#### БАНК ЗАДАЧ ИЭВТ

### для подготовки к вступительным испытаниям в магистратуру

# Задания № 1 по теме «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА»

### Пример.

Определить количество молекул, содержащихся в газе объемом 1 мм<sup>3</sup> при давлении 0,1 МПа и температуре 20°C.

#### Решение.

Абсолютная температура газа равна:

$$T = 273,15 \text{ K} + t$$
,  $^{\circ}\text{C} = 273,15 \text{ K} + 20^{\circ}\text{C} = 293,15 \text{ K}$ .

Число молекул газа:

$$N = \frac{pV}{T} \frac{N_A}{\mu R} = \frac{0.1 \cdot 10^6 \,\mathrm{\Pia} \cdot 1 \cdot 10^{-9} \,\mathrm{M}^3}{293,15 \,\mathrm{K}} \cdot \frac{6,022 \cdot 10^{23} \,\mathrm{моль^{-1}}}{8,314 \,\frac{\mathrm{Дж}}{\mathrm{моль} \cdot \mathrm{K}}} = 2,471 \cdot 10^{16}.$$

**Ответ:**  $2,471 \cdot 10^{16}$  молекул.

# Задания № 2 по теме «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА»

### Пример.

Воздух, массой 12 кг, при абсолютном давлении 6 бар и температуре 300 К расширяется в изотермическом процессе, при этом его объем увеличивается в 4 раза. Определить начальные и конечные параметры воздуха, количество подведенной теплоты и работу изменения объема.

#### Решение.

Начальный объём:

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{12 \text{ кг} \cdot 287 \frac{Дж}{\text{кг} \cdot \text{K}} \cdot 300 \text{ K}}{6 \cdot 10^5 \text{Па}} = 1,722 \text{ м}^3.$$

Конечный объём:

$$V_2 = 4V_1 = 4 \cdot 1,722 \text{ m}^3 = 6,888 \text{ m}^3.$$

Конечное давление:

$$p_2 = p_1 \frac{V_1}{V_2} = 6 \cdot 10^5 \text{Па} \cdot \frac{1,722 \text{ м}^3}{6,888 \text{ м}^3} = 1,5 \cdot 10^5 \text{Па} = 150 \text{ кПа}$$

Работа расширения и количество подведённой теплоты:

$$L=Q=p_1V_1 \ln rac{V_1}{V_2}=6\cdot 10^5 \Pi \mathrm{a}\cdot 1{,}722\ \mathrm{m}^3\cdot \ln rac{6{,}888\ \mathrm{m}^3}{1{,}722\ \mathrm{m}^3}=1432\ \mathrm{кДж}.$$

**Ответ:**  $V_1 = 1,722 \text{ м}^3$ ;  $V_2 = 6,888 \text{ м}^3$ ;  $p_2 = 150 \text{ кПа}$ ; L = Q = 1432 кДж.

### Задания № 3 по теме «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ»

### Пример.

На сколько изменится максимальный термический КПД, который можно получить в термодинамическом цикле, если температура холодного источника увеличится с t21 = 30 °C до t22 = 58 °C, температура горячего источника уменьшится с t11 = 1000 °C до t12 = 500 °C.

#### Решение.

Максимальный термодинамический КПД цикла определяется по формуле Карно:

$$\eta = 1 - T_{\min} \mid T_{\max},$$

где  $T_{max}$  и  $T_{min}$  - абсолютные температуры горячего и холодного источника теплоты соответственно.

Вычисляем первоначальное значение КПД:

$$\eta_1 = 1 - (273 + t_{21}) / (273 + t_{11}) = 1 - (273 + 30) / (273 + 1000) = 0,762$$

Вычисляем новое значение КПД:

$$\eta_2 = 1 - (273 + t_{22}) / (273 + t_{12}) = 1 - (273 + 60) / (273 + 500) = 0,572$$

Разница между первоначальным и новым значениями КПД составляет:

$$\eta_1 - \eta_2 = 0,762 - 0,572 = 0,19$$

Ответ: Значение КПД уменьшится на 0,19.

## Задания № 4 по теме «ХИМИЯ»

# Пример 1.

Стандартный электродный потенциал, потенциал анода и катода, ЭДС серебряно-цинкового гальванического элемента.

#### Решение.

Выпишем из таблицы значения стандартных электродных потенциалов Zn и Ag:

$$E_{Ag^{+}/Ag}^{0} = +0.799 \text{ B}, \quad E_{Zn^{2+}/Zn}^{0} = -0.763 \text{ B}.$$

Т.к.  $E_{Ag^+/Ag}^0 > E_{Zn^{2+}/Zn}^0$ , электроны будут переходить от цинкового электрода к серебряному. Тогда серебряный электрод — катод, цинковый электрод — анод. Электродные реакции для серебряно-цинкового элемента записываются следующим образом:

$$\begin{array}{ccc}
Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2\overline{e} \\
A: & Ag^{+} + \overline{e} \rightarrow Ag
\end{array} \begin{vmatrix}
1 \\
2
\end{vmatrix}$$

Суммируя анодную и катодную реакции, получаем уравнение токообразующей реакции (ТОР):

$$Zn + 2Ag^+ \rightarrow 2Ag + Zn^{2+}$$
,

2 способ: рассчитаем 
$$E_9^0$$
 этого ГЭ:  $E_9^0 = E_K^0 - E_A^0 = E_{Ag^+/Ag}^0 - E_{Zn^{2+}/Zn}^0 = 0,799 - (-0,763) = 1,562 \text{ B}$ 

2 способ: по уравнению рассчитываем

$$\Delta G_{TOP}^{0} = \Delta_{f} G_{Zn}^{0} 2 + 2\Delta_{f} G_{Ag}^{0} - \left(\Delta_{f} G_{Zn}^{0} + 2\Delta_{f} G_{Ag}^{0}\right) = -147160 - 2 \cdot 77100 = -301360$$
 (Дж);

$$E_9^0 = -\frac{\Delta G_{TOP}^0}{nF} = -\frac{\left(-301360\right)}{2 \cdot 96500} = 1,561$$
 В

Значения **стандартной** ЭДС  $E_9^0$ , рассчитанные первым и вторым способами, практически равны между собой.

**Ответ**: 
$$E_9^0 = 1,56 \text{ B}$$

### Пример 2.

Рассчитаем ЭДС серебряно – цинкового ГЭ при Т = 298 К, если активность  $Zn^{2+}$  и  $Ag^{+}$  равны по 0,01 моль/л.

### Решение.

Процессы, протекающие в ГЭ, и стандартная ЭДС элемента те же, что в примере 1. Рассчитаем величины электродных потенциалов.

Равновесные потенциалы электродов рассчитываем по уравнению Нернста для металлических электродов:

$$E^{p}_{\kappa} = E^{0}_{Ag^{+}/Ag} + \frac{0,059}{1} \lg 0,01 = 0,799 + \frac{0,059}{1} \cdot (-2) = 0,681 \text{ B.}$$

$$E^{p}_{A} = E^{0}_{Zn^{2+}/Zn} + \frac{0,059}{2} \lg 0,01 = -0,763 + \frac{0,059}{2} \cdot (-2) = -0,822 \text{ B.}$$

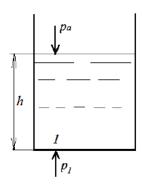
$$E_{9} = E^{p}_{\kappa} - E^{p}_{A} = 0,681 - (-0,822) = 1,503 \text{ B.}$$

**Ответ**: E<sub>2</sub>=1.503 В

## Задания № 5 по теме «ГИДРОГАЗОДИНАМИКА»

### Пример.

Определите абсолютное и избыточное гидростатическое давление в точке дна открытого сосуда, наполненного жидкостью с плотностью  $\rho=1000~\text{kг/m}^3$  на глубину h=2~m.



#### Решение.

Избыточное давление в точке 1:

 $p_{H} = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2 = 19620 \text{ }\Pi a.$ 

Абсолютное давление в точке 1:

 $p_1 = p_a + \rho \cdot g \cdot h = 101325 + 19620 = 120945 \text{ }\Pi a.$ 

**Ответ:**  $p_H = 19620 \ \Pi a, \ p_1 = 120945 \ \Pi a.$ 

# Задание № 6 по теме «КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПАРОГЕНЕРАТОРЫ»

# Пример.

Определить площадь поверхности пароперегревателя (ПП) в паровом котле с параметрами перегретого пара -  $t_{\Pi\Pi}$  = 440 °C,  $p_{\Pi\Pi}$  = 4 МПа. Расход перегретого пара  $G_{\Pi\Pi}$  = 20 кг/с . Энтальпия перегретого пара  $h_{\Pi\Pi}$  = 3308 кДж/кг. Температура насыщенного пара на выходе из барабана котла  $t_S$  = 256 °C, энтальпия насыщенного пара  $h_S$  = 2799 кДж/кг. Коэффициент теплоотдачи ПП  $\alpha_1$  =  $\xi \cdot (\alpha_K + \alpha_{\pi})$  = 70,84  $\frac{BT}{M^2K}$ , коэффициент теплоотдачи от стенки ПП к пару  $\alpha_2$  = 1047,5  $\frac{BT}{M^2K}$  Термическим сопротивлением стенки трубы ПП можно пренебрегаем ( $\delta/\lambda$  = 0). Среднелогарифмический температурный напор поверхности нагрева составит  $\Delta t$  = 400 °C.

### Решение.

1.Определим коэффициент теплопередачи,  $\frac{BT}{M^2 \cdot \Gamma paq}$ 

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{70,84} + \frac{1}{1047,5}} = 66,67$$

2. Определяем тепловосприятие ПП, кВт

$$Q = G_{\Pi\Pi} (h_{\Pi\Pi} - t_S) = 20(3308 - 2799) = 10180$$

$$Q = G_{\Pi\Pi} \left( h_{\Pi\Pi} - t_S \right) = 20(3308 - 2799) = 1$$
3. Определяем поверхность ПП, м<sup>2</sup>

$$F_{\Pi\Pi} = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} = \frac{10180 \cdot 1000}{66,67 \cdot 400} = 381,7$$

Ответ: площадь поверхности нагрева пароперегревателя парового котла равна  $381,7 \text{ m}^2$ .

# Задание № 7 по теме «ИСТОЧНИКИ И СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ»

### Пример.

Расчетный температурный график тепловой сети и расчетная температура наружного воздуха заданы по вариантам, согласно таблице 1:

Таблица 1. Исходные данные

Температурный гр	рафик тепловой	сети,	Расчетная	температура
$\tau_{01}^{p}/\tau_{02}^{p}$ , °C			наружного воздуха,	°C
150/70			-30	

Регулирование тепловой нагрузки В системе централизованного теплоснабжения осуществляется по отопительному графику. В системе централизованного теплоснабжения присутствует также нагрузка горячего теплоснабжения.

Температура внутреннего воздуха расчетная,  $t_B^p=18$  °C. Температура сетевой воды на входе в отопительные приборы на расчетном режиме:  $\tau_{03}^p = 95^{\circ}$ C.

При температуре сетевой воды  $\tau_{01}^{\text{ни}}=75\,^{\circ}\text{C}$  прекращается централизованное качественное регулирование.

- А) Рассчитайте температуры в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети с шагом в 5 °C, а также температуру перед отопительными приборами при зависимом присоединении систем отопления при качественном методе регулирования отопительной тепловой нагрузки. Найдите температуру наружного воздуха, соответствующую началу "зоны излома" температурного графика (точку начала "излома").
- Б) Определите, нужно ли применять количественное регулирование для обеспечения требуемого отпуска тепловой энергии на отопление при следующих температурах наружного воздуха +3°C; -3°C.

### Решение.

А) Температуру наружного воздуха, соответствующую началу «излома» графика, определим графическим методом.

Температура сетевой воды определяется

$$\tau_{01} = t_{\text{B}}^{\text{p}} + \Delta t_{\text{o.p}} \bar{Q}^{0,8} + \left(\delta \tau - \frac{\theta}{2}\right) \bar{Q}$$

$$\tau_{02} = t_{\text{B}}^{\text{p}} + \Delta t_{\text{o.p}} \bar{Q}^{0,8} - \frac{\theta}{2} \bar{Q}$$

$$\tau_{03} = t_{\text{B}}^{\text{p}} + \Delta t_{\text{o.p}} \bar{Q}^{0,8} + \frac{\theta}{2} \bar{Q}$$

$$\begin{split} &\Gamma_{\text{Де}} \ \delta \tau = \tau_{01}{}^p - \tau_{02}{}^p = 150 - 70 = 80 \ {}^{\circ}\text{C}; \\ &\theta = \tau_{03}{}^p - \tau_{02}{}^p = 95 - 70 = 25 \ {}^{\circ}\text{C}; \\ &\Delta t_{\text{o.p}} = (\tau_{03}{}^p + \tau_{02}{}^p)/2 - t_{\text{B}}{}^p = (95 - 70)/2 - 18 = 64,5 \ {}^{\circ}\text{C}. \\ &\overline{Q} = (t_{\text{B}}{}^p - t_{\text{H}})/(\ t_{\text{B}}{}^p - t_{\text{Hpo}}) \end{split}$$

Результаты расчета сведены в таблицу:

t <sub>H</sub> , °C	$\overline{Q}$	τ <sub>01</sub> , °C	τ <sub>02</sub> , °C	τ <sub>03</sub> , °C
-0,8	0,392	75,0	43,6	53,4
-5	0,479	86,1	47,8	59,8
-10	0,583	99,3	52,6	67,2
-15	0,688	112,2	57,2	74,4
-20	0,792	124,9	61,6	81,4
-25	0,896	137,5	65,9	88,3
-30	1,000	150,0	70,0	95,0

Температура наружного воздуха, соответствующая точке «излома» качественного графика регулирования нагрузки, составляет  $t_{\text{ни}} = -0.8$  °C.

Б) Определение, нужно ли применять количественное регулирование для обеспечения требуемого отпуска тепловой энергии на отопление при следующих температурах наружного воздуха:

Поскольку температура наружного воздуха  $t_{\rm H} = -3$  °C меньше  $t_{\rm Hu} = -0.8$  °C, находится в зоне качественного регулирования, количественное регулирование применять не требуется.

Поскольку температура наружного воздуха  $t_{\rm H} = +3$  °C больше  $t_{\rm Hu} = -0.8$  °C, попадает в зону "излома" температурного графика, на этом режиме работы необходимо применять количественное регулирование тепловой нагрузки для обеспечения требуемого отпуска тепловой энергии.

# Задание № 8 по теме «ТЕПЛОМАССООБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ»

**1.** Имеется пластинчатый теплообменник с треугольными ребрами. Толщина ребра составляет 0.2 мм, шаг оребрения -11 мм, расстояние между пластинами (высота канала) 9 мм. Коэффициент теплоотдачи равен  $50 \, \mathrm{Bt/(m^2 \cdot K)}$ . Материал рёбер - алюминий с коэффициентом теплопроводности  $200 \, \mathrm{Bt/(m \cdot K)}$ . Найти КПД оребрённой поверхности.

#### Решение.

КПД оребрённой поверхности можно найти по следующей формуле

$$\eta_o=1-rac{\psi-1}{\psi}\Big(1-\eta_p\Big)$$
 . Здесь  $\psi=rac{F_{
m ope6pehhorevi}}{F_{
m гладкоrevi}}$  - степень оребрения, равная

отношению площади оребренной поверхности к площади гладкой поверхности,  $\eta_p$  — КПД одиночного ребра.

Найдём сначала степень оребрения на шаге ребра. Высота ребра — это половина стороны равнобедренного треугольника, образованного гофрированной вставкой в плоский канал. Считать будем без учета толщины ребра. Более подробную информацию см в пособиях:

- **Гаряев А.Б.** Расчет пластинчатых теплообменников типа газ-газ: учебное пособие / А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев, О.Е. Прун, Н.М. Савченкова М.: Издательство МЭИ, 2022. 80 с.
- **Прун, О.Е.** Расчет трубчатых оребренных теплообменников: учеб. пособие / О.Е. Прун, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев; под ред. А.Б. Гаряева. М.: Издательство МЭИ, 2022. 88 с.

Итак, двойная высота ребра 
$$2h = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2} = \sqrt{\left(\frac{11}{2}\right)^2 + 9^2} = 10,5$$
 мм .

Тогда высота ребра составит h = 10,5/2 = 5,3 мм.

Площадь оребрённой поверхности на шаге ребра составит  $F_{\rm op} = a \cdot l + 4h \cdot l$ , а гладкой  $F_{\rm гл} = a \cdot l$ , где l — это глубина канала. Тогда степень оребрения составит  $\psi = \frac{F_{\rm op}}{F} = \frac{\left(a + 4h\right) \cdot \lambda}{a \cdot \lambda} = \frac{11 + 4 \cdot 5, 3}{11} = 2,9$ .

Найдём теперь КПД одиночного ребра по формуле  $\eta_p = \frac{\operatorname{th} \left( m \cdot h \right)}{m \cdot h}$ , где

параметр 
$$m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda_p \, \delta_p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50}{200 \cdot 0, 2 \cdot 10^{-3}}} = 50 \,\mathrm{m}^{-1}.$$

$$\eta_p = \frac{\mathrm{th} \left( m \cdot h \right)}{m \cdot h} = \frac{\mathrm{th} \left( 50 \cdot 5, 3 \cdot 10^{-3} \right)}{50 \cdot 5, 3 \cdot 10^{-3}} = 0,977$$

КПД или эффективность оребрённой поверхности составит

$$\eta_o = 1 - \frac{2.9 - 1}{2.9} (1 - 0.977) = 0.985$$
.

Ответ: КПД оребрённой поверхности составит 98,5%.

### Пример 2.

В кожухотрубном теплообменном аппарате нагревается вода от температуры  $5\,^{\circ}$ С до  $60\,^{\circ}$ С. Расход воды  $-10\,\mathrm{m}^3/\mathrm{ч}$ . Вода нагревается насыщенным водяным паром с температурой  $180\,^{\circ}$ С и теплотой парообразования  $2200\,\mathrm{kДж/kr}$ . Оценить площадь теплообменной поверхности, найти расход пара и эффективность аппарата.

#### Решение.

Так как в задаче сказано, что горячий теплоноситель — насыщенный водяной пар, считаем, что температура горячего теплоносителя в теплообменном аппарате не меняется. Тогда тепловой баланс примет следующий вид:

$$Q = G_1 r = G_2 c_{p2} (t_2'' - t_2') .$$

В уравнении теплового баланса также принято, что потери тепла равны нулю.

Рассчитаем тепловую мощность аппарата по воде. Сначала переведём объемный расход воды в массовый:

$$G_2 = V_2 \cdot \rho_2 = \frac{10 \frac{\text{M}^3}{\text{yac}}}{3600 \frac{\text{c}}{\text{yac}}} \cdot 1000 \frac{\text{K}\Gamma}{\text{M}^3} = 2.8 \frac{\text{K}\Gamma}{\text{c}}.$$

Тогда тепловая мощность аппарата

$$Q = G_2 c_{p2} (t_2'' - t_2') = 2.8 \cdot 4.2 \cdot (60 - 5) = 646.8 \text{ kBT}$$

Расход пара найдём из уравнения теплового баланса

$$G_1 = \frac{Q}{r} = \frac{646.8}{2200} = 0.3 \frac{\text{K}\Gamma}{\text{c}}$$
.

Эффективность теплообменного аппарата – это отношение его тепловой мощности к тепловой мощности идеального теплообменного аппарата.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{id}} = \frac{Q}{\left(G \cdot c_p\right)_{\min} \left(t_1' - t_2'\right)} = \frac{646.8}{2.8 \cdot 4.2 \cdot \left(180 - 5\right)} = 0.314.$$

При вычислении эффективности тепловую мощность идеального теплообменного аппарата считаем через расходную теплоёмкость воды, так как вода изменяет свою температуру в процессе теплообмена, поэтому её расходная теплоёмкость будет минимальной из двух.

Площадь поверхности теплообмена можно найти из уравнения теплопередачи

$$Q = k F \Delta \overline{t} .$$

Для этого надо найти коэффициент теплопередачи и средний температурный напор. Коэффициент теплопередачи вычисляется по формуле:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + R_z\right)^{-1}$$
 . Так как в задаче нет данных о толщине и

теплопроводности стенки, а также о загрязнении поверхности, то этими термическими сопротивлениями можно пренебречь. Коэффициентами теплоотдачи для пара и воды зададимся, исходя из наиболее вероятных их значений. Примем для пара  $\alpha_1 = 10000 \text{ BT/(м}^2 \cdot \text{K)}$ , для воды  $\alpha_2 = 5000 \text{ BT/(м}^2 \cdot \text{K)}$ . Тогда получаем формулу:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{10000} + \frac{1}{5000}\right)^{-1} = 3333 \frac{\text{BT}}{\text{M}^2\text{K}}.$$

Подробнее см в пособии:

1. Расчет кожухотрубных теплообменных аппаратов: учебное пособие по «Тепломассообменное оборудование предприятий» направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» / А. Б. Гаряев, Е. П. Валуева, А. Ю. Маскинская, О. Е. Прун, Нац. исслед. ун-т «МЭИ» (НИУ «МЭИ»). - М. : Изд-во МЭИ, 2019. - 84 с.

Средний температурный напор можно рассчитать как средний логарифмический

$$\overline{\Delta t} = \overline{\Delta t}_{\scriptscriptstyle ЛО2} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{175 - 120}{\ln \frac{175}{120}} = 145,8\,^{\circ}\mathrm{C}\;,$$
 где  $\Delta t' = t'_1 - t'_2 = 180 - 5 = 175\,^{\circ}\mathrm{C}\;$  - температурный напор во входном сечении,

 $\Delta t'' = t_1'' - t_2' = 180 - 60 = 120$  °С - температурный напор в выходном сечении.

Таким образом, требуемая площадь поверхности теплообмена составит

$$F = \frac{Q}{k \Delta \overline{t}} = \frac{646.8 \cdot 10^3}{3333 \cdot 145.8} = 1,33 \,\mathrm{m}^2.$$

Ответ: расхода пара равен 0,3 кг/с, требуемая площадь поверхности теплообмена составляет  $1,33 \text{ м}^2$ , эффективность теплообменника -31,4%.

# Пример 3.

В противоточном теплообменнике вода нагревается маслом с расходом 2,5 кг/с и температурой 110 °C. Расход воды равен 1 кг/с. Температура воды на входе – 5 °C. Коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата 300  $BT/(M^2 \cdot K)$ , а площадь поверхности теплообмена 10  $M^2$ . Теплоемкость масла 1,9 кДж/(кг-К). Рассчитать температуру воды на выходе и тепловую мощность аппарата.

### Решение.

В задаче известна площадь поверхности теплообмена, но неизвестны параметры теплоносителей на выходе, значит, надо провести поверочный расчёт. Проще всего это сделать методом эффективности и числа единиц переноса.

Найдём число единиц переноса по формуле:

$$N = \frac{k \cdot F}{W_{\min}} = \frac{300 \cdot 10}{4, 2 \cdot 10^3} = 0,714,$$

 $W_{\min} = \min(W_1, W_2) = W_2 = 4.2 \text{ кBт/K}$  — минимальная теплоёмкость в аппарате,  $W_1 = 2.5 \cdot 1.9 = 4.75 \, \text{ кBт/K} - \text{расходная теплоёмкость}$ масла,  $W_2 = G_2 \cdot c_{p2} = 1 \cdot 4, 2 = 4, 2$  кВт/К — расходная теплоёмкость воды.

Найдём эффективность теплообменника по формуле: 
$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-N(1 - W_{\min}/W_{\max})}}{1 - W_{\min}/W_{\max} \cdot e^{-N(1 - W_{\min}/W_{\max})}} = \frac{1 - e^{-0.714 \cdot (1 - 4.2/4.75)}}{1 - 4.2/4.75 \cdot e^{-0.714 \cdot (1 - 4.2/4.75)}} = 0,427 \,.$$

Так как эффективность теплообменного аппарата – это отношение его тепловой мощности к тепловой мощности идеального теплообменного аппарата, найдем тепловую мощность реального теплообменника:

$$Q = \varepsilon \cdot Q_{id} = \varepsilon \cdot W_{\min}(t'_1 - t'_2) = 0,427 \cdot 4,2 \cdot (110 - 5) = 188,2$$
 κBτ.

Запишем тепловой баланс теплообменника и из него определим неизвестную температуру воды на выходе:

$$Q = G_1 c_{p1} (t'_1 - t''_1) = G_2 c_{p2} (t''_2 - t'_2),$$
  
$$t''_2 = t'_2 + \frac{Q}{G_2 c_{p2}} = 5 + \frac{188, 2}{1 \cdot 4, 2} = 49,8 ^{\circ} C.$$

Ответ: температура воды на выходе равна 49,8 °C, тепловая мощность теплообменного аппарата составляет 188,2 кВт.

# Пример 4.

Оценить площадь поверхности теплообмена, если в теплообменнике охлаждается воздух от температуры 36 °C до 22 °C. Холодный теплоноситель – вода. Охлаждение сопровождается конденсацией содержащейся в воздухе влаги. Энтальпия воздуха на входе в аппарат – 75 кДж/кг, на выходе из аппарата – 47,5 кДж/кг. Расход сухого горячего воздуха – 4000 м<sup>3</sup>/час. Средняя разность температур в аппарате 25 °C. Коэффициент оребрения труб принять равным 8. Эффективность оребренной поверхности принять равной 0,85.

#### Решение.

Определим тепловую мощность теплообменного аппарата

$$Q = L(H' - H'') = \underbrace{\frac{4000 \cdot 1, 2\frac{\text{KT}}{\text{M}^3}}{3600}}_{\text{KT/c}} \cdot (75 - 47, 5) = 18,3 \text{ KBT}$$

Здесь для перевода объемного расхода воздуха в массовый была использована плотность воздуха, равная 1,2 кг/м<sup>3</sup>.

Процесс влаговыпадения в теплообменнике будем учитывать методом коэффициента влаговыпадения. Рассчитаем коэффициент влаговыпадения:

$$\xi = \frac{Q}{Q_{\text{\tiny MBH}}} = \frac{\chi(H' - H'')}{\chi_{C_p}(t' - t'')} = \frac{(H' - H'')}{c_p(t' - t'')} = \frac{75 - 47,5}{1,005 \cdot (36 - 22)} = 2,0.$$

Рассчитаем коэффициент теплопередачи. Зададимся значениями коэффициентов теплоотдачи для воздуха (при сухом теплообмене)  $\alpha_1 = 30$  Вт/(м²·К), для воды —  $\alpha_2 = 3000$  Вт/(м²·К). Эти значения взяты с учетом диапазонов их вероятных значений.

Подробнее смотри в пособиях:

- Расчет кожухотрубных теплообменных аппаратов: учебное пособие по курсу «Тепломассообменное оборудование предприятий» по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» / А. Б. Гаряев, Е. П. Валуева, А. Ю. Маскинская, О. Е. Прун, Нац. исслед. ун-т «МЭИ» (НИУ «МЭИ»). М.: Издво МЭИ, 2019. 84 с.
- Прун, О.Е. Расчет трубчатых оребренных теплообменников: учеб. пособие / О.Е. Прун, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев; под ред. А.Б. Гаряева. М.: Издательство МЭИ, 2022. 88 с.

Если пренебречь термическими сопротивлениями стенки трубы и возможных загрязнений внутренней поверхности трубки, то расчётная формула коэффициента теплопередачи сведется к следующему виду:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1 \xi \psi \eta_0} + \frac{1}{\alpha_2}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{30 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 0.85} + \frac{1}{3000}\right)^{-1} = 359 \frac{BT}{M^2 K}.$$

Теперь из уравнения теплопередачи определим требуемую площадь поверхности теплообмена

$$F = \frac{Q}{k \Delta \overline{t}} = \frac{18,3 \cdot 10^3}{359 \cdot 25} = 2,0 \text{ m}^2.$$

Ответ: требуемая площадь поверхности теплообмена составляет 2,0 м<sup>2</sup>.

# Пример 5.

Воздух нагревается в теплообменном аппарате от 5 °C до 60 °C. Массовый расход газа 12 000 кг/час. Площадь узкого сечения трубного пучка составляет 0,5 м². Число Эйлера равно 5,2. Найти требуемую электрическую мощность на прокачку воздуха. Плотность воздуха при температуре 0 °C принять равной 1,3 кг/м³.

### Решение.

Электрическая мощность на прокачку воздуха может быть определена по следующей формуле:

$$N = \frac{V \cdot \Delta p}{\eta} = \frac{G \cdot \Delta p}{\rho \cdot \eta} ,$$

где  $\Delta p = \Delta p_{\rm Tp} + \Delta p_{\rm yck}$  - падение давления по воздуху при прокачке через теплообменный аппарат, которое равно сумме падения давления на трубном пучке и падения давления на ускорении потока. Падение давления на трубном пучке можно найти по следующей формуле:  $\Delta p_{\rm Tp} = Eu \; \overline{\rho} \, \omega^2$ . Средняя температура воздуха в теплообменном аппарате составляет  $\overline{t} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{5 + 60}{2} = 32,5 \, ^{\circ}{\rm C}$ .

Найдём плотность воздуха при этой температуре по формуле  $\frac{\rho}{\rho_o} = \frac{T_0}{T}$  .

Получим 
$$\bar{\rho} = \rho_o \frac{T_0}{\bar{T}} = 1,3 \cdot \frac{273}{273 + 32,5} = 1,162 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$
.

Из уравнения постоянства массового расхода определим среднюю скорость воздуха в теплообменнике:

$$\omega = \frac{G}{\rho \cdot f} = \frac{12000}{3600 \cdot 1,162 \cdot 0,5} = 5,7 \frac{M}{c}.$$

Падение давления на трубном пучке составит

$$\Delta p_{\rm Tp} = Eu \, \overline{\rho} \, \omega^2 = 5, 2 \cdot 1, 162 \cdot 5, 7^2 = 196, 3 \, \Pi a$$
.

Падение давления на ускорение потока можно рассчитать по формуле:  $\Delta p_{\rm yck} = \rho'' \, \omega''^{\, 2} - \rho' \, \omega'^{\, 2} \, .$  Найдём плотности и скорости воздуха во входном и в выходном сечениях аппарата.

Плотность воздуха на входе 
$$\rho' = \rho_o \frac{T_0}{T'} = 1,3 \cdot \frac{273}{273 + 5} = 1,277 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Плотность воздуха на выходе 
$$\rho'' = \rho_o \frac{T_0}{T''} = 1,3 \cdot \frac{273}{273 + 60} = 1,066 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Скорость воздуха на входе 
$$\omega' = \frac{G}{\rho' \cdot f} = \frac{12000}{3600 \cdot 1,277 \cdot 0,5} = 5,2 \frac{M}{c}$$
.

Скорость воздуха на выходе 
$$\omega'' = \frac{G}{\rho'' \cdot f} = \frac{12000}{3600 \cdot 1,066 \cdot 0,5} = 6,3 \frac{\text{M}}{\text{c}}.$$

Падение давления на ускорение потока

$$\Delta p_{\text{yck}} = \rho'' \omega''^2 - \rho' \omega'^2 = 1,066 \cdot 6,3^2 - 1,277 \cdot 5,2^2 = 7,8 \text{ }\Pi \text{a}$$

Суммарное падение давления составит

$$\Delta p = \Delta p_{\text{Tp}} + \Delta p_{\text{yck}} = 196,3 + 7,8 = 204,1 \,\Pi a.$$

Найдём требуемую мощность на прокачку теплоносителя

$$N = \frac{12000 \cdot 204,1}{3600 \cdot 1,162 \cdot 0,7} = 837 \text{ Bt}.$$

В вышеприведенной формуле КПД нагнетателя был принят равным 0,7.

**Ответ:** требуемая электрическая мощность на прокачку воздуха составляет 837 Вт.

# Задание № 9 по теме «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ»

### Пример 1.

Предприятие потребляет 8 тыс. тонн нефтяного эквивалента в год. ТЭЦ предприятия, работающая на мазуте  $(Q_{\rm H}^{\rm p}=9\,400\,{\rm ккал/кг})$ , вырабатывает 45 тыс. Гкал тепловой энергии и 10 млн кВт·ч электрической энергии в год. Определите годовой расход условного топлива, используемого на технологию.

#### Решение.

Подобные задачи решаются путём составления энергетического баланса предприятия. Из условия известно, что на предприятии есть собственная ТЭЦ, потребляющая топливо, а также есть технология, которая также требует затрат топлива. Общее потребление топлива технологической линией и ТЭЦ задано. Получаем баланс следующего вида:

$$B_{\Sigma} = B_{\mathrm{T} \ni \mathrm{II}} + B_{\mathrm{rex}}$$
,

причем затраты топлива на ТЭЦ можно представить в следующем виде:

$$B_{\mathrm{T} \ni \mathrm{II}} = B_{\mathrm{T}} + B_{\mathrm{\ni}}$$
,

где  $B_{\rm T}$  — это затраты топлива на выработку теплоты, а  $B_{\rm \Theta}$  — на выработку электроэнергии. Зная удельные затраты топлива на выработку тепла  $b_{\rm q}$  и электроэнергии  $b_{\rm \Theta}$ , можно посчитать общие затраты топлива на ТЭЦ как

$$B_{\text{ТЭЦ}} = b_q \cdot Q + b_{\mathfrak{I}} \cdot \mathfrak{I}.$$

$$B_T \qquad B_{\mathfrak{I}}$$

Так как в задаче удельные затраты топлива  $b_9$  и  $b_q$  не заданы для данной ТЭЦ, можно воспользоваться средними по стране показателями:

$$b_{\Im}=0,3445\,rac{\mathrm{K}\Gamma\ \mathrm{y.t.}}{\mathrm{\kappa Br}\cdot\mathrm{q}}\,,\;b_{q}=0,1486\,rac{\mathrm{T}\ \mathrm{y.t.}}{\Gamma\mathrm{кал}}\,.$$

Отсюда получим, что на ТЭЦ используется

$$B_{\mathrm{TЭЦ}} = 0,1486 \frac{\mathrm{T} \, \mathrm{y.t.}}{\Gamma \mathrm{кал}} \cdot 10^3 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{t}} \cdot \underbrace{45 \cdot 10^3}_{\Gamma \mathrm{кал}} + 0,3445 \frac{\mathrm{kg} \, \mathrm{y.t.}}{\mathrm{kBt \cdot y}} \cdot \underbrace{10 \cdot 10^6}_{\mathrm{kBt \cdot y}} = 10132\,000 \,\mathrm{kg} \,\mathrm{y.t.} = 10132\,000 \,\mathrm{kg} \,\mathrm{y.t.}$$

=10132 ту.т.

Суммарное потребление предприятием топлива переведём в условное топливо:

$$B_{\Sigma_{\mathrm{H.3.}}} \cdot Q_{\mathrm{H.H.3.}}^{\mathrm{p}} = B_{\Sigma_{\mathrm{V.T.}}} \cdot Q_{\mathrm{H.V.T.}}^{\mathrm{p}}$$

Нефтяной эквивалент — это топливо с низшей теплотворной способностью  $Q^{\rm p}_{{\rm H}\,{\rm H}.9.}=10\,000\,\frac{{\rm KKan}}{{\rm Kf}\,{\rm H}.9.}\,.$  Теплотворная способность условного топлива

составляет 
$$Q_{\text{H y.т.}}^{\text{p}} = 7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг у.т.}}$$
. Отсюда

$$B_{\Sigma \, \text{y.t.}} = \frac{B_{\Sigma \text{H.3.}} \cdot Q_{\text{H H.3.}}^{\text{p}}}{Q_{\text{H y.t.}}^{\text{p}}} = \frac{8 \cdot 10^{6} \cdot 10\,000 \frac{\text{KKa.}}{\text{Kf. H.3.}}}{7\,000 \frac{\text{KKa.}}{\text{Kf. y.t.}}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{Kf.}} = 11429 \text{ T. y.t.}$$

Следовательно, затраты топлива на технологию составят:

$$B_{\text{Tex}} = B_{\Sigma} - B_{\text{TOL}} = 11429 - 10132 = 1297 \text{ T y.t.}$$

**Ответ:** годовые затраты условного топлива на технологию составят 1 297 т у.т.

<u>Примечание:</u> В данной задаче была задана теплотворная способность мазута, однако в решении она нам не понадобилась, так как ответ по заданию надо было выразить в условном топливе, а исходные данные заданы в нефтяном эквиваленте.

### Пример 2.

Определите годовую экономию условного топлива котельной от проведения энергосберегающих мероприятий. Котельная работает при следующих условиях: нагрузка котла 20 т/ч, энтальпия пара — 2900 кДж/кг, годовое число часов работы котельной — 4000 ч. В результате проведения энергосберегающих мероприятий удельные тепловые потери с уходящими газами уменьшились с 10% до 8,5%, причем тепловые потери от химической неполноты сгорания составляют 3%, а тепловые потери в окружающую среду — 2%. Температура питательной воды составляет 68 °C.

### Решение.

Определим КПД котлоагрегата по обратному балансу:

$$\eta = 100 - \Sigma q = 100 - (q_2 + q_4 + q_5)$$
.

Здесь потери с механическим недожогом приняты равными 0, так как по условию про них ничего не сказано.

Изначальный КПД котлоагрегата  $\eta = 100 - (10 + 3 + 2) = 85\%$ .

После проведения энергосберегающих мероприятий КПД котлоагрегата составит:  $\eta' = 100 - (8,5+3+2) = 86,5\%$ 

КПД котлоагрегата по прямому балансу можно представить в

следующем виде: 
$$\eta = \frac{Q_{\text{полезное}}}{Q_{\text{затраченное}}} = \frac{D\Big(h_{\text{пара}} - h_{\text{пв}}\Big)}{B \cdot Q_{\scriptscriptstyle H}^{\,p}}$$
, где  $B$  – это расход топлива,

$$h_{_{\! 
m IB}}=t_{_{\! 
m IB}}\cdot c_{_p}-$$
 энтальпия питательной воды, кДж/кг,  $c_p=4,2$  кДж/(кг · К)  $-$ 

удельная изобарная теплоёмкость питательной воды. Если выразить из этой формулы расход топлива до и после проведения энергосберегающих мероприятий, и посчитать их разницу, можно определить величину экономии как:

$$\begin{split} \Delta B &= B - B' = \frac{D \Big( h_{\text{пара}} - h_{\text{пв}} \Big)}{Q_{\text{H}}^p} \cdot \left( \frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta'} \right) \cdot n = \\ &= \frac{20 \frac{\text{T}}{\text{час}} \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{т}} \cdot \left( 2900 - 68 \cdot 4, 2 \right) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{29330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \text{ y.т.}}} \cdot \left( \frac{1}{0,85} - \frac{1}{0,865} \right) \cdot 4000 \frac{\text{час}}{\text{год}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{т}}{\text{кг}} = \\ &= 145,5 \text{ т y.т./год} \end{split}$$

Ответ: годовая экономия условного топлива котельной составит 145,5 т у.т.

### Пример 3.

Оцените сокращение выбросов диоксида углерода, если в результате проведения энергосберегающих мероприятий в системе отопления предприятия, находящегося в г. Воронеже (отопительный период n=190 сут.), удалось снизить потребление тепловой энергии на  $\Delta Q=0,21$  Гкал/ч. Предприятие получает тепловую энергию по тепловой сети от котельной, использующей в качестве топлива природный газ с низшей теплотой сгорания  $Q_{\rm H}^{\rm p}=35$  МДж/нм<sup>3</sup>. Коэффициент полезного действия котельной  $\eta_{\rm коm}=0,9$ . КПД передачи теплоты по тепловой сети  $\eta_{\rm mp.}=0,9$ . Удельные выбросы диоксида углерода составляют 2000 г/нм<sup>3</sup>.

#### Решение.

Выбросы вредных веществ в окружающую среду сократятся при сокращении количества сжигаемого топлива в топке котлоагрегата. Поэтому в этой задаче необходимо определить экономию топлива от внедрения энергосберегающих мероприятий.

С учётом потерь тепловой энергии при транспортировке, расход топлива в системе теплоснабжения предприятия можно рассчитать как

$$B = \frac{Q}{\eta_{\kappa om} \, \eta_{mc} \, Q_{\scriptscriptstyle H}^{\,p}}$$

Тогда часовая экономия топлива составит:

$$\Delta B = \frac{\Delta Q}{\eta_{\kappa om} \, \eta_{mc} \, Q_{\scriptscriptstyle H}^{\,p}} = \frac{\overbrace{0.21 \frac{\Gamma_{\rm KaJ}}{{}^{\scriptscriptstyle Hac}} \cdot 4.19 \frac{\Gamma_{\scriptscriptstyle J} \mathcal{M}}{\Gamma_{\scriptscriptstyle KaJ}} \cdot 10^3 \, \frac{M \mathcal{J}_{\scriptscriptstyle M}}{\Gamma_{\scriptscriptstyle J} \mathcal{M}}}^{\Pi \mathcal{J}_{\scriptscriptstyle M}}}{0.9 \cdot 0.9 \cdot 35 \frac{M \mathcal{J}_{\scriptscriptstyle M}}{{}^{\scriptscriptstyle HM}^3}} = 31 \, \frac{{}^{\scriptscriptstyle HM}^3}{{}^{\scriptscriptstyle Hac}}.$$

Сокращение выбросов диоксида углерода при этом

$$\Delta M_{CO2} = \Delta B \cdot m_{CO2} = 31 \frac{\text{mm}^3}{\text{qac}} \cdot 2000 \frac{\text{r} CO_2}{\text{mm}^3} =$$

$$= 62000 \frac{\text{r} CO_2}{\text{qac}} \cdot 190 \frac{\text{cyr}}{\text{rog}} \cdot 24 \frac{\text{qac}}{\text{cyr}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kf}}{\text{T}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{kf}} = 283 \frac{\text{T} CO_2}{\text{TOU}}$$

Ответ: сокращение выбросов диоксида углерода составят 283 т СО<sub>2</sub> в год.

### Пример 4.

Определите годовую экономию тепловой энергии при нанесении изоляции на трубопровод длиной 50 м. Коэффициент теплоотдачи пара внутри трубы –  $5000~\mathrm{BT/(m^2 \cdot K)}$ , коэффициент теплоотдачи воздуха снаружи –  $10~\mathrm{BT/(m^2 \cdot K)}$ , толщина стенки –  $5~\mathrm{mm}$ , коэффициент теплопроводности стенки трубы –  $10~\mathrm{BT/(m \cdot K)}$ , внутренний диаметр трубопровода 400 мм. Температура теплоносителя внутри –  $200~\mathrm{^oC}$ , снаружи –  $10~\mathrm{^oC}$ . Толщина тепловой изоляции –  $100~\mathrm{mm}$ , коэффициент теплопроводности изоляции –  $0.09~\mathrm{BT/(m \cdot K)}$ . Считать, что трубопровод работает непрерывно в течение года.

#### Решение.

Задача решается с помощью записи уравнения теплопередачи для цилиндрической стенки:

$$Q = k_l \cdot L \cdot (t_1 - t_2) .$$

Посчитаем коэффициент теплопередачи для трубопровода без тепловой изоляции

$$k_{l} = \pi \left[ \frac{1}{\alpha_{1} d_{1}} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_{2}}{d_{1}} + \frac{1}{\alpha_{2} d_{2}} \right]^{-1} =$$

$$= \pi \left[ \frac{1}{5000 \cdot 0.4} + \frac{1}{2 \cdot 10} \cdot \ln \frac{\frac{d_{2} = 0.41 \,\mathrm{m}}{0.4 + 2 \cdot 0.005}}{0.4} + \frac{1}{10 \cdot 0.41} \right]^{-1} = 12.8 \, \frac{\mathrm{BT}}{\mathrm{m} \cdot \mathrm{K}}.$$

Здесь  $d_2=d_1+2\cdot\delta=0,4+2\cdot0,005=0,41\,\mathrm{m}$  — это наружный диаметр трубопровода. Наружный диаметр теплоизолированного трубопровода составит  $d_3=d_2+2\cdot\delta_{u_3}=0,41+2\cdot0,1=0,61\,\mathrm{m}$  .

Тепловой поток через стенку трубы без тепловой изоляции составит:  $Q = k_l \cdot L \cdot \left(t_1 - t_2\right) = 12,8 \cdot 50 \cdot \left(200 - 10\right) \cdot 10^{-3} = 121,6 \text{ кBt} \ .$ 

Найдём коэффициент теплопередачи теплоизолированного трубопровода:

$$\begin{split} k_{l \text{ M3}} &= \pi \Bigg[ \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\text{M3}}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3} \Bigg]^{-1} = \\ &= \pi \Bigg[ \frac{1}{5000 \cdot 0, 4} + \frac{1}{2 \cdot 10} \cdot \ln \frac{0, 41}{0, 4} + \frac{1}{2 \cdot 0, 09} \cdot \ln \frac{0, 61}{0, 41} + \frac{1}{10 \cdot 0, 61} \Bigg]^{-1} = 1, 3 \frac{\text{BT}}{\text{M} \cdot \text{K}}. \end{split}$$

Тепловой поток через стенку трубы без тепловой изоляции составит:

$$Q_{\text{из}} = k_{l \text{ из}} \cdot L \cdot (t_1 - t_2) = 1,3 \cdot 50 \cdot (200 - 10) \cdot 10^{-3} = 12,4 \text{ кВт}.$$

Экономия тепловой энергии тогда составит:

$$\Delta Q = Q - Q_{\text{H3}} = 121,6 - 12,4 = 109,2 \text{ kBt} \cdot 3600 \frac{\text{c}}{\text{час}} \cdot 24 \frac{\text{час}}{\text{сут}} \cdot 365 \frac{\text{сут}}{\text{год}} \cdot 10^{-6} \frac{\text{кДж}}{\text{ГДж}} = 3444 \frac{\Gamma \text{Дж}}{\text{год}} \cdot \frac{1}{419} \frac{\Gamma \text{кал}}{\Gamma \text{Дж}} = 822 \frac{\Gamma \text{кал}}{\Gamma \text{ОД}}$$

**Ответ:** экономия тепловой энергии при нанесении изоляции на трубопровод составит 3444 ГДж или 822 Гкал за год.

### Пример 5.

Определить удельный расход условного топлива на выработку 1 Гкал тепловой энергии, если известно, что КПД котельной установки 90%.

### Решение.

Формула КПД котлоагрегата брутто в самом общем случае выглядит так:

$$\eta = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{затр}}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{B \cdot Q_{\scriptscriptstyle H}^{p}}.$$

Удельный расход топлива на производство тепловой энергии это  $b = \frac{B}{Q_{\text{пол}}}$ .

Следовательно 
$$\eta = \frac{1}{b \cdot Q_{\scriptscriptstyle H}^p}$$
, откуда

$$b = \frac{1}{\eta \cdot Q_{\scriptscriptstyle H}^{p}} = \frac{1}{0.9 \cdot 7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг у.т.}}} = 1.587 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг у.т.}}{\text{ккал}} \cdot 10^{6} \frac{\text{ккал}}{\Gamma \text{кал}} = 158.7 \frac{\text{кг у.т.}}{\Gamma \text{кал}}$$

**Ответ:** удельный расход условного топлива на выработку 1 Гкал тепловой энергии составляет 158,7 кг у.т./Гкал.

Задачу можно было решить в 2 действия. Найдём сначала общий, не удельный, расход топлива на выработку 1 Гкал теплоты:

$$B = \frac{Q_{\text{пол}}}{\eta \cdot Q_{\text{H}}^{p}} = \frac{1 \frac{1}{\Gamma \text{кал} \cdot 10^{6} \frac{\text{ккал}}{\Gamma \text{кал}}}}{0.9 \cdot 7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг у.т.}}} = 158,7 \text{ кг у.т.}$$

А теперь вычислим удельный показатель:

$$b = \frac{B}{Q_{\text{пол}}} = \frac{158,7 \text{ кг у.т.}}{1 \Gamma \text{кал}} = 158,7 \frac{\text{кг у.т.}}{\Gamma \text{кал}}.$$

Такой расчёт может быть удобнее, когда известна полезное количество энергии, которое не равно 1 Гкал или 1 кВт·ч энергии.

# Задание № 10 по теме «ОСНОВЫ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

### Пример 1.

Электролиз **расплава соли** хлорида лития LiCl на нерастворимых Ptэлектродах.

Рассчитайте минимальную разность потенциалов  $U_{min}$  электролиза. Напишите уравнения электродных процессов.

### Решение.

Запишем ионный состав электролита:

$$LiCl \rightarrow Li^+ + Cl^-$$

и стандартные потенциалы электродных процессов:

$$K^-: E_{Li^+/Li}^0 = -3,045$$
 В,  $E_{Cl_2^-/Cl}^0 = +1,36$  В.  $U_{min} = E_{Cl_2^-/Cl^-}^0 - E_{Li^+/Li}^0 = 1,36 - (-3,045) = 4,405$  В

Электродные процессы:

$$K^{-}: Li^{+} + \stackrel{-}{e} \rightarrow Li$$
 $A^{+}: 2Cl^{-} \rightarrow Cl_{2} + 2\stackrel{-}{e}.$ 

Данный электролиз можно использовать для получения лития и хлора.

**Ответ**: U<sub>min</sub>=4,405 В

# Пример 2.

Рассмотрим электролиз водного раствора  $CuCl_2$  на графитовых (нерастворимых) электродах. Напишите электродные процессы, покажите ход поляризационных кривых. Рассчитайте массу меди, образовавшейся на катоде, если за это же время на аноде выделилось 5,6 мл  $Cl_2$  и 5,6 мл  $O_2$ .

#### Решение.

Определим ионный состав раствора электролита и оценим водородный показатель среды. Запишем уравнения диссоциации молекул соли и воды:

$$CuCl2 \rightarrow Cu2+ + 2Cl-$$

$$H2O \leftarrow H+ + OH-.$$

Соль  $CuCl_2$  образована слабым основанием  $Cu(OH)_2$  и сильной кислотой HCl, следовательно, при ее растворении в воде будет протекать процесс гидролиза с образованием избытка ионов  $H^+$ , раствор электролита будет иметь слабокислую реакцию среды (примем pH = 5).

Определим потенциалы возможных процессов на аноде и катоде и запишем уравнения электродных процессов:

$$E_{Cu^{2+}/Cu}^{0} = +0.337 \text{ B}, \qquad E_{H^{+}/H_{2}}^{p} = -0.059 \cdot \text{pH} = -0.295 \text{ B},$$

т.к.  $E_{Cu^{2+}/Cu}^0$  более положителен, чем  $E_{H^+/H}^p$ , то на катоде будет протекать только процесс восстановления ионов меди  $Cu^{2+}$  из раствора электролита.

Т.к. 
$$\frac{E^o}{2}/OH^-$$
 более отрицателен, чем  $\frac{E^o}{2}$ , то в первую очередь на аноде

т.к. <sup>02</sup> более отрицателен, чем <sup>12</sup> , то в первую очередь на аноде будет идти процесс окисления ионов ОН-. Однако, вследствие поляризации при больших плотностях тока потенциалы процессов выделения кислорода и хлора достаточно близки, поэтому на аноде будет идти также процесс окисления ионов СІ— из раствора электролита. Таким образом, на электродах протекают следующие процессы:

K<sup>-</sup>: 
$$Cu^{2+} + 2^{e} \rightarrow Cu$$
  
A<sup>+</sup>:  $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4^{e}$   
 $2Cl^{-} \rightarrow Cl_2 + 2^{e}$ .

Электролиз данного раствора можно проводить для нанесения медного покрытия на изделие, а также для получения газообразных кислорода и хлора. Определим массу меди, образовавшейся на катоде, для чего сначала рассчитаем объемы моль эквивалентов газов при н.у. и массу моля эквивалента меди:

По закону Фарадея определим количество электричества, необходимое для выделения заданных объемов кислорода и хлора на аноде (н.у.):

$$Q_{O_2} = \frac{V_{O_2} \cdot F}{V_{3,O_2}} = \frac{5,6 \cdot 10^{-3} \cdot 96500}{5,6} = 96,5$$
 Кл,

$$Q_{Cl_{2}} = \frac{V_{Cl_{2}} \cdot F}{V_{9,Cl_{2}}} = \frac{5.6 \cdot 10^{-3} \cdot 96500}{11.2} = 48.25$$
K II.

Суммарное количество электричества, прошедшее через анод, равно:

$$Q_A = Q_{O_2} + Q_{Cl_2} = 114,75$$
 Кл.

Такое же количество электричества на катоде ( $Q_K = Q_A$ ) пойдет только на один процесс образования меди. По закону Фарадея определим массу выделившейся меди:

$$m_{Cu} = \frac{M_{9,Cu} \cdot Q_K}{F} = \frac{32,2 \cdot 144,75}{96500} = 0.0483_{\Gamma} = 48,3 \text{ M}\Gamma$$

Определим выход по току  $(B_i)$  для всех процессов электролиза:

$$B_{Cu}$$
 = 100 %, ( т.к. на катоде идет один процесс );

$$B_{O_2} = \frac{Q_{O_2}}{Q_A} = \frac{96.5}{114.75} = 0.66 = 66$$
 
$$\% ; \qquad B_{Cl_2} = \frac{Q_{Cl_2}}{Q_A} = \frac{48.25}{114.75} = 0.34 = 34$$
 
$$\% .$$

**Ответ**:  $m_{Cu}$ = 48,3 мг