

БАНК ЗАДАЧ_ИЭВТ
для подготовки к вступительным испытаниям в магистратуру

Задания № 1-2 по теме
«ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА»

1. Первый, второй и третий законы термодинамики.
2. Циклы Ренкина, Брайтона, Карно. Формулы расчета термических КПД циклов.
3. Энтальпия и энтропия.
4. Уравнение Менделеева-Клапейрона.
5. Закон Дальтона.

Задания № 3-4 по теме
«ГИДРОГАЗОДИНАМИКА»

1. Скорость звука, число Маха.
2. Критическая скорость потока.
3. Подъемная сила.
4. Давление полного торможения потока.
5. Вязкость жидкости.
6. Гидродинамический пограничный слой.
7. Основные режимы течения жидкости.
8. Уравнение неразрывности.
9. Уравнение Бернулли.

Задания № 5-6 по теме
«ТЕПЛОМАССОБМЕН»

1. Основные виды теплообмена и факторы, влияющие на их интенсивность, характеристики.
2. Закон Фурье.
3. Закон Ньютона-Рихмана.
4. Закон Стефана-Больцмана.
5. Уравнение теплопередачи.
6. Основные критерии подобия тепловых процессов.
7. Тепловой пограничный слой.
8. Режимы течения парожидкостной смеси в вертикальной трубе.

Задания № 7-8 по теме
«ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА»

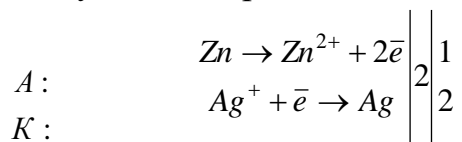
Гальванический элемент

Пример 1 Стандартный электродный потенциал, потенциал анода и катода, ЭДС серебряно-цинкового гальванического элемента.

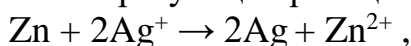
Решение. Выпишем из таблицы значения стандартных электродных потенциалов Zn и Ag:

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

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:



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



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

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

2 способ: по уравнению рассчитываем

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

(Дж);

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

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

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:

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

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

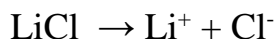
$$E_{\mathcal{E}} = E_{\text{к}}^p - E_{\text{а}}^p = 0,681 - (-0,822) = 1,503 \text{ В}.$$

Электролиз

Пример 3 Электролиз расплава соли хлорида лития $LiCl$ на нерастворимых Рт-электродах.

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

Решение. Запишем ионный состав электролита:



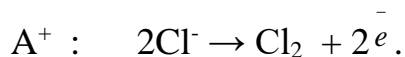
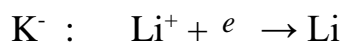
и стандартные потенциалы электродных процессов:

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

$$A^+ : E_{Cl_2/Cl}^0 = +1,36 \text{ В.}$$

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

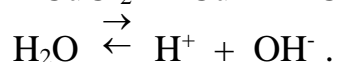
Электродные процессы:



Данный электролиз можно использовать для получения лития и хлора.

Пример 4 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 $Cu(OH)_2$ 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 $pH = 5$).

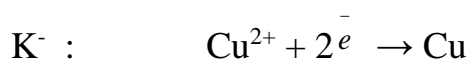
Определим потенциалы возможных процессов на аноде и катоде и запишем уравнения электродных процессов:

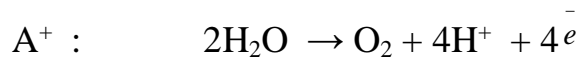
$$K^- : E_{Cu^{2+}/Cu}^0 = +0,337 \text{ В,} \quad E_{H^+/H_2}^p = -0,059 \cdot pH = -0,295 \text{ В,}$$

т.к. $E_{Cu^{2+}/Cu}^0$ более положителен, чем E_{H^+/H_2}^p , то на катоде будет протекать только процесс восстановления ионов меди Cu^{2+} из раствора электролита.

$$A^+ : E_{Cl_2/Cl^-}^0 = +1,36 \text{ В,} \quad E_{O_2/OH^-}^p = 1,23 - 0,059 \cdot pH = +0,935 \text{ В,}$$

т.к. E_{O_2/OH^-}^p более отрицателен, чем E_{Cl_2/Cl^-}^0 , 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:

$$V_{\text{э},O_2}^0 = 22,4/4 = 5,6 \quad \text{л/моль}, \quad V_{\text{э},Cl_2}^0 = 22,4/2 = 11,2 \quad \text{л/моль},$$

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

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

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

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

Суммарное количество электричества, прошедшее через анод, равно:

$$Q_A = Q_{O_2} + Q_{Cl_2} = 144,75 \quad \text{Кл}.$$

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

$$m_{Cu} = \frac{M_{\text{э},Cu} \cdot Q_K}{F} = \frac{32,2 \cdot 144,75}{96500} = 0,0483 \quad \text{г} = 48,3 \text{ мг}$$

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

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

$$B_{O_2} = \frac{Q_{O_2}}{Q_A} = \frac{96,5}{144,75} = 0,66 = 66 \quad \%; \quad B_{Cl_2} = \frac{Q_{Cl_2}}{Q_A} = \frac{48,25}{144,75} = 0,34 = 34 \quad \%.$$

Задание № 9 по теме «ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ»

1. Методы расчета ВВП.
2. Макроэкономические субъекты и макроэкономические рынки.
3. Совокупный спрос. Неценовые факторы, воздействующие на совокупный спрос.
4. Совокупное предложение. Неценовые факторы, влияющие на совокупное предложение.

5. Макроэкономическое равновесие. Модель AD-AS.
6. Безработица и ее виды. Закон Оукена.
7. Инфляция: причины и последствия. Уровень и темп инфляции.
8. Содержание и общие черты экономического цикла.
9. Деньги, их сущность и функции. Спрос и предложение денег.
10. Банковская система.
11. Фискальная политика государства: понятие, инструменты.
12. Монетарная политика государства: понятие, инструменты.

Задание № 10 по теме «ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ»

Задача 1.

Спрос и предложение некоторого товара определяются уравнениями:

$$Q_d = 600 - 25 \cdot P \text{ и } Q_s = 100 + 100 \cdot P;$$

- а) найти параметры равновесия на рынке данного товара (P^* и Q^*);
- б) государство установило налог с продаж на единицу данного товара в размере 2,5 д.е. К чему это приведет? Дать графические иллюстрации.

Решение:

а) Равновесная цена составит:

$$600 - 25 \cdot P = 100 + 100 \cdot P$$

$$500 = 125 \cdot P$$

$$P^* = 4 \text{ д.е.}$$

$$Q^* = 100 + 100 \cdot 4 = 500 \text{ д.е.}$$

б) Из уравнения спроса следует:

$$P_D = \frac{600 - Q}{25} = 24 - 0,04 \cdot Q.$$

Из уравнения предложения вытекает:

$$P_S = \frac{Q}{100} - 1 = 0,01 \cdot Q - 1.$$

Введение налога с продаж увеличит цену предложения до величины:

$$P'_S = 0,01 \cdot Q - 1 + 2,5 = 0,01 \cdot Q + 1,5$$

Совместное решение двух уравнений дает:

$$24 - 0,04 \cdot Q = 0,01 \cdot Q - 1,5;$$

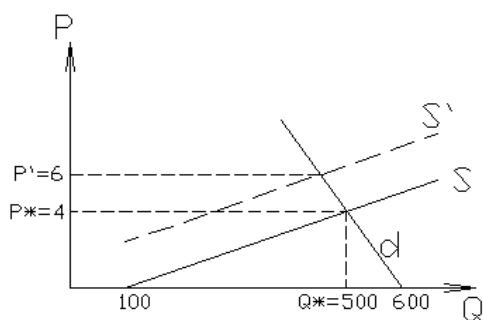
$$22,5 = 0,05 \cdot Q;$$

$$Q' = \frac{2250}{5} = 450 \text{ д.е.};$$

$$P' = 0,01 \cdot Q + 1,5 = 4,5 + 1,5 = 6 \text{ д.е.}$$

Вывод: Введение налога с продаж привело к повышению равновесной цены (P') снижению равновесного количества товара (Q').

Графические иллюстрации:



Задача 2.

Известны уравнения спроса и предложения $P_D = 8 - 0,1 \cdot Q_D$ и $P_S = 4 + 0,1 \cdot Q_S$.

- как изменятся параметры равновесия, если спрос упадет на 20%?
- как изменятся параметры равновесия, если предложение увеличится на 20 %
- к чему приведет совместное действие обоих указанных факторов?

Задача 3.

Функция спроса задана формулой $Q_d = 12,5 - 1,5P$, функция предложения

$$Q_s = 2 + 2P.$$

Определить:

- Насколько необходимо увеличить цену, чтобы объем спроса уменьшился на 30%.
- Насколько необходимо увеличить цену, чтобы объем предложения увеличился на 40%.

Задача 4.

В приведенной таблице представлены данные, характеризующие спрос и предложение на рынке шоколада.

Цена, д. е.	Объем спроса, тыс. шт.	Объем предложения, тыс. шт.
10	70	10
14	60	30
18	50	50
24	40	70
30	30	90

- Постройте кривые спроса и предложения.
- Как вы охарактеризуете ситуацию на рынке при цене за плитку шоколада 14 д. е.? Каковы размеры несовпадения планов продавцов и покупателей при данной цене?
- Как изменится ситуация при цене 24 д. е.?
- Чему равна равновесная цена?

Задача 5.

Данные функции спроса и предложения товара:

$$Q_d = 3000 - 2P$$

$$Q_s = -500 + 3P$$

- а) Найдите равновесный объем спроса и предложения.
 б) Как вы охарактеризуете ситуацию на рынке, если цена сложится на уровне 500 д. е.?

Задача 6.

Функция спроса задана формулой $Q_d = 8 - \frac{2}{3}P$, функция предложения $Q_s = 0,4P - 0,8$. Найти величину дефицита или профицита, если цена на рынке установится на уровне: $P_1 = 3$; $P_2 = 9$.

Задача 7.

В результате повышения цены товара с 5 до 6 д.е. объем спроса сократился с 9 до 7 тыс. штук. Определить коэффициент эластичности спроса по цене.

Решение:

Коэффициент эластичности спроса по цене:

$$E_P^D = \frac{\Delta Q}{\sum Q/2} \div \frac{\Delta P}{\sum P/2} = \frac{2}{(9+7)/2} \div \frac{1}{(5+6)/2} = 1,375$$

Задача 8.

Известна функция спроса на товар X $Q_{D(X)} = 8 - P_X + 0,2 \cdot P_Y$, где P_X – цена товара X, а P_Y цена товара Y. Допустим, что, $P_X = 4$ а $P_Y = 5$. Найти коэффициент перекрестной эластичности спроса на товар X по цене товара Y.

Задача 9.

Функция спроса на товар X описывается уравнением $Q_d = 150 - 2P$. При какой цене спрос на товар X будет иметь ценовую эластичность = -1?

Задача 10.

Спрос на компакт-диски характеризуется следующими данными:

Цена, руб.	Объем спроса (доход = 10 000 руб.)	Объем спроса (доход = 12 000 руб.)
8	40	50
10	32	45
12	24	30
14	16	20
16	8	12

Рассчитайте:

А) ценовую эластичность спроса, если цена на компакт-диски выросла с 8 руб. до 10 руб. и доход потребителя составляет, во-первых, 10 тыс. руб., во-вторых, 12 тыс. руб.;

Б) эластичность по доходу, если доход потребителя увеличивается с 10 тыс. руб. до 12 тыс. руб., во-первых, при цене 12 и, во-вторых, при цене 16 руб.

Задания № 11-12 по теме «НАГНЕТАТЕЛИ И ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ»

Задача:

Два одинаковых параллельно соединённых насоса работали на общую сеть. Насос №1 был аварийно остановлен. Как после этого изменилась подача насоса №2?

Варианты ответа:

1. Не изменилась
2. Уменьшилась
3. Увеличилась
4. Стала равной 0 (один насос не справился с сетью и так же был остановлен)

Ответ обосновать.

Задача-вопрос с разобранным решением.

Параметры насоса в рабочей точке равны: подача $Q=2000 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор $H=120 \text{ м}$, КПД $\eta = 0,85$. Плотность жидкости $\rho = 1 \text{ т}/\text{м}^3$. Какая полезная энергия передана в насосе 1 кг жидкости и какая мощность на его валу в рабочей точке?

Решение:

Полезная энергия, переданная единице веса жидкости равна напору $H=120 \text{ м}$.

Вес 1 кг жидкости $G = 1 \cdot 9,8 = 9,8 \text{ Н}$

Полезная энергия, переданная 1 кг жидкости $P = G \cdot H = 9,8 \cdot 120 = 1176 \text{ Дж}$ (1,18 кДж)

Мощность на валу насоса $N = \frac{Q \cdot H \cdot g \cdot \rho}{3600 \cdot \eta} = \frac{2000 \cdot 120 \cdot 9,8 \cdot 1}{3600 \cdot 0,85} = 768,6 \text{ кВт}$

Ответ: 768,6 кВт.

**Задание № 13 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

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

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

$$B_{\Sigma \text{ у.т.}} = \frac{B_{\Sigma \text{ н.э.}} \cdot Q_{\text{н.э.}}^{\text{р}}}{Q_{\text{н.э.}}^{\text{р}}} = \frac{8 \cdot 10^6 \cdot 10\,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг н.э.}}}{7\,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг у.т.}}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{т}}{\text{кг}} = 11\,429 \text{ т у.т.}$$

Следовательно, затраты топлива на технологию составят:

$$B_{\text{тех}} = B_{\Sigma} - B_{\text{ТЭЦ}} = 11\,429 - 10\,132 = 1\,297 \text{ т у.т.}$$

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.

Варианты задачи:

1.1. Предприятие потребляет 10 тыс. тонн угля в год ($Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 15 \text{ МДж/кг}$). ТЭЦ предприятия вырабатывает 10 тыс. Гкал тепловой энергии и 5 млн кВт·ч электрической энергии в год. Известны удельные затраты топлива на выработку тепла $b_q = 0,15 \frac{\text{т у.т.}}{\text{Гкал}}$ и электроэнергии $b_{\text{э}} = 0,32 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$.

Определите годовой расход условного топлива, используемого на технологию.

1.2. Определите годовые суммарные затраты мазута ($Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 9\,400 \text{ ккал/кг}$) на предприятии, если известно, что ТЭЦ предприятия, работающая на мазуте, вырабатывает 15 тыс. Гкал тепловой энергии и 30 млн кВт·ч электрической энергии в год. Годовой расход мазута на технологию составляют 1500 т в год.

Известны удельные затраты топлива на выработку тепла $b_q = 0,11 \frac{\text{т у.т.}}{\text{Гкал}}$ и электроэнергии $b_{\text{э}} = 0,3 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$.

1.3. Предприятие потребляет 30 млн нм^3 природного газа ($Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 35 \text{ МДж/нм}^3$) в год. ТЭЦ предприятия вырабатывает 30 тыс. Гкал тепловой энергии и 50 млн кВт·ч электрической энергии в год. Известны удельные затраты топлива на выработку тепла $b_q = 0,14 \frac{\text{т у.т.}}{\text{Гкал}}$ и электроэнергии $b_{\text{э}} = 0,31 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$. Определите годовой расход природного газа, используемого на технологию.

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.

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

$h_{\text{пв}} = t_{\text{пв}} \cdot c_p$ – 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:

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

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

Варианты задачи:

2.1. Определите годовую экономию природного газа ($Q_n^p = 8400$ ккал/нм³) на котельной от проведения энергосберегающих мероприятий. Котельная работает при следующих условиях: нагрузка котла 15 т/ч, энтальпия пара – 2780 кДж/кг, годовое число часов работы котельной – 5900 ч. В результате проведения энергосберегающих мероприятий удельные тепловые потери с уходящими газами уменьшились с 11,8% до 7,3%, причем тепловые потери от химической неполноты сгорания составляют 2,1%, а тепловые потери в окружающую среду – 2%. Температура питательной воды составляет 75 °С.

2.2. Во сколько раз нужно увеличить КПД котлоагрегата, чтобы годовая экономия составила 1000 т у.т. Котельная работает при следующих условиях: нагрузка котла 30 т/ч, энтальпия пара – 2900 кДж/кг, годовое число часов работы котельной – 4000 ч. Тепловые потери с уходящими газами составляют 10%, потери от химической неполноты сгорания – 3%, а тепловые потери в окружающую среду – 2%. Температура питательной воды составляет 70 °С.

2.3. Определите годовую экономию условного топлива котельной от проведения энергосберегающих мероприятий. Котельная работает при следующих условиях: нагрузка котла 40 т/ч, энтальпия пара – 2900 кДж/кг, годовое число часов работы котельной – 6870 ч. В результате проведения энергосберегающих мероприятий удельные тепловые потери с уходящими газами уменьшились с 12% до 6%, причем тепловые потери от химической неполноты сгорания составляют 4%, а тепловые потери в окружающую среду – 2%. Температура питательной воды составляет 75 °С.

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 $Q_n^p = 35$ МДж/нм³. Коэффициент полезного действия котельной $\eta_{кот} = 0,9$. КПД передачи теплоты по тепловой сети $\eta_{тр.} = 0,9$. 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

$$B = \frac{Q}{\eta_{кот} \eta_{тр} Q_n^p}$$

Тогда часовая экономия топлива составит:

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

Сокращение выбросов диоксида углерода при этом

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

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

Варианты задачи:

3.1. Оцените сокращение выбросов диоксида углерода, если в результате проведения энергосберегающих мероприятий в системе отопления предприятия, находящегося в г. Брянск (отопительный период $n = 199$ сут.), удалось снизить потребление тепловой энергии на $\Delta Q = 0,15$ Гкал/ч.

Предприятие получает тепловую энергию по тепловой сети от котельной, использующей в качестве топлива природный газ с низшей теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 33,5 \text{ МДж/нм}^3$. Коэффициент полезного действия котельной $\eta_{\text{кот}} = 0,85$. КПД передачи теплоты по тепловой сети $\eta_{\text{пр.}} = 0,9$. Удельные выбросы диоксида углерода составляют 2150 г/нм^3 .

3.2. Оцените сокращение выбросов диоксида углерода, если в результате проведения энергосберегающих мероприятий в системе отопления предприятия, находящегося в г. Кемерово (отопительный период $n = 227 \text{ сут.}$), удалось снизить потребление тепловой энергии на $\Delta Q = 0,2 \text{ Гкал/ч.}$ Предприятие получает тепловую энергию по тепловой сети от котельной, использующей в качестве топлива природный газ с низшей теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 8300 \text{ ккал/нм}^3$. Коэффициент полезного действия котельной $\eta_{\text{кот}} = 0,83$. КПД передачи теплоты по тепловой сети $\eta_{\text{пр.}} = 0,92$. Удельные выбросы диоксида углерода составляют 2100 г/нм^3 .

Пример 4: Определите годовую экономию тепловой энергии при нанесении изоляции на трубопровод длиной 50 м. Коэффициент теплоотдачи пара внутри трубы – $5000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, коэффициент теплоотдачи воздуха снаружи – $10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, толщина стенки – 5 мм, коэффициент теплопроводности стенки трубы – $10 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, внутренний диаметр трубопровода 400 мм. Температура теплоносителя внутри – $200 \text{ }^\circ\text{C}$, снаружи – $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Толщина тепловой изоляции – 100 мм, коэффициент теплопроводности изоляции – $0,09 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. 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

$$k_l = \pi \left[\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right]^{-1} =$$

$$= \pi \left[\frac{1}{5000 \cdot 0,4} + \frac{1}{2 \cdot 10} \cdot \ln \frac{\overbrace{0,4 + 2 \cdot 0,005}^{d_2=0,41 \text{ м}}}{0,4} + \frac{1}{10 \cdot 0,41} \right]^{-1} = 12,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} .$$

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

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.

Варианты задачи:

4.1. Определите годовую экономию тепловой энергии при нанесении изоляции на трубопровод длиной 100 м. Коэффициент теплоотдачи пара внутри трубы – 8000 Вт/(м²·К), коэффициент теплоотдачи воздуха снаружи – 15 Вт/(м²·К), толщина стенки – 4 мм, коэффициент теплопроводности стенки трубы – 15 Вт/(м·К), внутренний диаметр трубопровода 300 мм. Температура теплоносителя внутри – 120 °С, снаружи – 0 °С. Толщина тепловой изоляции – 150 мм, коэффициент теплопроводности изоляции – 0,01 Вт/(м·К). Считать, что трубопровод работает непрерывно в течение года.

4.2. Определите потери теплоты на трубопроводе длиной 100 м и температуру воды в конце участка, если известно, что коэффициент теплоотдачи воды внутри трубы – 300 Вт/(м²·К), коэффициент теплоотдачи воздуха снаружи – 15 Вт/(м²·К), толщина стенки – 2 мм, коэффициент теплопроводности стенки трубы – 10 Вт/(м·К), внутренний диаметр трубопровода 100 мм. Температура воды на входе – 120 °С, температура воздуха снаружи – 0 °С. Толщина тепловой изоляции – 30 мм, коэффициент теплопроводности изоляции – 0,03 Вт/(м·К). Расход воды составляет 300 кг/ч.

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 $\eta = \frac{1}{b \cdot Q_n^p}$, откуда

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

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:

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

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.

Варианты задачи:

5.1. Определить удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт·ч электрической энергии, если известно, что КПД ТЭС 43%.

5.2. Определить удельный расход природного газа ($Q_n^p = 35 \text{ МДж/нм}^3$) на выработку 1 кВт·ч электрической энергии, если известно, что КПД ТЭС 35%.

5.3. Определить удельный расход мазута ($Q_n^p = 42 \text{ МДж/кг}$) на выработку 1 ГДж тепловой энергии, если известно, что КПД котельной 85%.

5.4. Определить КПД производства электрической энергии, если известно, что удельный расход условного топлива составляет $b_{\text{э}} = 0,3445 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$.

Задание № 14 по теме «КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ»

Задача

Определить площадь поверхности пароперегревателя (ПП) в паровом котле с параметрами перегретого пара - $t_{\text{ПП}} = 440 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_{\text{ПП}} = 4 \text{ МПа}$. Расход перегретого пара $G_{\text{ПП}} = 20 \text{ кг/с}$. Энтальпия перегретого пара $h_{\text{ПП}} = 3308 \text{ кДж/кг}$. 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 $\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_l) = 70,84 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}}$, коэффициент теплоотдачи от стенки ПП к пару $\alpha_2 = 1047,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}}$ Термическим сопротивлением стенки

трубы ПП можно пренебрегаем ($\delta/\lambda = 0$). Среднелогарифмический 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, м^2

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

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

Задание № 15 по теме

«ИСТОЧНИКИ И СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ»

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, $^\circ\text{C}$
130/70	-25

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 , четные варианты: $20 \text{ }^\circ\text{C}$; нечетные варианты: $18 \text{ }^\circ\text{C}$. 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) 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.

Если нужно применять количественное регулирование, то на сколько % необходимо снизить расход сетевой воды, поступающий в систему отопления, G_o ?

Задание № 16 по теме

«ТЕПЛОМАССОБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ»

Пример 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 оребренной поверхности.

Решение: КПД оребренной поверхности можно найти по следующей формуле

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

отношению площади оребренной поверхности к площади гладкой поверхности, η_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. 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.

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

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

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

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

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

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

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%.

Варианты задач:

1.1. Имеется пластинчатый теплообменник с прямоугольными ребрами. Толщина ребра составляет 0,1 мм, шаг оребрения – 4 мм, расстояние между пластинами (высота канала) 6 мм. Коэффициент теплоотдачи равен 30 Вт/(м²·К). Материал ребер – алюминий с коэффициентом теплопроводности 200 Вт/(м·К). Найти КПД оребренной поверхности.

1.2. Имеется алюминиевое ребро высотой 20 мм, толщиной – 0,5 мм. Коэффициент теплоотдачи от воздуха к ребрам равен 50 Вт/м² К. Степень оребрения равна 15. Коэффициент теплопроводности алюминия принять равным 200 Вт/(м·К). Найти КПД ребра и КПД оребренной поверхности.

1.3. В трубчатом оребренном теплообменнике толщина ребер составляет 0,3 мм, шаг между ребрами – 4 мм, диаметр трубок у основания ребра – 30 мм, диаметр по вершине ребер составляет 60 мм. Вывести формулу и найти степень оребрения трубки.

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

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

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

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

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

Варианты задач:

2.1. В противоточном кожухотрубном теплообменном аппарате нагревается вода от температуры 10 °С до температуры 80 °С. Расход воды – 7,3 м³/ч. Вода нагревается дымовыми газами с температурой 120 °С на входе. Расход

дымовых газов составляет 10 000 кг/час. Их теплоемкость – 1200 Дж/(кг·К). Оценить требуемую площадь теплообменной поверхности и эффективность аппарата.

2.2. В перекрестноточном трубчатом теплообменном аппарате нагревается воздух от температуры –18 °С до температуры +22 °С. Расход воздуха 4000 м³/ч. Воздух нагревается водой с температурой 100 °С. Температура воды на выходе равна 70 °С. Оцените площадь поверхности теплообмена аппарата. Поправку на схему течения теплоносителей принять равной 0,9.

2.3. В кожухотрубном теплообменном аппарате нагревается вода от температуры 7 °С до 65 °С. Расход воды – 3 м³/ч. Вода нагревается насыщенным водяным паром с температурой 165 °С и теплотой парообразования 2200 кДж/кг. Оцените площадь теплообменной поверхности, найти расход пара и эффективность аппарата.

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.

Варианты задач:

3.1. В прямоточном теплообменнике вода нагревается маслом с расходом 5 кг/с и температурой 70°C . Расход воды равен 5 кг/с. Температура воды на входе – 5°C . Коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата 500 Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$), а площадь поверхности теплообмена 12 м^2 . Теплоемкость масла $1,9$ кДж/(кг·К). Рассчитать температуру воды на выходе и тепловую мощность аппарата.

3.2. В противоточном теплообменнике тепловой мощностью 100 кВт вода нагревается от температуры 10°C до 65°C маслом с расходом $3,5$ кг/с и температурой 90°C . Рассчитать температуру воды на выходе, если ее расход увеличить на 30% . Коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата 700 Вт/ $\text{м}^2\text{K}$, а площадь поверхности теплообмена 15 м^2 . Теплоемкость масла $1,9$ кДж/кг·К.

3.3. В прямоточном теплообменнике вода нагревается маслом с расходом $4,4$ кг/с и температурой 90°C . Расход воды равен $2,8$ кг/с. Температура воды на входе – 10°C . Коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата 430 Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$), а площадь поверхности теплообмена 15 м^2 . Теплоемкость масла $1,9$ кДж/(кг·К). Рассчитать температуру воды и масла на выходе, а также найти тепловую мощность аппарата.

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 $\text{м}^3/\text{час}$. 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/ м^3 .

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

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

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. Валужева, 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

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

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

Варианты задач:

4.1. Оценить площадь поверхности теплообмена, если в теплообменнике охлаждается воздух от температуры 43 °С до 25 °С. Холодный теплоноситель – вода. Охлаждение сопровождается конденсацией содержащейся в воздухе влаги. Энтальпия воздуха на входе в аппарат – 100 кДж/кг, на выходе из аппарата – 70 кДж/кг. Расход сухого горячего воздуха – 5000 м³/час. Средняя разность температур в аппарате 16 °С. Коэффициент оребрения труб принять равным 16. Эффективность оребренной поверхности принять равной 0,8.

4.2. Оценить площадь поверхности теплообмена, если в теплообменнике охлаждается воздух от температуры 36 °С до 18 °С. Холодный теплоноситель – вода. Охлаждение сопровождается конденсацией содержащейся в воздухе влаги. Энтальпия воздуха на входе в аппарат – 55 кДж/кг, на выходе из аппарата – 31 кДж/кг. Расход сухого горячего воздуха – 8000 м³/час. Средняя разность температур в аппарате 21 °С. Коэффициент оребрения труб принять равным 18. Эффективность оребренной поверхности принять равной 0,82.

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 $\bar{t} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{5 + 60}{2} = 32,5$ °С.

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

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

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

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

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.

Варианты задач:

5.1. Оценить требуемую мощность на прокачку дымовых газов в теплообменном аппарате, если их средняя температура составляет 130 °С, давление - 1 атм, массовый расход – 15 000 кг/час, а перепад давлений газа между входом и выходом – 1 200 Па. Считать теплофизические свойства дымовых газов близкими свойствам воздуха. Плотность газов при температуре 0 °С считать равной 1,3 кг/м³.

5.2. Воздух нагревается в теплообменном аппарате от -15 °С до 20 °С. Массовый расход газа 10 000 кг/час. Площадь узкого сечения трубного пучка составляет 0,3 м². Число Эйлера равно 4,4. Найти требуемую электрическую мощность на прокачку воздуха. Плотность воздуха при температуре 0 °С принять равной 1,3 кг/м³.