

$$N_{ad} = G \cdot l_{ad} = 0,43 \cdot 87,99 = 37,84 \text{ кВт} .$$

Определим соотношение давления конденсации и испарения хладагента:

$$\frac{p_k}{p_o} = \frac{1,17}{0,23} = 5,09 .$$

Коэффициент подачи компрессора  $\lambda_i = f_1\left(\frac{p_k}{p_o}\right) = 0,73$  [5, стр. 358].

Индикаторный КПД  $\eta_i = f_2\left(\frac{p_k}{p_o}\right) = 0,8$  [5, стр. 358].

Объем, описываемый поршнем, составит:

$$V_m = \frac{V}{\lambda_i} = \frac{294,12}{0,73} = 402,9 \text{ м}^3/\text{ч} .$$

Принимаем механический КПД компрессора  $\eta_m = 0,85$  [1, стр. 451], и определим эффективную мощность компрессора:

$$N_{эф} = \frac{N_{ad}}{\eta_i \cdot \eta_m} = \frac{37,84}{0,8 \cdot 0,85} = 55,6471 \text{ кВт} .$$

Количество тепла, отводимого в конденсаторе:

$$Q_k = \rho \cdot Q_o + N_{ad} = 1,1 \cdot 125000 + 37840 = 175340 \text{ Вт} ,$$

где  $\rho$  – поправочный коэффициент,  $\rho = 1,08 \div 1,2$ .

Принимаем температуру воды на выходе из конденсатора  $t_k = t_n - 5 = 25 - 5 = 20$  °С, а начальную температуру воды  $t_n = 15$  °С.

Расход охлаждающей воды:

$$W = \frac{Q_k}{C_s(t_k - t_n)} = \frac{175340}{4190(20 - 15)} = 8,37 \text{ кг/с} = 30132 \text{ кг/ч} ,$$

где  $C_s = 4190 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  - теплоемкость воды [1, стр. 544, рис. XI].

## Задача № 4

№ 3 Определить эксергетический КПД холодильного цикла по результатам задачи

Эксергетический КПД холодильного цикла определяем по формуле:

$$\eta_e = \frac{q_o}{l_{ад}} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{пер} \cdot \eta_{дв} \cdot \frac{T_{cp} - T_x}{T_x},$$

где  $\eta_{пер}$  – КПД передачи;

$\eta_{дв}$  – КПД двигателя компрессора;

$T_{cp}$  – начальная температура охлаждающей среды в конденсаторе, К;

$T_x$  – температура охлаждаемого продукта, К.

В расчетах принять  $T_x$  выше на 5 К температуры испарения хладагента.

По [1, стр. 451] принимаем  $\eta_m = 0,85$ ,  $\eta_{пер} = \eta_{дв} = 0,95$ , а по [5, стр. 358] принимаем  $\eta_i = 0,8$ .

Температура охлаждающей среды:

$$T_{cp} = t_n + 273 = 15 + 273 = 288 \text{ К}.$$

Температура охлаждаемого продукта:

$$T_x = T_o + 5 = 251 + 5 = 256 \text{ К}.$$
$$\eta_e = \frac{289,11}{87,99} \cdot 0,8 \cdot 0,85 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot \frac{288 - 256}{256} = 0,2523.$$



## Литература

1. Павлов К.Ф., Романков И.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для взов. – Л.: Химия, 1987. - 576с.
2. Кузнецов А.А., Кагерманов С.М., Судаков Е.Н. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности. – Л.: Химия, 1974. - 344с.
3. Скобло А.И., Трегубов И.А., Егоров Н.Н. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. –М.: Химия, 1982. - 584с.
4. Трубочатые печи. Каталог. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1990. – 32с.
5. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. Изд. 2-е, перер. и доп. /Под ред. Дытнерского – М.: Химия, 1991. - 494с.
6. Ентус Н.Р. Шарихин В.В. Трубочатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. –М.: Химия, 1987. - 299с.
7. Методические указания и задания к контрольным и курсовым работам по курсу «Энерготехнология химических производств» для студентов специальности Т.15.02, составитель З.С. Теряева. Новополоцк, 2001.