

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 мм³ при давлении 0,1 МПа и температуре 20°C.

Решение.

Абсолютная температура газа равна:

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

Число молекул газа:

$$N = \frac{pV N_A}{T \mu R} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{293,15 \text{ К} \cdot 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}} = 2,471 \cdot 10^{16}.$$

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:

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

Конечный объём:

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

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:

$$L = Q = p_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2} = 6 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 1,722 \text{ м}^3 \cdot \ln \frac{6,888 \text{ м}^3}{1,722 \text{ м}^3} = 1432 \text{ кДж}.$$

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

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 $t_{21} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_{22} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$, температура горячего источника уменьшится с $t_{11} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_{12} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение.

Максимальный термодинамический КПД цикла определяется по формуле Карно:

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

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

Вычисляем первоначальное значение КПД:

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

Вычисляем новое значение КПД:

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

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.

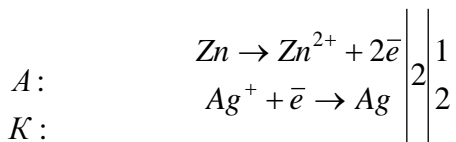
Стандартный электродный потенциал, потенциал анода и катода, ЭДС серебряно-цинкового гальванического элемента.

Решение.

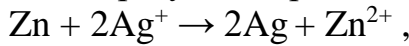
Выпишем из таблицы значения стандартных электродных потенциалов Zn и Ag:

$$E_{\text{Ag}^+/\text{Ag}}^0 = +0,799 \text{ В}, \quad E_{\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}}^0 = -0,763 \text{ В}.$$

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



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



1 способ: рассчитаем $E_{\mathcal{E}}^0$ этого ГЭ:

$$E_{\mathcal{E}}^0 = E_K^0 - E_A^0 = E_{Ag^+/Ag}^0 - E_{Zn^{2+}/Zn}^0 = 0,799 - (-0,763) = 1,562 \text{ В}$$

2 способ: по уравнению рассчитываем

$$\Delta G_{ТОР}^0 = \Delta_f G_{Zn^{2+}}^0 + 2\Delta_f G_{Ag}^0 - (\Delta_f G_{Zn}^0 + 2\Delta_f G_{Ag^+}^0) = -147160 - 2 \cdot 77100 = -301360$$

(Дж);

$$E_{\mathcal{E}}^0 = -\frac{\Delta G_{ТОР}^0}{nF} = -\frac{(-301360)}{2 \cdot 96500} = 1,561 \text{ В.}$$

Значения **стандартной ЭДС** $E_{\mathcal{E}}^0$, рассчитанные первым и вторым способами, практически равны между собой.

Ответ: $E_{\mathcal{E}}^0 = 1,56 \text{ В}$

Пример 2.

Рассчитаем ЭДС серебряно – цинкового ГЭ при $T = 298 \text{ К}$, 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:

$$E^p_K = E_{Ag^+/Ag}^0 + \frac{0,059}{1} \lg 0,01 = 0,799 + \frac{0,059}{1} \cdot (-2) = 0,681 \text{ В.}$$

$$E^p_A = E_{Zn^{2+}/Zn}^0 + \frac{0,059}{2} \lg 0,01 = -0,763 + \frac{0,059}{2} \cdot (-2) = -0,822 \text{ В.}$$

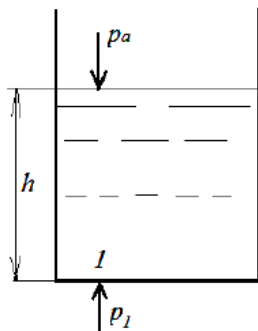
$$E_{\mathcal{E}} = E^p_K - E^p_A = 0,681 - (-0,822) = 1,503 \text{ В.}$$

Ответ: $E_{\mathcal{E}} = 1,503 \text{ В}$

Задания № 5 по теме «ГИДРОГАЗОДИНАМИКА»

Пример.

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



Решение.

Избыточное давление в точке 1:

$$p_{и} = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2 = 19620 \text{ Па.}$$

Абсолютное давление в точке 1:

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

Ответ: $p_{и} = 19620 \text{ Па}$, $p_1 = 120945 \text{ Па}$.

Задание № 6 по теме «КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПАРОГЕНЕРАТОРЫ»

Пример.

Определить площадь поверхности пароперегревателя (ПП) в паровом котле с параметрами перегретого пара - $t_{ПП} = 440 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_{ПП} = 4 \text{ МПа}$. Расход перегретого пара $G_{ПП} = 20 \text{ кг/с}$. Энтальпия перегретого пара $h_{ПП} = 3308 \text{ кДж/кг}$. Температура насыщенного пара на выходе из барабана котла $t_s = 256 \text{ }^\circ\text{C}$, энтальпия насыщенного пара $h_s = 2799 \text{ кДж/кг}$. Коэффициент теплоотдачи ПП $\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_l) = 70,84 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$, коэффициент теплоотдачи от стенки ПП к пару $\alpha_2 = 1047,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$. Термическим сопротивлением стенки трубы ПП можно пренебрегаем ($\delta/\lambda = 0$). Среднегеометрический температурный напор поверхности нагрева составит $\Delta t = 400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение.

1. Определим коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$

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

2. Определяем тепловосприятие ПП, кВт

$$Q = G_{\text{ПП}} (h_{\text{ПП}} - t_s) = 20(3308 - 2799) = 10180$$

3. Определяем поверхность ПП, м²

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

Ответ: площадь поверхности нагрева пароперегревателя парового котла равна 381,7 м².

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 график тепловой сети, $\tau_{01}^p / \tau_{02}^p, \text{ }^\circ\text{C}$	Расчетная температура наружного воздуха, $^\circ\text{C}$
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, $t_v^p = 18 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура сетевой воды на входе в отопительные приборы на расчетном режиме: $\tau_{03}^p = 95 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

А) Рассчитайте температуры в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети с шагом в $5 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 $+3 \text{ }^\circ\text{C}$; $-3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение.

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

Температура сетевой воды определяется

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

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

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

Где $\delta\tau = \tau_{01}^p - \tau_{02}^p = 150 - 70 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$;

$\theta = \tau_{03}^p - \tau_{02}^p = 95 - 70 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;

$\Delta t_{o,p} = (\tau_{03}^p + \tau_{02}^p)/2 - t_B^p = (95 + 70)/2 - 18 = 64,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

$\bar{Q} = (t_B^p - t_H)/(t_B^p - t_{Hpo})$

Результаты расчета сведены в таблицу:

$t_H, \text{ }^\circ\text{C}$	\bar{Q}	$\tau_{01}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau_{02}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau_{03}, \text{ }^\circ\text{C}$
-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 $t_{Hн} = -0,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

Поскольку температура наружного воздуха $t_H = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ меньше $t_{Hн} = -0,8 \text{ }^\circ\text{C}$, находится в зоне качественного регулирования, количественное регулирование применять не требуется.

Поскольку температура наружного воздуха $t_H = +3 \text{ }^\circ\text{C}$ больше $t_{Hн} = -0,8 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 Вт/(м²·К). Материал рёбер – алюминий с коэффициентом теплопроводности 200 Вт/(м·К). Найти КПД оребрѐнной поверхности.

Решение.

КПД оребрѐнной поверхности можно найти по следующей формуле

$\eta_o = 1 - \frac{\psi - 1}{\psi} (1 - \eta_p)$. Здесь $\psi = \frac{F_{\text{оребрѐнной}}}{F_{\text{гладкой}}}$ - степень оребрения, равная

отношению площади оребренной поверхности к площади гладкой поверхности, η_p – КПД одиночного ребра.

Найдѐм 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. Горяев, 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. Горяев, И.В. Яковлев; под ред. А.Б. Горяева. – 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 оребрѐнной поверхности на шаге ребра составит $F_{\text{ор}} = a \cdot l + 4h \cdot l$, а

гладкой $F_{\text{гл}} = a \cdot l$, где l – это глубина канала. Тогда степень оребрения

составит $\psi = \frac{F_{\text{ор}}}{F_{\text{гл}}} = \frac{(a + 4h) \cdot \lambda}{a \cdot \lambda} = \frac{11 + 4 \cdot 5,3}{11} = 2,9$.

Найдѐм теперь КПД одиночного ребра по формуле $\eta_p = \frac{\text{th}(m \cdot h)}{m \cdot h}$, где

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

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

КПД или эффективность оребренной поверхности составит

$$\eta_o = 1 - \frac{2,9 - 1}{2,9} (1 - 0,977) = 0,985.$$

Ответ: КПД оребренной поверхности составит 98,5%.

Пример 2.

В кожухотрубном теплообменном аппарате нагревается вода от температуры 5 °С до 60 °С. Расход воды – 10 м³/ч. Вода нагревается насыщенным водяным паром с температурой 180 °С и теплотой парообразования 2200 кДж/кг. 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 переведем объемный расход воды в массовый:

$$G_2 = V_2 \cdot \rho_2 = \frac{10 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}}{3600 \frac{\text{с}}{\text{час}}} \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 2,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Тогда тепловая мощность аппарата

$$Q = G_2 c_{p2} (t_2'' - t_2') = 2,8 \cdot 4,2 \cdot (60 - 5) = 646,8 \text{ кВт}$$

Расход пара найдём из уравнения теплового баланса

$$G_1 = \frac{Q}{r} = \frac{646,8}{2200} = 0,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

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

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{id}} = \frac{Q}{(G \cdot c_p)_{\min} (t_1' - t_2')} = \frac{646,8}{2,8 \cdot 4,2 \cdot (180 - 5)} = 0,314.$$

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

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

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 $\alpha_1 = 10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, для воды $\alpha_2 = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Тогда получаем формулу:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{10000} + \frac{1}{5000} \right)^{-1} = 3333 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Подробнее см в пособии:

1. 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. : Изд-во МЭИ, 2019 . – 84 с.

Средний температурный напор можно рассчитать как средний логарифмический

$$\overline{\Delta t} = \overline{\Delta t}_{\text{лог}} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{175 - 120}{\ln \frac{175}{120}} = 145,8 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $\Delta t' = t'_1 - t'_2 = 180 - 5 = 175 \text{ } ^\circ\text{C}$ - температурный напор во входном сечении, $\Delta t'' = t''_1 - t''_2 = 180 - 60 = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$ - температурный напор в выходном сечении.

Таким образом, требуемая площадь поверхности теплообмена составит

$$F = \frac{Q}{k \overline{\Delta t}} = \frac{646,8 \cdot 10^3}{3333 \cdot 145,8} = 1,33 \text{ м}^2.$$

Ответ: расхода пара равен 0,3 кг/с, требуемая площадь поверхности теплообмена составляет 1,33 м², эффективность теплообменника – 31,4%.

Пример 3.

В противоточном теплообменнике вода нагревается маслом с расходом 2,5 кг/с и температурой 110 °С. Расход воды равен 1 кг/с. Температура воды на входе – 5 °С. Коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата 300 Вт/(м²·К), а площадь поверхности теплообмена 10 м². 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:

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

где $W_{\min} = \min(W_1, W_2) = W_2 = 4,2$ кВт/К – минимальная расходная теплоёмкость в аппарате, $W_1 = 2,5 \cdot 1,9 = 4,75$ кВт/К – 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:

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

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

$$Q = G_1 c_{p1} (t'_1 - t''_1) = G_2 c_{p2} (t''_2 - t'_2),$$

$$t''_2 = t'_2 + \frac{Q}{G_2 c_{p2}} = 5 + \frac{188,2}{1 \cdot 4,2} = 49,8^\circ\text{C}.$$

Ответ: температура воды на выходе равна $49,8^\circ\text{C}$, 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 м³/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

$$Q = L(H' - H'') = \underbrace{\frac{4000 \cdot 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{3600}}_{\text{кг/с}} \cdot (75 - 47,5) = 18,3 \text{ кВт}$$

Здесь для перевода объемного расхода воздуха в массовый была использована плотность воздуха, равная $1,2$ кг/м³.

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

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

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. : Изд-во 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:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1 \xi \psi \eta_0} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{30 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 0,85} + \frac{1}{3000} \right)^{-1} = 359 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.$$

Теперь из уравнения теплопередачи определим требуемую площадь поверхности теплообмена

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

Ответ: требуемая площадь поверхности теплообмена составляет 2,0 м².

Пример 5.

Воздух нагревается в теплообменном аппарате от 5 °С до 60 °С. 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 °С 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 $\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{уск}}$ - 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: $\Delta p_{\text{тр}} = E u \bar{\rho} \omega^2$. Средняя температура воздуха в теплообменном аппарате составляет $\bar{t} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{5 + 60}{2} = 32,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Найдём плотность воздуха при этой температуре по формуле $\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{T_0}{T}$.

$$\text{Получим } \bar{\rho} = \rho_0 \frac{T_0}{T} = 1,3 \cdot \frac{273}{273 + 32,5} = 1,162 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

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

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

Падение давления на трубном пучке составит

$$\Delta p_{\text{тр}} = E u \bar{\rho} \omega^2 = 5,2 \cdot 1,162 \cdot 5,7^2 = 196,3 \text{ Па}.$$

Падение давления на ускорение потока можно рассчитать по формуле:

$\Delta p_{\text{уск}} = \rho'' \omega''^2 - \rho' \omega'^2$. Найдём плотности и скорости воздуха во входном и в выходном сечениях аппарата.

$$\text{Плотность воздуха на входе } \rho' = \rho_0 \frac{T_0}{T'} = 1,3 \cdot \frac{273}{273 + 5} = 1,277 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$\text{Плотность воздуха на выходе } \rho'' = \rho_0 \frac{T_0}{T''} = 1,3 \cdot \frac{273}{273 + 60} = 1,066 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

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

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

Падение давления на ускорение потока

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

Суммарное падение давления составит

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{уск}} = 196,3 + 7,8 = 204,1 \text{ Па}.$$

Найдём требуемую мощность на прокачку теплоносителя

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

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 ($Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 9\,400$ 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:

$$B_{\Sigma} = B_{\text{ТЭЦ}} + B_{\text{тех}},$$

причем затраты топлива на ТЭЦ можно представить в следующем виде:

$$B_{\text{ТЭЦ}} = B_{\text{Т}} + B_{\text{Э}},$$

где $B_{\text{Т}}$ – это затраты топлива на выработку теплоты, а $B_{\text{Э}}$ – на выработку электроэнергии. Зная удельные затраты топлива на выработку тепла b_{q} и электроэнергии $b_{\text{э}}$, можно посчитать общие затраты топлива на ТЭЦ как

$$B_{\text{ТЭЦ}} = b_{\text{q}} \cdot Q + b_{\text{э}} \cdot \mathcal{E}.$$

Так как в задаче удельные затраты топлива $b_{\text{э}}$ и b_{q} не заданы для данной ТЭЦ, можно воспользоваться средними по стране показателями:

$$b_{\text{э}} = 0,3445 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad b_{\text{q}} = 0,1486 \frac{\text{т у.т.}}{\text{Гкал}}.$$

Отсюда получим, что на ТЭЦ используется

$$B_{\text{ТЭЦ}} = 0,1486 \frac{\text{т у.т.}}{\text{Гкал}} \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{т}} \cdot \underbrace{45 \cdot 10^3}_{\text{Гкал}} + 0,3445 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \cdot \underbrace{10 \cdot 10^6}_{\text{кВт} \cdot \text{ч}} = 10\,132\,000 \text{ кг у.т.} =$$
$$= 10\,132 \text{ т у.т.}$$

Суммарное потребление предприятием топлива переведём в условное топливо:

$$B_{\Sigma \text{н.э.}} \cdot Q_{\text{н.э.}}^{\text{п}} = B_{\Sigma \text{у.т.}} \cdot Q_{\text{н.у.т.}}^{\text{п}}$$

Нефтяной эквивалент – это топливо с низшей теплотворной способностью

$$Q_{\text{н.э.}}^p = 10000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг н.э.}}. \text{ Теплотворная способность условного топлива}$$

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

$$B_{\Sigma \text{ у.т.}} = \frac{B_{\Sigma \text{ н.э.}} \cdot Q_{\text{н н.э.}}^p}{Q_{\text{н у.т.}}^p} = \frac{8 \cdot 10^6 \cdot 10000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг н.э.}}}{7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг у.т.}}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{т}}{\text{кг}} = 11429 \text{ т у.т.}$$

Следовательно, затраты топлива на технологию составят:

$$B_{\text{тех}} = B_{\Sigma} - B_{\text{ТЭЦ}} = 11429 - 10132 = 1297 \text{ т у.т.}$$

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

Примечание: 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 °С.

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.

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

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

$h_{\text{пв}} = t_{\text{пв}} \cdot c_p$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг, $c_p = 4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ –

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:

$$\begin{aligned} \Delta B &= B - B' = \frac{D(h_{\text{пара}} - h_{\text{пв}})}{Q_{\text{н}}^P} \cdot \left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta'} \right) \cdot n = \\ &= \frac{20 \frac{\text{т}}{\text{час}} \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{т}} \cdot (2900 - 68 \cdot 4,2) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{29330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг у.т.}}} \cdot \left(\frac{1}{0,85} - \frac{1}{0,865} \right) \cdot 4000 \frac{\text{час}}{\text{год}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{т}}{\text{кг}} = \\ &= 145,5 \text{ т у.т./год} \end{aligned}$$

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 $Q_{\text{н}}^P = 35$ МДж/нм³. Коэффициент полезного действия котельной $\eta_{\text{кот}} = 0,9$. КПД передачи теплоты по тепловой сети $\eta_{\text{тр}} = 0,9$. Удельные выбросы диоксида углерода составляют 2000 г/нм³.

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

$$B = \frac{Q}{\eta_{\text{кот}} \eta_{\text{тр}} Q_{\text{н}}^P}$$

Тогда часовая экономия топлива составит:

$$\Delta B = \frac{\Delta Q}{\eta_{\text{кот}} \eta_{\text{тр}} Q_{\text{н}}^P} = \frac{\overbrace{0,21 \frac{\text{Гкал}}{\text{час}} \cdot 4,19 \frac{\text{ГДж}}{\text{Гкал}} \cdot 10^3 \frac{\text{МДж}}{\text{ГДж}}}_{\text{ГДж/час}}}{0,9 \cdot 0,9 \cdot 35 \frac{\text{МДж}}{\text{нм}^3}} = 31 \frac{\text{нм}^3}{\text{час}}$$

Сокращение выбросов диоксида углерода при этом

$$\begin{aligned} \Delta M_{CO_2} &= \Delta V \cdot m_{CO_2} = 31 \frac{\text{нм}^3}{\text{час}} \cdot 2000 \frac{\text{г} CO_2}{\text{нм}^3} = \\ &= 62000 \frac{\text{г} CO_2}{\text{час}} \cdot 190 \frac{\text{сут}}{\text{год}} \cdot 24 \frac{\text{час}}{\text{сут}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{г}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{т}}{\text{кг}} = 283 \frac{\text{т} CO_2}{\text{год}} \end{aligned}$$

Ответ: сокращение выбросов диоксида углерода составят 283 т CO₂ в год.

Пример 4.

Определите годовую экономию тепловой энергии при нанесении изоляции на трубопровод длиной 50 м. Коэффициент теплоотдачи пара внутри трубы – 5000 Вт/(м²·К), коэффициент теплоотдачи воздуха снаружи – 10 Вт/(м²·К), толщина стенки – 5 мм, коэффициент теплопроводности стенки трубы – 10 Вт/(м·К), внутренний диаметр трубопровода 400 мм. Температура теплоносителя внутри – 200 °С, снаружи – 10 °С. Толщина тепловой изоляции – 100 мм, коэффициент теплопроводности изоляции – 0,09 Вт/(м·К). 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

$$\begin{aligned} k_l &= \pi \left[\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right]^{-1} = \\ &= \pi \left[\frac{1}{5000 \cdot 0,4} + \frac{1}{2 \cdot 10} \cdot \ln \frac{\overbrace{0,4 + 2 \cdot 0,005}^{d_2=0,41 \text{ м}}}{0,4} + \frac{1}{10 \cdot 0,41} \right]^{-1} = 12,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} . \end{aligned}$$

Здесь $d_2 = d_1 + 2 \cdot \delta = 0,4 + 2 \cdot 0,005 = 0,41$ м – это наружный диаметр трубопровода. Наружный диаметр теплоизолированного трубопровода составит $d_3 = d_2 + 2 \cdot \delta_{из} = 0,41 + 2 \cdot 0,1 = 0,61$ м.

Тепловой поток через стенку трубы без тепловой изоляции составит:

$$Q = k_l \cdot L \cdot (t_1 - t_2) = 12,8 \cdot 50 \cdot (200 - 10) \cdot 10^{-3} = 121,6 \text{ кВт} .$$

Найдём коэффициент теплопередачи теплоизолированного трубопровода:

$$k_{l \text{ из}} = \pi \left[\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\text{из}}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3} \right]^{-1} =$$

$$= \pi \left[\frac{1}{5000 \cdot 0,4} + \frac{1}{2 \cdot 10} \cdot \ln \frac{0,41}{0,4} + \frac{1}{2 \cdot 0,09} \cdot \ln \frac{0,61}{0,41} + \frac{1}{10 \cdot 0,61} \right]^{-1} = 1,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

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:

$$\Delta Q = Q - Q_{\text{из}} = 121,6 - 12,4 = 109,2 \text{ кВт} \cdot 3600 \frac{\text{с}}{\text{час}} \cdot 24 \frac{\text{час}}{\text{сут}} \cdot 365 \frac{\text{сут}}{\text{год}} \cdot 10^{-6} \frac{\text{кДж}}{\text{ГДж}} =$$

$$= 3444 \frac{\text{ГДж}}{\text{год}} \cdot \frac{1}{4,19} \frac{\text{Гкал}}{\text{ГДж}} = 822 \frac{\text{Гкал}}{\text{год}}$$

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:

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

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

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

$$b = \frac{1}{\eta \cdot Q_{\text{н}}^p} = \frac{1}{0,9 \cdot 7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг у.т.}}} = 1,587 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг у.т.}}{\text{ккал}} \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{Гкал}} = 158,7 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{Гкал}}$$

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:

$$B = \frac{Q_{\text{пол}}}{\eta \cdot Q_{\text{н}}^p} = \frac{\overbrace{1 \text{ Гкал} \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{Гкал}}}^{\text{ккал}}}{0,9 \cdot 7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг у.т.}}} = 158,7 \text{ кг у.т.}$$

А теперь вычислим удельный показатель:

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

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»

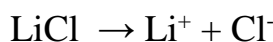
Пример 1.

Электролиз расплава соли хлорида лития LiCl на нерастворимых Pt-электродах.

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

Решение.

Запишем ионный состав электролита:



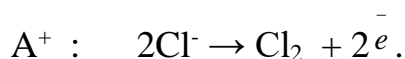
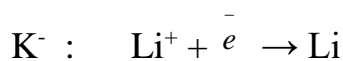
и стандартные потенциалы электродных процессов:

$$\text{К}^- : E_{\text{Li}^+/\text{Li}}^0 = -3,045 \text{ В,}$$

$$\text{А}^+ : E_{\text{Cl}_2/\text{Cl}}^0 = +1,36 \text{ В.}$$

$$U_{\text{min}} = E_{\text{Cl}_2/\text{Cl}}^0 - E_{\text{Li}^+/\text{Li}}^0 = 1,36 - (-3,045) = 4,405 \text{ В.}$$

Электродные процессы:



Данный электролиз можно использовать для получения лития и хлора.

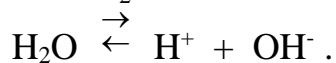
Ответ: $U_{\text{min}}=4,405 \text{ В}$

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:



Соль CuCl_2 образована слабым основанием $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 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 $\text{pH} = 5$).

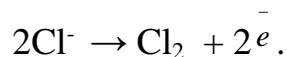
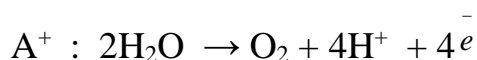
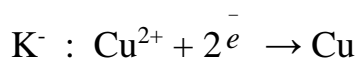
Определим потенциалы возможных процессов на аноде и катоде и запишем уравнения электродных процессов:

$$\text{К}^- : \quad E^0_{\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}} = +0,337 \quad \text{В}, \quad E^p_{\text{H}^+/\text{H}_2} = -0,059 \cdot \text{pH} = -0,295 \quad \text{В},$$

т.к. $E^0_{\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}}$ более положителен, чем $E^p_{\text{H}^+/\text{H}_2}$, то на катоде будет протекать только процесс восстановления ионов меди Cu^{2+} из раствора электролита.

$$\text{А}^+ : \quad E^0_{\text{Cl}_2/\text{Cl}^-} = +1,36 \quad \text{В}, \quad E^p_{\text{O}_2/\text{OH}^-} = 1,23 - 0,059 \cdot \text{pH} = +0,935 \quad \text{В},$$

т.к. $E^p_{\text{O}_2/\text{OH}^-}$ более отрицателен, чем $E^0_{\text{Cl}_2/\text{Cl}^-}$, то в первую очередь на аноде будет идти процесс окисления ионов OH^- . Однако, вследствие поляризации при больших плотностях тока потенциалы процессов выделения кислорода и хлора достаточно близки, поэтому на аноде будет идти также процесс окисления ионов Cl^- из раствора электролита. Таким образом, на электродах протекают следующие процессы:



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:

$$V^0_{\text{э},\text{O}_2} = 22,4/4 = 5,6 \quad \text{л/моль}, \quad V^0_{\text{э},\text{Cl}_2} = 22,4/2 = 11,2 \quad \text{л/моль},$$

$$M_{\text{э},\text{Cu}} = 64,4/2 = 32,2 \quad \text{г/моль}.$$

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

$$Q_{\text{O}_2} = \frac{V_{\text{O}_2} \cdot F}{V_{\text{э},\text{O}_2}} = \frac{5,6 \cdot 10^{-3} \cdot 96500}{5,6} = 96,5 \quad \text{Кл},$$

$$Q_{Cl_2} = \frac{V_{Cl_2} \cdot F}{V_{\text{э}, Cl_2}} = \frac{5,6 \cdot 10^{-3} \cdot 96500}{11,2} = 48,25$$

Кл.

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:

$$m_{Cu} = \frac{M_{\text{э}, Cu} \cdot Q_K}{F} = \frac{32,2 \cdot 114,75}{96500} = 0,0483$$

г = 48,3 мг

Определим выход по току (B_j) для всех процессов электролиза:

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

$$B_{O_2} = \frac{Q_{O_2}}{Q_A} = \frac{96,5}{114,75} = 0,66 = 66 \%; \quad B_{Cl_2} = \frac{Q_{Cl_2}}{Q_A} = \frac{48,25}{114,75} = 0,34 = 34 \%.$$

Ответ: $m_{Cu} = 48,3$ мг