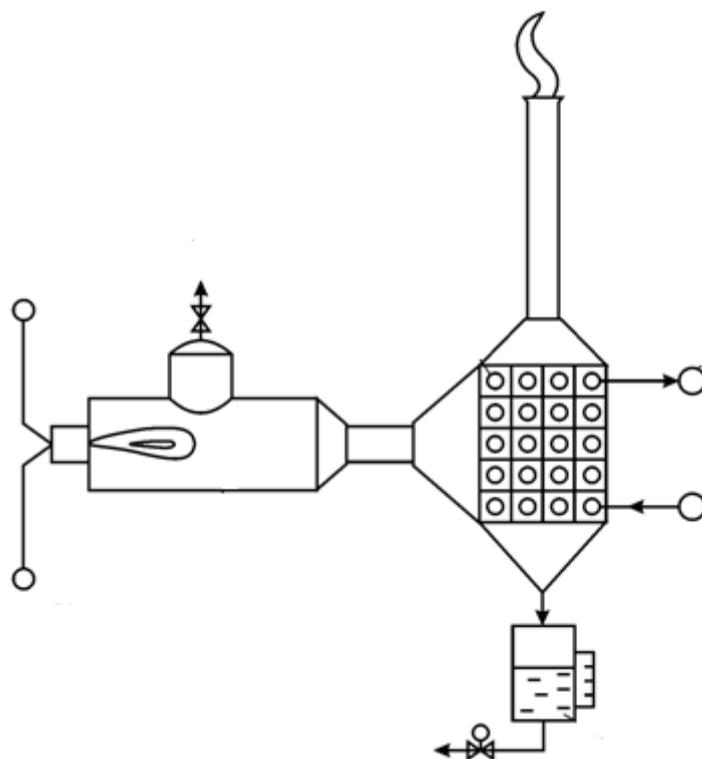


**В.Ю. Лакомкин, Е.Н. Громова, С.Н. Смородин**

# **ЗАДАЧИ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ**

## **Сборник задач**



**Санкт-Петербург**

**2018**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

---

**ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**В.Ю. Лакомкин, Е.Н. Громова, С.Н. Смородин**

**ЗАДАЧИ  
ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ**

**Сборник задач**

**Санкт-Петербург**

**2018**

УДК 621.311.1(075)  
ББК 31.15я 7  
Л 195

Лакомкин В.Ю., Громова Е.Н., Смородин С.Н. Задачи по энергосбережению: сборник задач /ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2018. – 39 с.

В настоящем сборнике задач приведены 16 задач по энергосбережению в энергетических и теплотехнологических процессах и установках по курсу «Энергосбережение в энергетических и теплотехнологических установках». Они применимы не только для целлюлозно-бумажной промышленности, но и для других отраслей. Решение задач такого рода предусматривает определение эфффеektivности проводимых энергосберегающих мероприятий.

Предназначается для студентов всех форм обучения по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Рецензенты:

профессор кафедры процессов и аппаратов химической технологии ВШТЭ СПбГУПТД, д-р техн. наук В.С. Куров;

доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплосиловые установки» Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра 1, канд. техн. наук В.И. Крылов.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве сборника задач.

©Высшая школа технологии и энергетики  
СПбГУПТД, 2018  
©Лакомкин В.Ю., Громова Е.Н.,  
Смородин С.Н., 2018

## Введение

В предлагаемом сборнике задач «Задачи по энергосбережению» по курсу «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях» приведены примеры расчетов различных производственных схем, направленных на определение экономического эффекта в результате внедрения мероприятий по экономии топливно-энергетических ресурсов.

Обучающиеся по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» должны не только понимать энергетические и теплотехнологические процессы, но и уметь делать соответствующие расчеты с определением расходов теплоты и топлива, а также стоимости полученной энергии.

В основе приведенных задач находятся уравнения материального и теплового балансов, с помощью которых определяется эффективность использования теплоты и топлива по удельным затратам на выработку продукции в теплотехнологических установках и электроэнергии в энергетических процессах, коэффициенты полезного действия соответствующих установок.

При анализе уравнений теплового баланса представляется возможность определять величину полезной энергии и соответствующие потери в окружающую среду, принимать инженерно-технические решения по сокращению потерь энергии.

В последние годы наблюдается быстрый рост цен на топливо и соответственно на электрическую энергию и тепловую энергию, и, как следствие, на продукцию промышленных предприятий, отопление жилых и общественных зданий, поэтому каждое мероприятие, направленное на снижение расхода топливно-энергетических ресурсов, приводит к значительному экономическому эффекту.

## Задача №1. Расчет калорифера

Составить уравнение теплового баланса калорифера, определить расход пара, диаметр паропровода, диаметр конденсатопровода, размеры воздухопроводов до и после калорифера, расход топлива и стоимость нагревания воздуха. Расчетная схема калорифера приведена на рис.1.

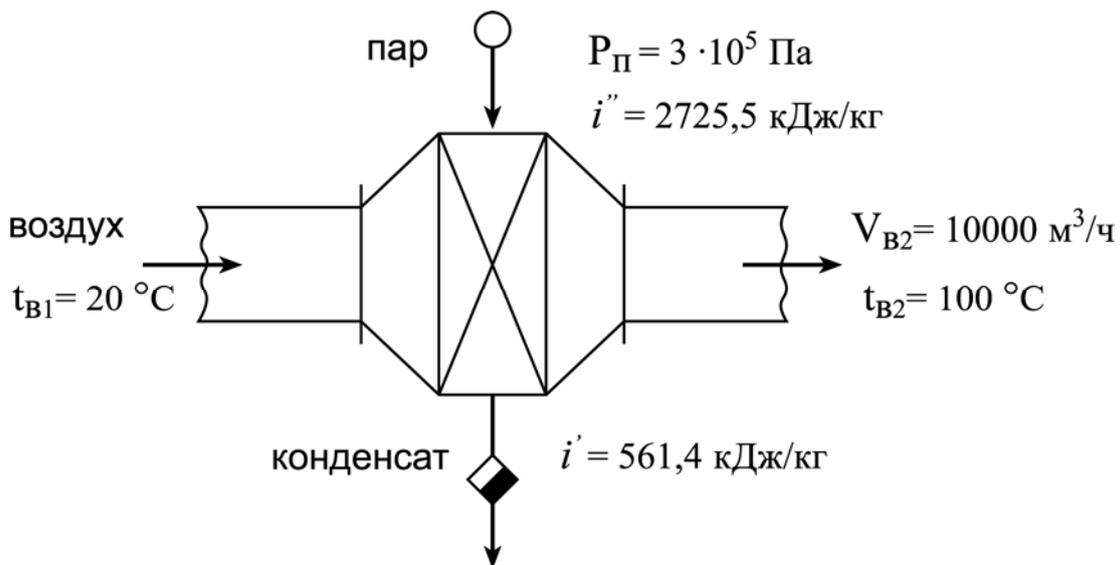


Рис.1. Расчетная схема калорифера

### Исходные данные:

температура воздуха до калорифера	$t_{B1} = 20 \text{ }^\circ\text{C};$
температура воздуха после калорифера	$t_{B2} = 100 \text{ }^\circ\text{C};$
объемный расход воздуха после калорифера	$V_{B2} = 10000 \text{ м}^3/\text{ч};$
давление пара в калорифере	$P_{II} = 3 \text{ ата } (3 \cdot 10^5 \text{ Па}).$

### Решение

Физические параметры теплоносителей:

энтальпия пара при  $P_{II} = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$   $i'' = 2725,5 \text{ кДж/кг};$

энтальпия конденсата при  $P_{II} = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$   $i' = 561,4 \text{ кДж/кг};$

плотность воздуха при  $t_{B1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho_{B1} = \rho_0 \frac{273}{273 + t_{B1}} = 1,293 \frac{273}{273 + 20} = 1,2 \text{ кг / м}^3 ,$$

где  $\rho_0$  - плотность воздуха при нормальных условиях,  $\text{кг/м}^3$  ;

плотность воздуха при  $t_{B2} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho_{B2} = 1,293 \frac{273}{273 + 100} = 0,946 \text{ кг/м}^3 .$$

Массовый расход воздуха

$$L_B = V_{B2} \rho_{B2} = 10000 \cdot 0,946 = 9460 \text{ кг/ч} = 2,63 \text{ кг/с} .$$

Уравнение теплового баланса калорифера

$$D_{\Pi} (i'' - i') \varphi = L_B C_B (t_{B2} - t_{B1}) ,$$

где  $C_B = 1,005 \text{ кДж/(кг }^\circ\text{C)}$  - массовая теплоемкость воздуха при средней его температуре  $t_B^{\text{cp}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi = 0,95$  - коэффициент использования тепла.

Расход пара

$$D_{\Pi} = \frac{L_B C_B (t_{B2} - t_{B1})}{(i'' - i') \varphi} = \frac{2,63 \cdot 1,005 (100 - 20)}{(2725,5 - 561,4) 0,95} = 0,1 \text{ кг/с} .$$

Диаметр паропровода

$$d_{\Pi} = \sqrt{\frac{4 D_{\Pi}}{\pi W_{\Pi} \rho_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1}{3,14 \cdot 30 \cdot 1,651}} = 0,051 \text{ м} ,$$

где  $W_{\Pi} = 30 \text{ м/с}$  и  $\rho_{\Pi} = 1,651 \text{ кг/м}^3$  - соответственно скорость и плотность пара.

Принимаем к установке стандартный паропровод с условным диаметром  $d_y = 50 \text{ мм}$  ( $d_H \times \delta = 57 \times 2 \text{ мм}$ ).

Диаметр конденсатопровода

$$d_K = \sqrt{\frac{4 D_{\Pi}}{\pi W_K \rho_K}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1}{3,14 \cdot 1,0 \cdot 932}} = 0,012 \text{ м} ,$$

где  $W_K = 1,0 \text{ м/с}$  и  $\rho_K = 932 \text{ кг/м}^3$  - соответственно скорость и плотность конденсата.

Принимаем к установке стандартный конденсатопровод с условным диаметром  $d_y = 15 \text{ мм}$  ( $d_H \times \delta = 18 \times 2 \text{ мм}$ ).

Проходное сечение воздухопровода до калорифера

$$f_1 = \frac{L_B}{\rho_{B1} W_B} = \frac{2,63}{1,2 \cdot 10} = 0,219 \text{ м}^2 ,$$

где  $W_B$  - скорость воздуха принимается 8 – 12 м/с.

Для воздуховода квадратного сечения сторона основания составит

$$a = \sqrt{f_1} = \sqrt{0,219} = 0,468 \text{ м} .$$

Принимаем к установке воздуховод стандартных размеров 500×500 мм.

Проходное сечение воздуховода после калорифера

$$f_2 = \frac{V_{B2}}{3600 \cdot W_B} = \frac{10000}{3600 \cdot 10} = 0,28 \text{ м}^2 .$$

Для воздуховода квадратного сечения сторона основания составит

$$a = \sqrt{f_2} = \sqrt{0,28} = 0,527 \text{ м} .$$

Принимаем к установке воздуховод стандартных размеров 500×500 мм.

Годовой расход теплоты

$$Q_T = V_{B2} \rho_{B2} C_B (t_{B2} - t_{B1}) \tau = \\ = 10000 \cdot 0,946 \cdot 1,005 \cdot (100 - 20) \cdot 24 \cdot 360 = 6,57 \cdot 10^9 \text{ кДж/год}.$$

Расход топлива

$$V_T = \frac{Q_T}{Q_i^r \eta} = \frac{6,57 \cdot 10^9}{35000 \cdot 0,95} = 197,6 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{год} ,$$

где  $Q_i^r = 35000 \text{ кДж/м}^3$  - теплота сгорания природного газа;  $\eta = 0,95$  - коэффициент полезного действия.

Стоимость топлива, необходимого для нагрева воздуха

$$S = k V_T = 4,5 \cdot 197,6 \cdot 10^3 = 889200 \text{ руб/год},$$

где  $k = 4,5 \text{ руб/м}^3$  - стоимость 1 м<sup>3</sup> природного газа.

## **Задача №2. Расчет подогревателя щелока**

Составить уравнение теплового баланса подогревателя щелока и определить температуру, до которой нагревается щелок в теплообменнике, если коэффициент потерь составляет 2 % от поступившей теплоты в подогреватель с паром. Рассчитать расход топлива для нагревания щелока и диаметры паропровода и щелокопровода. Расчетная схема подогревателя щелока приведена на рис.2.

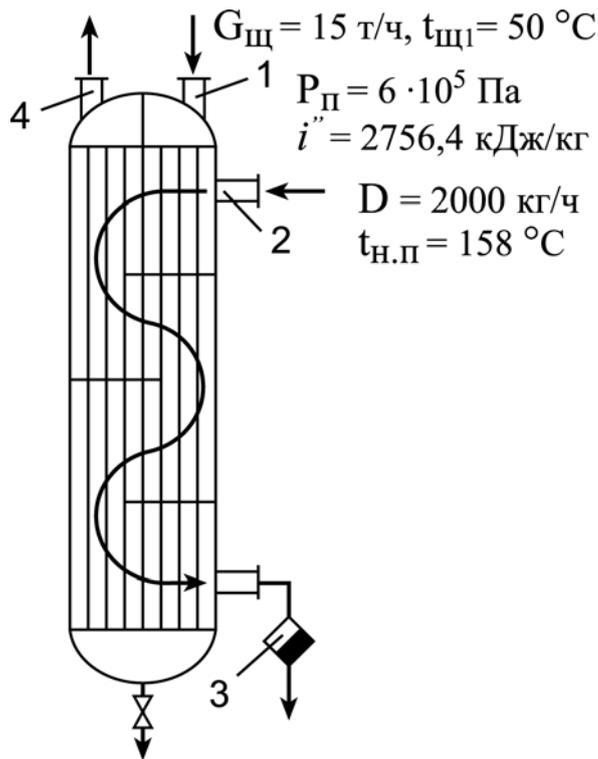


Рис.2. Расчетная схема подогревателя щелока:

1 – вход щелока; 2 – вход пара; 3 – конденсатоотводчик;  
4 – выход нагретого щелока

**Исходные данные:**

Давление греющего пара  $P_{п} = 6 \text{ ата } (6 \cdot 10^5 \text{ Па})$ ;

Расход пара  $D = 2000 \text{ кг/ч}$ ;

Расход щелока  $G_{щ} = 15 \text{ т/ч}$ ;

Температура щелока на входе  $t_{щ1} = 50 \text{ °C}$ .

**Решение:**

Физические параметры теплоносителей:

энтальпия пара при  $P_{п} = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}$   $i'' = 2756,4 \text{ кДж/кг}$ ;

энтальпия конденсата при  $P_{п} = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}$   $i' = 670,4 \text{ кДж/кг}$ ;

температура насыщения пара  $t_{н} = 158,8 \text{ °C}$ ;

теплоемкость щелока  $C_{щ} = 4,2 \text{ кДж/(кг °C)}$ .

Уравнение теплового баланса подогревателя

$$G_{щ} C_{щ} (t_{щ2} - t_{щ1}) = D_{п} (i'' - i') \varphi ,$$

где  $\varphi = 0,98$  - коэффициент использования тепла.

Преобразуем уравнение теплового баланса

$$G_{\text{щ}} C_{\text{щ}} t_{\text{щ}2} - G_{\text{щ}} C_{\text{щ}} t_{\text{щ}1} = D_{\text{п}} (i'' - i') \varphi ,$$

тогда температура щелока на выходе из подогревателя

$$\begin{aligned} t_{\text{щ}2} &= \frac{D (i'' - i') \varphi + G_{\text{м}} C_{\text{щ}} t_{\text{щ}}}{G_{\text{м}} C_{\text{м}}} = \\ &= \frac{2000 (2756,4 - 670,4) 0,98 + 15000 \cdot 4,2 \cdot 50}{15000 \cdot 4,2} = 115 \text{ }^{\circ}\text{C} . \end{aligned}$$

Часовой расход теплоты

$$Q = G_{\text{м}} C_{\text{щ}} (t_{\text{щ}2} - t_{\text{щ}1}) = 15000 \cdot 4,2 (115 - 50) = 4095 \cdot 10^3 \text{ кДж/ч} .$$

Расход топлива

$$V_{\text{т}} = \frac{Q}{Q_{\text{i}}^{\text{р}} \eta} = \frac{4095000}{35000 \cdot 0,9} = 130 \text{ м}^3 / \text{ч} ,$$

где  $\eta = 0,9$  - коэффициент полезного действия.

Диаметр паропровода

$$d_{\text{п}} = \sqrt{\frac{4D}{3600 \pi W_{\text{п}} \rho_{\text{п}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2000}{3600 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 3,17}} = 0,075 \text{ м} ,$$

где  $W_{\text{п}} = 40 \text{ м/с}$  и  $\rho_{\text{п}} = 3,17 \text{ кг/м}^3$  - соответственно скорость и плотность пара.

Принимаем к установке стандартный паропровод с условным диаметром  $d_{\text{у}} = 70 \text{ мм}$  ( $d_{\text{н}} \times \delta = 76 \times 3,5 \text{ мм}$ ).

Диаметр щелокопровода

$$d_{\text{щ}} = \sqrt{\frac{4G_{\text{щ}}}{3600 \pi W_{\text{щ}} \rho_{\text{щ}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 15000}{3600 \cdot 3,14 \cdot 1,0 \cdot 1200}} = 0,067 \text{ м} ,$$

где  $W_{\text{щ}} = 1,0 \text{ м/с}$  и  $\rho_{\text{щ}} = 1200 \text{ кг/м}^3$  - соответственно скорость и плотность щелока.

Принимаем к установке стандартный трубопровод с условным диаметром  $d_{\text{у}} = 70 \text{ мм}$  ( $d_{\text{н}} \times \delta = 76 \times 3,5 \text{ мм}$ ).

### Задача №3. Расчет котла-утилизатора

Определить количество пара, вырабатываемого котлом-утилизатором, установленным за мартеновской печью, а также рассчитать годовую экономию топлива (природного газа). Расчетная схема водотрубного котла-утилизатора приведена на рис.3.

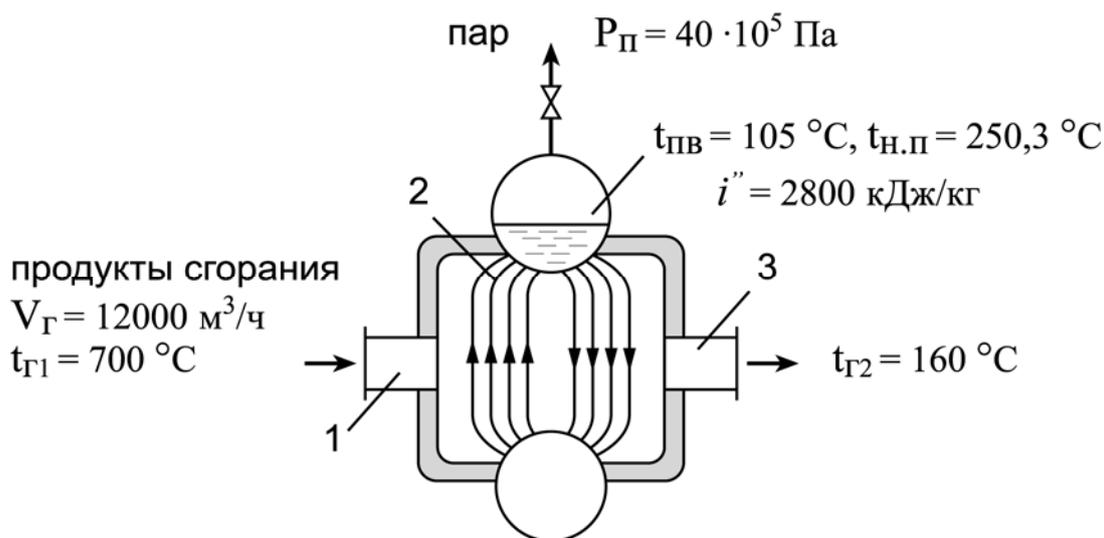


Рис.3. Расчетная схема водотрубного котла-утилизатора:  
1 – вход продуктов сгорания; 2 – конвективный пучок;  
3 – выход газов

#### Исходные данные:

начальная температура газов	$t_{\Gamma 1} = 700$ °С;
конечная температура газов	$t_{\Gamma 2} = 160$ °С;
объемный расход газов	$V_{\Gamma} = 12000$ м <sup>3</sup> /ч;
давление пара, вырабатываемого котлом-утилизатором	$P_{\Pi} = 40 \cdot 10^5$ Па (40 ата).

#### Решение

Физические параметры теплоносителей:

средняя температура газов

$$t_{\Gamma}^{\text{cp}} = \frac{t_{\Gamma 1} + t_{\Gamma 2}}{2} = \frac{700 + 160}{2} = 430$$
 °С;

плотность газов при  $t_{\Gamma}^{\text{cp}} = 430 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\rho_{\Gamma} = 1,293 \cdot \frac{273}{273 + 430} = 0,502 \text{ кг/м}^3 \quad ;$$

теплоемкость газов при  $t_{\Gamma}^{\text{cp}} = 430 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $C_{\Gamma} = 1,16 \text{ кДж/(кг }^{\circ}\text{C)}$  ;

энтальпия пара при  $P_{\Pi} = 40 \cdot 10^5 \text{ Па}$   $i'' = 2800,0 \text{ кДж/кг}$ ;

температура насыщения пара  $t_{\text{н.п}} = 250,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ;

температура питательной воды  $t_{\text{п.в}} = 105,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ;

энтальпия питательной воды  $i' = 440,0 \text{ кДж/кг}$  .

Уравнение теплового баланса котла-утилизатора

$$V_{\Gamma} \rho_{\Gamma} C_{\Gamma} (t_{\Gamma 1} - t_{\Gamma 2}) \varphi = D (i'' - i') .$$

Количество пара, вырабатываемого котлом-утилизатором

$$D = \frac{V_{\Gamma} \rho_{\Gamma} C_{\Gamma} (t_{\Gamma 1} - t_{\Gamma 2}) \varphi}{i'' - i'} = \frac{12000 \cdot 0,502 \cdot 1,16 \cdot (700 - 160) \cdot 0,95}{3600 \cdot (2800,0 - 440,0)} =$$
$$= 0,422 \text{ кг/с} = 1519 \text{ кг/ч} \quad ,$$

где  $\varphi = 0,95$  - коэффициент использования теплоты.

Количество сэкономленного природного газа за 1 час

$$V_{\Gamma} = \frac{Q}{Q_i^{\Gamma} \eta} = \frac{D (i'' - i')}{Q_i^{\Gamma} \eta} = \frac{1519 \cdot (2800,0 - 440,0)}{35000 \cdot 0,9} = 113,80 \text{ м}^3 / \text{ч} \quad ,$$

где  $Q_i^{\Gamma} = 35000 \text{ кДж/м}^3$  - теплота сгорания природного газа;

$\eta = 0,9$  - коэффициент полезного действия.

Годовая экономия природного газа

$$V_{\Gamma}^{\text{год}} = V_{\Gamma} \cdot 24 \cdot 360 = 113,80 \cdot 24 \cdot 360 = 983232,0 \text{ м}^3 / \text{год} \quad .$$

Стоимость сэкономленного природного газа

$$S = k B_m^{\text{сод}} = 4,5 \cdot 983232,0 = 4424544 \text{ руб/год} \quad ,$$

где  $k = 4,5 \text{ руб/м}^3$  - стоимость  $1 \text{ м}^3$  природного газа.

#### Задача №4. Расчет паропровода

Определить экономическую эффективность применения тепловой изоляции паропровода. Расчетная схема изолированного паропровода приведена на рис.4.

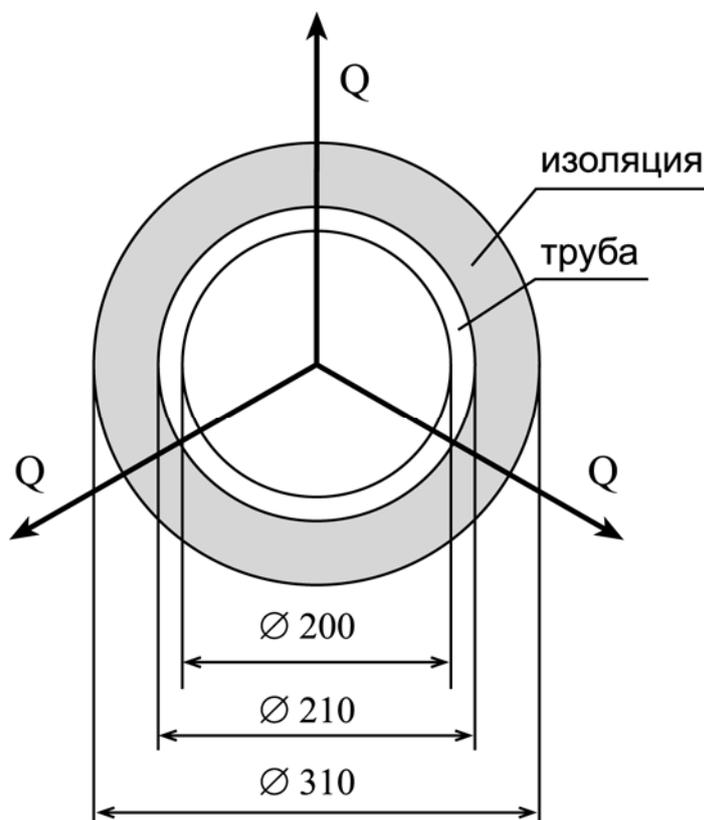


Рис.4. Расчетная схема изолированного паропровода

#### **Исходные данные:**

внутренний диаметр паропровода	$d_1 = 200$ мм;
наружный диаметр паропровода	$d_2 = 210$ мм;
толщина изоляции (шлаковаты)	$\delta_{из} = 50$ мм;
диаметр трубопровода в изоляции	$d_3 = 310$ мм;
длина паропровода	$l = 100$ м;
коэффициент теплоотдачи от пара к стенке	$\alpha_1 = 80$ Вт/(м <sup>2</sup> °С);
коэффициент теплоотдачи от поверхности паропровода к окружающему воздуху	$\alpha_2 = 8$ Вт/(м <sup>2</sup> °С);
давление пара в паропровode	$P_{п} = 10 \cdot 10^5$ Па (10 ата);
температура перегретого пара	$t_{пе} = 400$ °С.

## Решение

Физические параметры теплоносителей и материалов:

энтальпия перегретого пара  $i_{пе} = 3264,0$  кДж/кг;

теплопроводность стали  $\lambda_{ст} = 50$  Вт/(м °С);

теплопроводность шлаковаты  $\lambda_{из} = 0,07$  Вт/(м °С).

Поверхность теплообмена паропровода без изоляции

$$F_1 = \pi d_2 l = 3,14 \cdot 0,21 \cdot 100 = 66,0 \text{ м}^2 .$$

Коэффициент теплопередачи (без изоляции)

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{80} + \frac{0,005}{50} + \frac{1}{8}} = 7,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ °С}) ,$$

где  $\delta_{ст} = \frac{d_2 - d_1}{2}$  - толщина стенки, мм.

Потери теплоты паропроводом без изоляции

$$Q_1 = k_1 F_1 (t_{пе} - t_в) = 7,3 \cdot 66 \cdot (400 - 10) = 187900 \text{ Вт} ,$$

где  $t_в = 10$  °С - температура окружающего воздуха.

Поверхность теплообмена паропровода с изоляцией

$$F_2 = \pi d_3 l = 3,14 \cdot 0,31 \cdot 100 = 97,34 \text{ м}^2 .$$

Коэффициент теплопередачи (с изоляцией)

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{80} + \frac{0,005}{50} + \frac{0,05}{0,07} + \frac{1}{8}} = 1,17 \text{ Вт}/\text{м}^2 \text{ °С}.$$

Потери теплоты паропроводом с изоляцией

$$Q_2 = k_2 F_2 (t_{пе} - t_в) = 1,17 \cdot 97,34 \cdot (400 - 10) = 44400 \text{ Вт} .$$

Уменьшение потерь теплоты за счет выполнения изоляции составит

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{187900}{44400} = 4,2 \text{ раза} .$$

Для данного примера экономия теплоты составит

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = 187900 - 44400 = 143500 \text{ Вт} .$$

Годовая экономия теплоты составит

$$\begin{aligned}\Delta Q_{\text{год}} &= 3600 \cdot \Delta Q \cdot 24 \cdot 360 = 3600 \cdot 143500 \cdot 24 \cdot 360 = \\ &= 4,46 \cdot 10^{12} \text{ Дж/год} = 4,46 \cdot 10^9 \text{ кДж/год} .\end{aligned}$$

Годовая экономия топлива (природного газа)

$$V_{\text{т}} = \frac{\Delta Q_{\text{год}}}{Q_{\text{i}}^{\text{r}} \eta} = \frac{4,46 \cdot 10^9}{35000 \cdot 0,9} = 141587,3 \text{ м}^3/\text{год} ,$$

где  $\eta = 0,9$  - коэффициент полезного действия котельного агрегата.

### Задача №5. Расчет экономии газообразного топлива

Рассчитать экономию газообразного топлива, если в результате реконструкции КПД котлоагрегата повысился с 80 % до 90 %. Схема котельного агрегата приведена на рис.5.

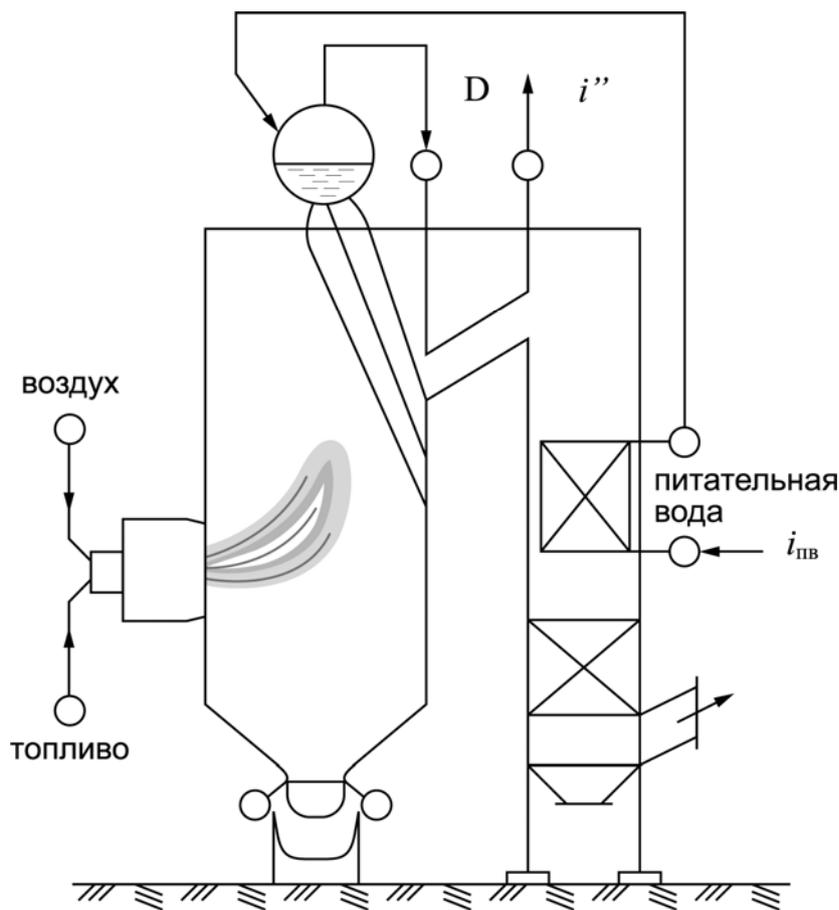


Рис.5. Схема котельного агрегата

### **Исходные данные:**

паропроизводительность котлоагрегата	$D = 75 \text{ т/ч};$
давление пара	$P_{\text{п}} = 40 \text{ ата } (40 \cdot 10^5 \text{ Па});$
температура перегретого пара	$t_{\text{пе}} = 440 \text{ }^\circ\text{C};$
температура питательной воды	$t_{\text{п.в}} = 105 \text{ }^\circ\text{C}.$

### **Решение**

Физические параметры теплоносителей:

энтальпия перегретого пара	$i'' = 3307,7 \text{ кДж/кг};$
энтальпия питательной воды	$i' = 440,0 \text{ кДж/кг}.$

Расход топлива при  $\eta_1 = 80\%$

$$B_{\text{T1}} = \frac{D (i'' - i_{\text{п.в}})}{Q_i^r \eta_1} = \frac{75000 \cdot (3307,7 - 440,0)}{35000 \cdot 0,8} = 7,68 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{ч} ,$$

где  $Q_i^r = 35000 \text{ кДж/м}^3$  - теплота сгорания природного газа.

Расход топлива при  $\eta_2 = 90\%$

$$B_{\text{T2}} = \frac{D (i'' - i_{\text{п.в}})}{Q_i^r \eta_2} = \frac{75000 \cdot (3307,7 - 440,0)}{35000 \cdot 0,9} = 6,83 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{ч} .$$

Годовая экономия топлива

$$\begin{aligned} \Delta B_{\text{T}}^{\text{год}} &= (B_{\text{T1}} - B_{\text{T2}}) \cdot 24 \cdot 360 = (7,68 \cdot 10^3 - 6,83 \cdot 10^3) \cdot 24 \cdot 360 = \\ &= 7,34 \cdot 10^6 \text{ м}^3 / \text{год} . \end{aligned}$$

Стоимость сэкономленного природного газа

$$S = k \Delta B_{\text{T}}^{\text{год}} = 4,5 \cdot 7,34 \cdot 10^6 = 33030000, \text{ руб/год}$$

где  $k = 4,5 \text{ руб/м}^3$  - стоимость  $1 \text{ м}^3$  природного газа.

### **Задача №6. Расчет экономии топлива при сушке бумаги**

Рассчитать экономию природного газа на сушку бумаги, если понизить температуру отработавшей паровоздушной смеси от  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Схема сушильной части бумагоделательной машины приведена на рис.6.

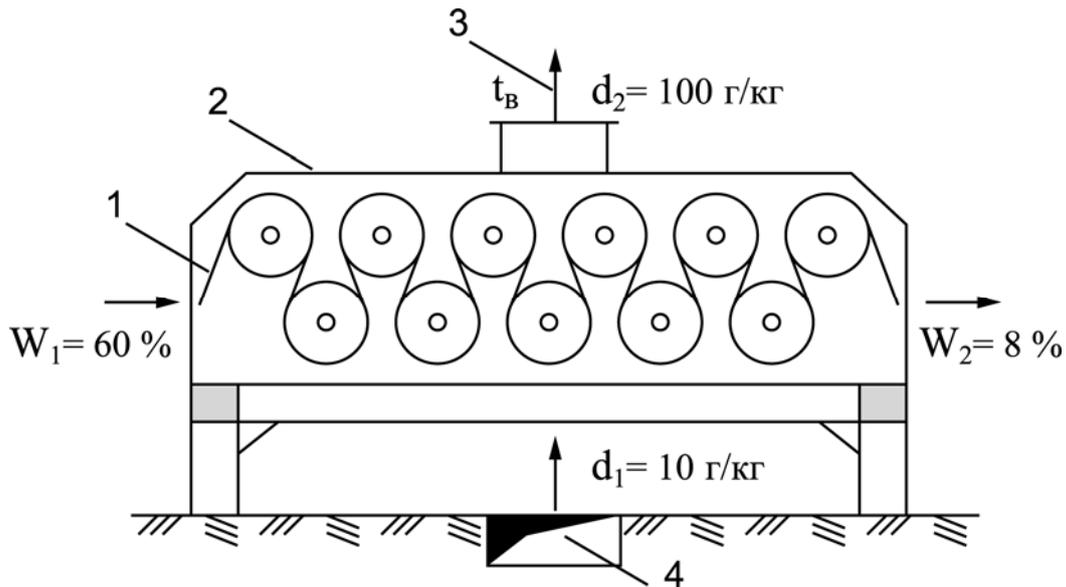


Рис.6. Схема сушильной части бумагоделательной машины:  
 1 – бумажное полотно; 2 – вентиляционный колпак;  
 3 – отвод отработавшей паровоздушной смеси;  
 4 – подвод сушильного воздуха

**Исходные данные:**

производительность бумагоделательной машины	$G_M = 10 \text{ т/ч};$
начальная влажность бумаги	$W_1 = 60 \text{ \%};$
конечная влажность бумаги (на накате)	$W_2 = 8 \text{ \%};$
влажносодержание воздуха, подаваемого в сушильную часть машины	$d_1 = 10 \text{ г/кг};$
влажносодержание паровоздушной смеси, удаляемой в окружающую среду	$d_2 = 100 \text{ г/кг}.$

**Решение**

Массовый расход испаряющейся влаги

$$\begin{aligned}
 M_{\text{вл}} &= G_M \left( \frac{W_1}{100 - W_1} - \frac{W_2}{100 - W_2} \right) = \\
 &= 10000 \cdot \left( \frac{60}{100 - 60} - \frac{8}{100 - 8} \right) = 14100 \text{ кг / ч} .
 \end{aligned}$$

Массовый расход воздуха, подаваемого в сушильную часть машины

$$L_B = \frac{M_{\text{вп}} 1000}{d_2 - d_1} = \frac{14100 \cdot 1000}{100 - 10} = 156,6 \cdot 10^3 \text{ кг/ч} = 43,5 \text{ кг/с} .$$

Энтальпия влажного воздуха (паровоздушной смеси) при  $t_B = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $d_2 = 100 \text{ г/кг}$

$$I_1 = C_B t_B + (2500 + C_{\text{п}} t_{\text{п}}) d_2 \cdot 10^{-3} = \\ = 1,005 \cdot 80 + (2500 + 1,8 \cdot 80) \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 344,8 \text{ кДж/кг} ,$$

где  $C_{\text{п}} = 1,8 \text{ кДж/(кг }^\circ\text{C)}$  - теплоемкость пара;  $C_B = 1,005 \text{ кДж/(кг }^\circ\text{C)}$  – теплоемкость воздуха.

Расход теплоты при  $t_B = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $d_2 = 100 \text{ г/кг}$

$$Q_1 = L_B I_1 = 43,5 \cdot 344,8 = 15000 \text{ кВт}.$$

Энтальпия влажного воздуха (паровоздушной смеси) при  $t_B = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $d_2 = 100 \text{ г/кг}$

$$I_2 = 1,005 \cdot 70 + (2500 + 1,8 \cdot 70) \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 333,0 \text{ кДж/кг} .$$

Расход теплоты при  $t_B = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $d_2 = 100 \text{ г/кг}$

$$Q_2 = L_B I_2 = 43,5 \cdot 333,0 = 14500 \text{ кВт} .$$

Годовая экономия теплоты

$$\Delta Q_{\text{год}} = 3600 (Q_1 - Q_2) \cdot 24 \cdot 360 = \\ = 3600 (15000 - 14500) \cdot 24 \cdot 360 = 1,56 \cdot 10^9 \text{ кДж/кг}.$$

Годовая экономия топлива

$$\Delta V_{\text{т}} = \frac{\Delta Q_{\text{год}}}{Q_1^{\text{г}} \eta} = \frac{1,56 \cdot 10^9}{35000 \cdot 0,9} = 49,5 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год} ,$$

где  $\eta = 0,9$  - коэффициент полезного действия;  $Q_1^{\text{г}} = 35000 \text{ кДж/м}^3$  - теплота сгорания природного газа.

Стоимость сэкономленного природного газа

$$S = k \Delta V_{\text{т}} = 4,5 \cdot 49,5 \cdot 10^3 = 222750 \text{ руб/год} ,$$

где  $k = 4,5 \text{ руб/м}^3$  - стоимость  $1 \text{ м}^3$  природного газа.

## Задача №7. Расчет нагревательной печной установки

Составить уравнение теплового баланса нагревательной печной установки и рассчитать технологический и энергетический коэффициенты полезного действия. Определить относительные потери с уходящими газами, с материалом и в окружающую среду. Схема нагревательной печной установки приведена на рис.7.

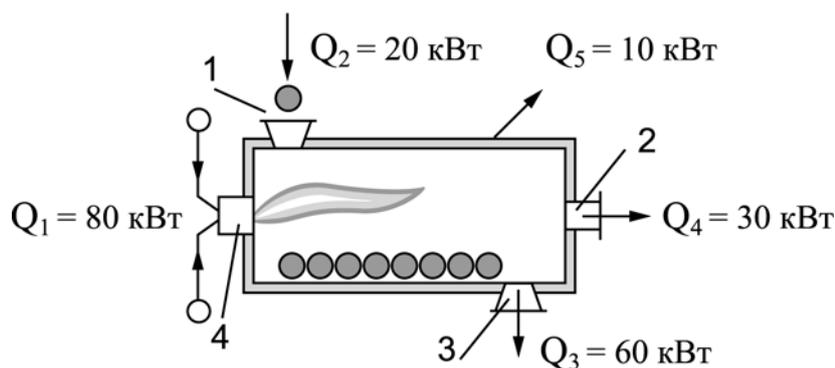


Рис.7. К расчету теплового баланса нагревательной печной установки:

- 1 – загрузка материала; 2 – отвод продуктов сгорания;  
3 – выгрузка материала; 4 - горелка

### *Исходные данные:*

теплопоступления с сушильным агентом	$Q_1 = 80 \text{ кВт};$
теплопоступления с материалом	$Q_2 = 20 \text{ кВт};$
теплопотери с материалом	$Q_3 = 60 \text{ кВт};$
теплопотери с уходящими газами	$Q_4 = 30 \text{ кВт};$
теплопотери в окружающую среду	$Q_5 = 10 \text{ кВт};$

### *Решение*

Уравнение теплового баланса

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5$$
$$80 + 20 = 60 + 30 + 10 \quad .$$

Технологический КПД

$$\eta_T = \frac{Q_3 - Q_2}{Q_1 + Q_2} \cdot 100 = \frac{60 - 20}{80 + 20} \cdot 100 = 40\% \quad .$$

Энергетический КПД

$$\eta_э = \frac{Q_1 - Q_4}{Q_1 + Q_2} \cdot 100 = \frac{80 - 30}{80 + 20} \cdot 100 = 50\% .$$

Относительные потери с уходящими газами

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_1 + Q_2} \cdot 100 = \frac{30}{80 + 20} \cdot 100 = 30\% .$$

Относительные потери с материалом

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_1 + Q_2} \cdot 100 = \frac{60}{80 + 20} \cdot 100 = 60\% .$$

Относительные потери в окружающую среду

$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_1 + Q_2} \cdot 100 = \frac{10}{80 + 20} \cdot 100 = 10\% .$$

### Задача №8. Расчет теплового баланса печной установки

Составить тепловой баланс и рассчитать КПД печной установки без утилизации теплоты уходящих газов и с утилизацией теплоты уходящих газов за счет применения теплофикационного экономайзера. Схема нагревательной печной установки приведена на рис.8.

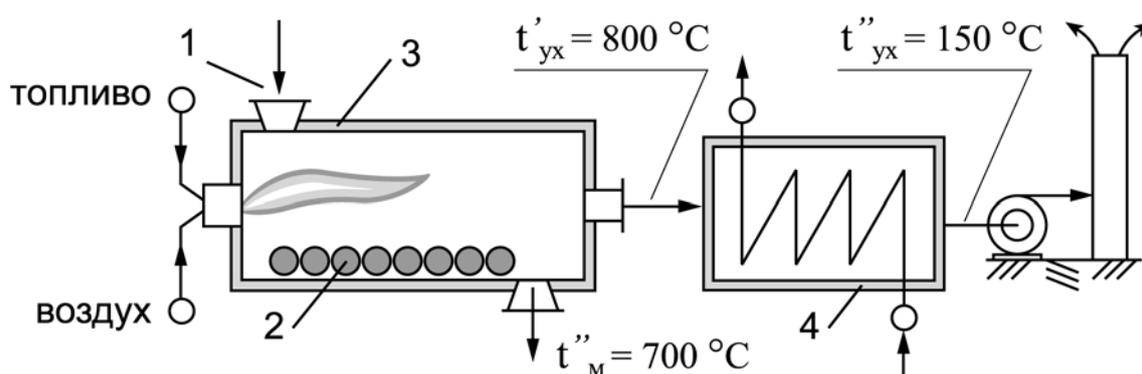


Рис.8. К расчету нагревательной печной установки с теплофикационным экономайзером:

- 1 – загрузка заготовок; 2 – заготовки; 3 – рабочая камера;
- 4 – теплофикационный экономайзер

### **Исходные данные:**

производительность нагревательной печи	$G_M = 1000$ кг/ч;
коэффициент избытка воздуха в рабочей камере	$\alpha = 1,1$ ;
температура дутьевого воздуха	$t_B = 30$ °С;
теоретический расход воздуха для горения	$V_B^o = 8,5$ м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> ;
начальная температура заготовок	$t'_M = 20$ °С;
конечная температура нагретых заготовок	$t''_M = 700$ °С;
объем продуктов сгорания (уходящих газов)	$V_\Gamma = 10$ м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> ;
температура топлива	$t_T = 20$ °С;
теплоемкость топлива	$C_T = 1,26$ кДж/(кг °С);
температура уходящих газов:	
без утилизации теплоты	$t'_{yx} = 800$ °С;
с утилизацией теплоты	$t''_{yx} = 150$ °С.

### **Решение**

Физические параметры теплоносителей и материалов:

средняя теплоемкость стальных заготовок  $C_M = 0,46$  кДж/(кг °С).

Уравнение теплового баланса

$$Q'_M + Q_T = Q''_M + Q_{yx} + Q_{пот} .$$

Теплота материала (заготовок), поступающих в печь

$$Q'_M = G_M C_M t'_M = \frac{1000}{3600} \cdot 0,46 \cdot 20 = 2,56 \text{ кДж/с} .$$

Теплота, выделяющаяся в результате горения топлива

$$\begin{aligned} Q_T &= V_T (Q_i^\Gamma + \alpha V_B^o t_B + C_T t_T) = V_T (35000 + 1,1 \cdot 8,5 \cdot 30 + 1,26 \cdot 20) = \\ &= V_T \cdot 35305,7 \text{ кДж/м}^3 , \end{aligned}$$

где  $Q_i^\Gamma = 35000$  кДж/м<sup>3</sup> - теплота сгорания природного газа;

$V_T$  - расход топлива, м<sup>3</sup>/ч.

Теплота материала (заготовок), нагретых в печи

$$Q''_M = G_M C_M t''_M = \frac{1000}{3600} \cdot 0,46 \cdot 700 = 89,44 \text{ кДж/с} .$$

Теплота уходящих дымовых газов при  $t'_{yx} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{yx}^{800} = V_T V_\Gamma C_\Gamma t'_{yx} = V_T \cdot 10,0 \cdot 1,264 \cdot 800 = V_T \cdot 10112 \text{ кДж/м}^3 ,$$

где  $C_\Gamma = 1,264 \text{ кДж/(кг }^\circ\text{C)}$ - теплоемкость уходящих газов при  $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Потери теплоты в окружающую среду принимаем 2 % от теплоты сгорания топлива

$$Q_{\text{пот}} = 0,02 Q_i^\Gamma V_T = 0,02 \cdot 35000 \cdot V_T = V_T \cdot 700 \text{ кДж/м}^3 .$$

На основании уравнения теплового баланса

$$2,56 + V_T \cdot 35305,7 = 89,44 + V_T \cdot 10112 + V_T \cdot 700 .$$

Расход природного газа при  $t'_{yx} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$

$$V_T (35305,7 - 10112 - 700) = 89,44 - 2,56$$

$$V_T = \frac{86,88}{24494} = 0,0035 \text{ м}^3/\text{с} = 12,77 \text{ м}^3/\text{ч} .$$

КПД печной установки при  $t'_{yx} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{G_M C_M (t''_M - t'_M)}{V_T (Q_i^\Gamma + \alpha V_\Gamma^0 C_B t_B + C_T t_T) + \frac{G_M}{3600} C_M t'_M} = \\ &= \frac{\frac{1000}{3600} \cdot 0,46 \cdot (700 - 20)}{0,0033 (35000 + 1,1 \cdot 8,5 \cdot 1,005 \cdot 30 + 1,26 \cdot 20) + \frac{1000}{3600} \cdot 0,46 \cdot 20} = \\ &= \frac{86,89}{119,07} = 0,73 \cdot 100 = 73 \% . \end{aligned}$$

Теплота уходящих дымовых газов при  $t''_{yx} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{yx}^{150} = V_T V_\Gamma C_\Gamma t''_{yx} = V_T \cdot 10,0 \cdot 1,08 \cdot 150 = V_T \cdot 1620 \text{ кДж/м}^3 ,$$

где  $C_\Gamma = 1,08 \text{ кДж/(кг }^\circ\text{C)}$ - теплоемкость уходящих газов при  $t = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Расход природного газа при  $t''_{yx} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$

$$V_T (35305,7 - 1625 - 700) = 89,44 - 2,56$$

$$V_T = \frac{86,88}{32981} = 0,0026 \text{ м}^3/\text{с} = 9,47 \text{ м}^3/\text{ч} .$$

КПД печной установки при  $t''_{yx} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\eta_2 = \frac{\frac{1000}{3600} \cdot 0,46 \cdot (700 - 20)}{0,0026 (35000 + 1,1 \cdot 8,5 \cdot 1,005 \cdot 30 + 1,26 \cdot 20) + \frac{1000}{3600} \cdot 0,46 \cdot 20} =$$

$$= \frac{86,89}{94,36} = 0,92 \cdot 100 = 92 \% .$$

### Задача №9. Расчет экономического эффекта от установки теплоуловителя

Рассчитать экономический эффект от установки теплоуловителя (ТУ) для нагревания свежего воздуха отработавшей в сушильной камере паровоздушной смеси (ПВС). Расчетная схема сушильной установки с теплоуловителем приведена на рис.9.

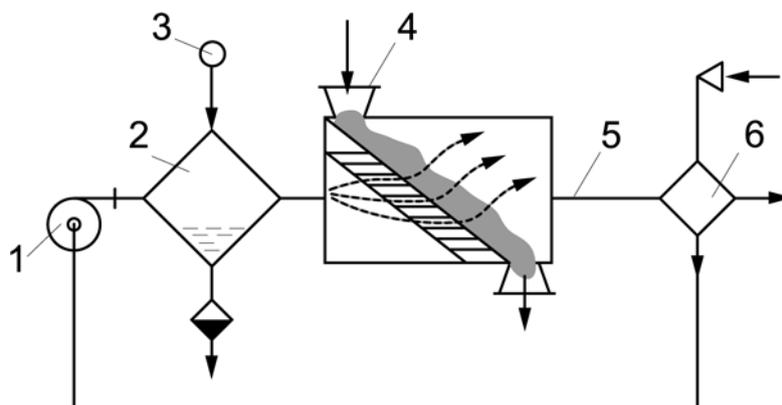


Рис.9. Расчетная схема сушильной установки с теплоуловителем:  
 1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – паропровод; 4 – загрузка материала; 5 – отработавшая паровоздушная смесь;  
 6 - теплоуловитель

#### Исходные данные:

температура отработавшей ПВС до установки ТУ

$t'_{ПВС} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

температура обработавшей ПВС после установки ТУ  $t''_{\text{ПВС}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 массовый расход ПВС  $L_{\text{ПВС}} = 10000 \text{ кг/ч}$  (2,8 кг/с);  
 влагосодержание обработавшей ПВС  $d_{\text{ПВС}} = 80 \text{ г/кг}$ .

### Решение

Энтальпия ПВС до установки ТУ

$$I_1 = C_B t'_{\text{ПВС}} + i_{\text{П}} d_{\text{ПВС}} 10^{-3} = 1,005 \cdot 70 + 2500 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 270,4 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия ПВС после установки ТУ

$$I_2 = C_B t''_{\text{ПВС}} + i_{\text{П}} d_{\text{ПВС}} 10^{-3} = 1,005 \cdot 50 + 2500 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 250,3 \text{ кДж/кг.}$$

Экономия теплоты

$$\Delta Q_{\text{эк}} = L_{\text{ПВС}} (I_1 - I_2) = 10000 (270,4 - 250,3) = 201000 \text{ кДж/ч.}$$

Экономия топлива

$$\Delta B = \frac{\Delta Q_{\text{эк}}}{Q_i^r \eta_k} = \frac{201000}{36872 \cdot 0,92} = 5,93 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

где  $Q_i^r = 36872 \text{ кДж/м}^3$  - теплота сгорания природного газа;  
 $\eta = 0,92$  - коэффициент полезного действия.

Экономический эффект

$$\mathcal{E} = \Delta B_T \cdot 24 \cdot 360 \cdot k = 5,93 \cdot 24 \cdot 360 \cdot 4,5 = 230558 \text{ руб.}$$

где  $k = 4,5 \text{ руб/м}^3$  - стоимость  $1 \text{ м}^3$  природного газа.

### **Задача №10. Расчет охладителя конденсата**

Определить экономическую эффективность применения водоводяного охладителя конденсата для нагревания воды. Расчетная схема включения охладителя конденсата для подогрева питательной воды приведена на рис.10.

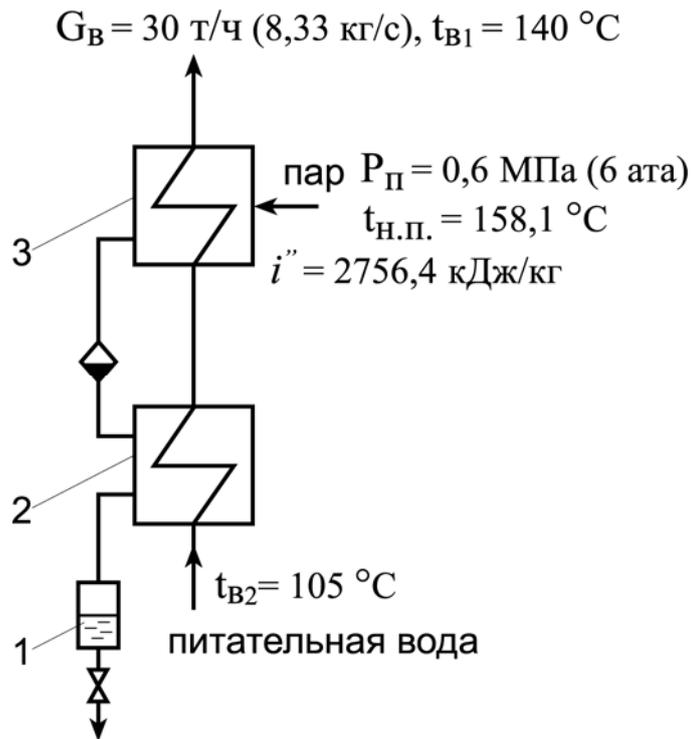


Рис.10. Расчетная схема включения охладителя конденсата для подогрева питательной воды:  
 1 – сборник конденсата; 2 – охладитель конденсата;  
 3 – подогреватель питательной воды

**Исходные данные:**

расход воды	$G_B = 30 \text{ т/ч (8,33 кг/с)}$ ;
начальная температура воды	$t_{B2} = 105 \text{ °C}$ ;
температура нагретой воды	$t_{B1} = 140 \text{ °C}$ ;
пар сухой насыщенный:	
давление	$P = 0,6 \text{ МПа}$ ;
энтальпия	$i'' = 2756,4 \text{ кДж/кг}$ ;
температура насыщения	$t_{\text{н.п.}} = 158,1 \text{ °C}$ ;
температура конденсата после охладителя	$t_k = 110 \text{ °C}$ ;
энтальпия конденсата	$i' = 670,4 \text{ кДж/кг}$ .

**Решение**

Расход пара для нагревания воды при отсутствии охладителя конденсата

$$D_{\text{п}} = \frac{G_{\text{в}} C_{\text{в}} (t_{\text{в1}} - t_{\text{в2}})}{(i'' - i') \varphi} = \frac{8,33 \cdot 4,19 (140 - 105)}{(2756,4 - 670,4) 0,98} =$$

$$= 0,60 \text{ кг/с (2160 кг/ч) ,}$$

где  $C_{\text{в}} = 4,19 \text{ кДж/(кг } ^\circ\text{С)}$  - теплоемкость воды;  $\varphi = 0,98$  - коэффициент использования теплоты.

Экономия топлива в результате включения охладителя конденсата

$$B_{\text{т}} = \frac{D_{\text{п}} C_{\text{в}} (t_{\text{н.п}} - t_{\text{к}})}{Q_{\text{i}}^{\text{r}} \eta} = \frac{2160 \cdot 4,19 (158,1 - 110)}{36872 \cdot 0,98} =$$

$$= 12,22 \text{ м}^3 / \text{ч (0,0034 м}^3 / \text{с) .}$$

### Задача №11. Расчет сепаратора

Определить количество образующихся водяных паров вскипания в сепараторе. Расчетная схема сепаратора приведена на рис.11.

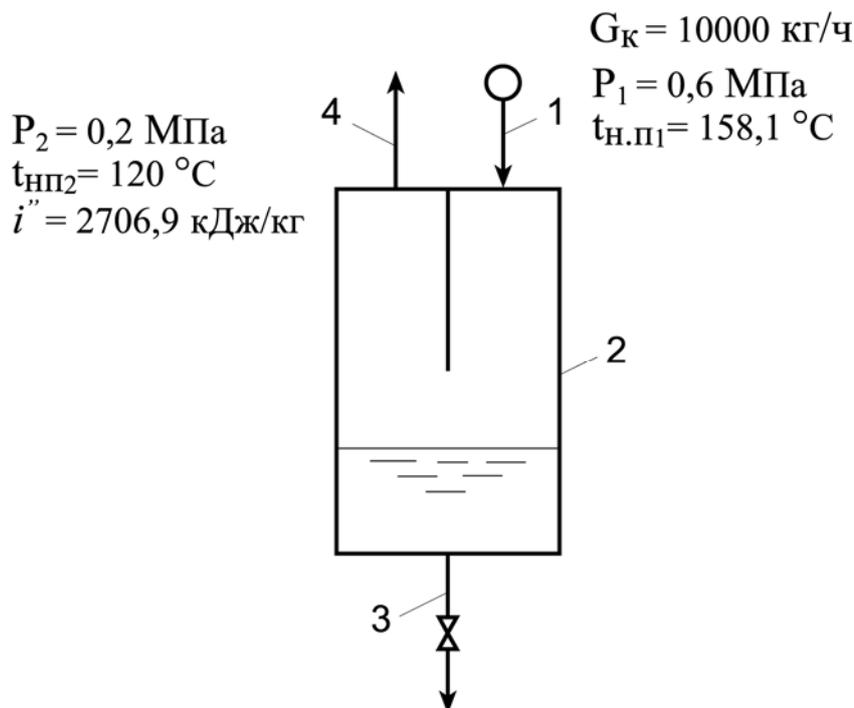


Рис.11. Расчетная схема сепаратора:

- 1 – линия конденсата; 2 – сепаратор; 3 – дренаж;  
4 – пары вскипания

**Исходные данные:**

давление конденсата, поступающего в сепаратор	$P_1 = 0,6 \text{ МПа (6 ата)}$ при $t_{\text{нп1}} = 158,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
давление в сепараторе	$P_2 = 0,2 \text{ МПа (2 ата)}$ при $t_{\text{нп2}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
энтальпия пара	$i'' = 2706,9 \text{ кДж/кг}$ ;
расход конденсата	$G_k = 10000 \text{ кг/ч (2,8 кг/с)}$ .

**Решение**

Количество образующихся водяных паров при снижении давления

$$d = \frac{(t_{\text{н.п1}} - t_{\text{н.п2}}) C_v}{i'' - t_{\text{н.п2}} C_v} = \frac{(158,1 - 120) 4,19}{2706,9 - 120 \cdot 4,19} = 0,072 \frac{\text{кг пара}}{\text{кг конд.}}$$

где  $C_v = 4,19 \text{ кДж/(кг }^\circ\text{C)}$  - теплоемкость воды.

Количество образующегося вторичного пара

$$D_{\text{п}} = G_k d = 10000 \cdot 0,072 = 720 \text{ кг/ч} .$$

### **Задача №12. Расчет замещения природного газа корьевыми отходами**

Определить количество корьевых отходов с влажностью  $W_1 = 60 \%$ ,  $W_2 = 50 \%$ ,  $W_3 = 40 \%$ , которое необходимо сжечь для замены  $1 \text{ м}^3$  природного газа.

**Исходные данные:**

низшая теплота сгорания природного газа	$Q_{i\Gamma}^r = 34360 \text{ кДж/м}^3$ ;
низшая теплота сгорания сухих корьевых отходов	$Q_{i\text{с}}^r = 18680 \text{ кДж/кг}$ ;
теплота парообразования	$r = 2500 \text{ кДж/кг}$ ;
КПД выработки пара:	
на газе	$\eta_1 = 0,92$ ;
на корьевых отходах	$\eta_2 = 0,8$ .

### **Решение**

Низшая теплота сгорания корьевых отходов:

- с влажностью  $W_1 = 60 \%$

$$Q_i^r = \frac{1}{100} [Q_{ic}^r (100 - w_1) - r w_1] = \frac{1}{100} [18680 (100 - 60) - 2500 \cdot 60] = 5972 \text{ кДж / кг};$$

- с влажностью  $W_2 = 50 \%$

$$Q_i^r = \frac{1}{100} [Q_{ic}^r (100 - w_2) - r w_2] = \frac{1}{100} [18680 (100 - 50) - 2500 \cdot 50] = 8090 \text{ кДж / кг};$$

- с влажностью  $W_3 = 40 \%$

$$Q_i^r = \frac{1}{100} [Q_{ic}^r (100 - w_3) - r w_3] = \frac{1}{100} [18680 (100 - 40) - 2500 \cdot 40] = 10208 \text{ кДж / кг}.$$

Расход корьевых отходов для замещения  $1 \text{ м}^3$  природного газа:

- с влажностью  $W_1 = 60 \%$

$$V_{T1} = \frac{Q_{iГ}^r \eta_1}{Q_i^r \eta_2} = \frac{34360 \cdot 0,92}{5972 \cdot 0,8} = 6,6 \frac{\text{кг коры}}{1 \text{ м}^3 \text{ газа}};$$

- с влажностью  $W_2 = 50 \%$

$$V_{T2} = \frac{Q_{iГ}^r \eta_1}{Q_i^r \eta_2} = \frac{34360 \cdot 0,92}{8090 \cdot 0,8} = 4,88 \frac{\text{кг коры}}{1 \text{ м}^3 \text{ газа}};$$

- с влажностью  $W_3 = 40 \%$

$$V_{T3} = \frac{Q_{iГ}^r \eta_1}{Q_i^r \eta_2} = \frac{34360 \cdot 0,92}{10208 \cdot 0,8} = 3,87 \frac{\text{кг коры}}{1 \text{ м}^3 \text{ газа}}.$$

### Задача №13. Расчет «глубокого» охлаждения продуктов сгорания в котельной установке с естественной тягой

Рассчитать экономию природного газа в результате снижения температуры уходящих газов от  $t_1$  до  $t_2$ , если продукты сгорания удаляются под действием естественной тяги. Дымовая труба и экономайзерная поверхность выполнены из антикоррозийного материала (рис. 12).

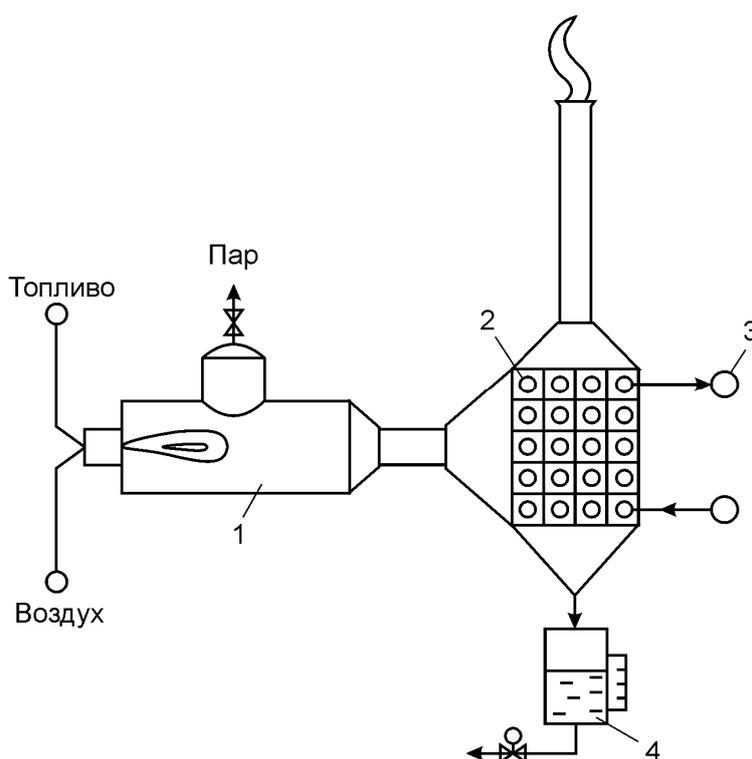


Рис.12. Схема котельной установки для глубокого охлаждения продуктов сгорания при естественной тяге:

1 – котельная установка; 2 – теплофикационный экономайзер; 3 – теплофикационная вода; 4 - конденсат

#### **Исходные данные:**

расход продуктов сгорания  
температура уходящих газов  
без экономайзера  
температура уходящих газов после  
теплофикационного экономайзера  
влажность продуктов сгорания

$$V_{\Gamma} = 2000 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$t_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_3 = 45 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$d_1 = 110 \text{ г/кг.}$$

Построение процессов на I-d-диаграмме (рис. 13):

1. На Id-диаграмму наносится точка 1, соответствующая температуре газов  $t_1=120\text{ }^\circ\text{C}$  и влагосодержанию  $d_1=110\text{ г/кг}$ .
2. Проводится линия процесса 1-2 до пересечения с кривой  $\varphi = 100\%$  (точка 2).
3. Проводится линия 2-3 по  $\varphi = 100\%$  до пересечения с изотермой  $t_3 = 45\text{ }^\circ\text{C}$  (точка 3).

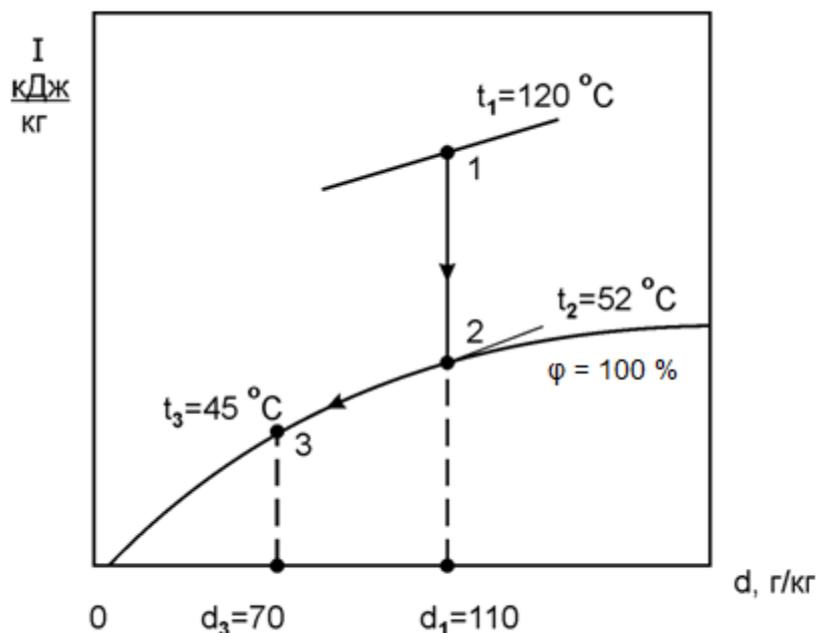


Рис. 13. Процесс изменения состояния продуктов сгорания на Id-диаграмме в котельной установке:  
1-2 - охлаждение продуктов сгорания; 2-3 - конденсация водяных паров с одновременным охлаждением

### Решение

Плотность продуктов сгорания при температуре  $120\text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho_{\Gamma} = \rho_0 \frac{273}{273 + t} = 1,30 \frac{273}{273 + 120} = 0,903 ,$$

где  $\rho_0$  - плотность продуктов сгорания при нормальных условиях,  $\rho_0 = 1,3-1,34\text{ кг/м}^3$ .

Массовый расход продуктов сгорания

$$L_{\Gamma} = V_{\Gamma} \rho_{\Gamma} = 2000 \cdot 0,903 = 1806,1 \text{ кг/ч} .$$

Энтальпия влажных продуктов сгорания при температуре  $t_1 = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и влагосодержании  $d_1 = 110 \text{ г/кг}$

$$I_1 = c t_1 + i'' d_1 \cdot 10^{-3} = 1,76 \cdot 120 + 2493 \cdot 110 \cdot 10^{-3} = 485 \text{ кДж/кг},$$

где  $c$  - теплоемкость трехатомных газов,  $c=1,76 \text{ кДж/кг}$ ;  $i''$  - энтальпия пара, содержащегося в продуктах сгорания,  $i'' = 2493 \text{ кДж/кг}$ ;  $d_1$  - влагосодержание продуктов сгорания (в точке 1),  $d_1 = 110 \text{ г/кг}$ .

Энтальпия влажных продуктов сгорания в точке 2

$$I_2 = c t_2 + i'' d_2 \cdot 10^{-3} = 1,76 \cdot 52 + 2493 \cdot 110 \cdot 10^{-3} = 365,7 \text{ кДж/кг},$$

где  $t_2$  - температура продуктов сгорания в точке 2.

Энтальпия влажных продуктов сгорания в точке 3

$$I_3 = c t_3 + i'' d_3 \cdot 10^{-3} = 1,76 \cdot 45 + 2493 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 253,71 \text{ кДж/кг}.$$

Количество теплоты, выделившееся при охлаждении продуктов сгорания от  $t_1 = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $t_2 = 52 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$Q_{\text{охл}} = L_{\Gamma} (I_1 - I_2) = 1806,1 (485 - 365,7) = 216732 \text{ кДж/ч} .$$

Количество теплоты, выделившееся при конденсации водяных паров от  $d_2 = 110 \text{ г/кг}$  до  $d_3 = 70 \text{ г/кг}$  с одновременным охлаждением продуктов сгорания от  $t_2 = 52 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $t_3 = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$Q_{\text{к}} = L_{\Gamma} (I_2 - I_3) = 1806,1 (365,7 - 253,71) = 202265 \text{ кДж/ч} .$$

Суммарное количество теплоты, выделившееся при охлаждении и конденсации водяных паров продуктов сгорания

$$\Sigma Q = Q_{\text{охл}} + Q_{\text{к}} = 216732 + 202265 = 418997 \text{ кДж/ч} .$$

Экономия природного газа за один час

$$V_{\Gamma} = \frac{\Sigma Q}{Q_1^{\Gamma} \eta_{\text{ка}}} = \frac{418997}{34358 \cdot 0,89} = 13,7 \text{ м}^3/\text{ч} ,$$

где  $Q_1^{\Gamma}$  - низшая теплота сгорания природного газа,  $\text{кДж/м}^3$ ;  $\eta_{\text{ка}}$  - КПД котельного агрегата.

Годовая экономия природного газа

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma} \cdot 23 \cdot 300 = 13,7 \cdot 23 \cdot 300 = 94530 \text{ м}^3/\text{год} ,$$

где 23 – количество часов работы котельной установки в сутки; 300 - количество дней работы котельной установки в году.

Стоимость сэкономленного топлива

$$S_T = V_T \cdot k = 94530 \cdot 4.5 = 425385 \text{ руб/год} ,$$

где  $k = 4,5 \text{ руб/м}^3$  - стоимость  $1 \text{ м}^3$  природного газа.

### Задача №14. Расчет экономии топлива за счет снижения температуры уходящих газов

Рассчитать экономию природного газа за счет снижения температуры уходящих газов в котельном агрегате от  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Схема охлаждения уходящих газов из котла приведена на рис.14.

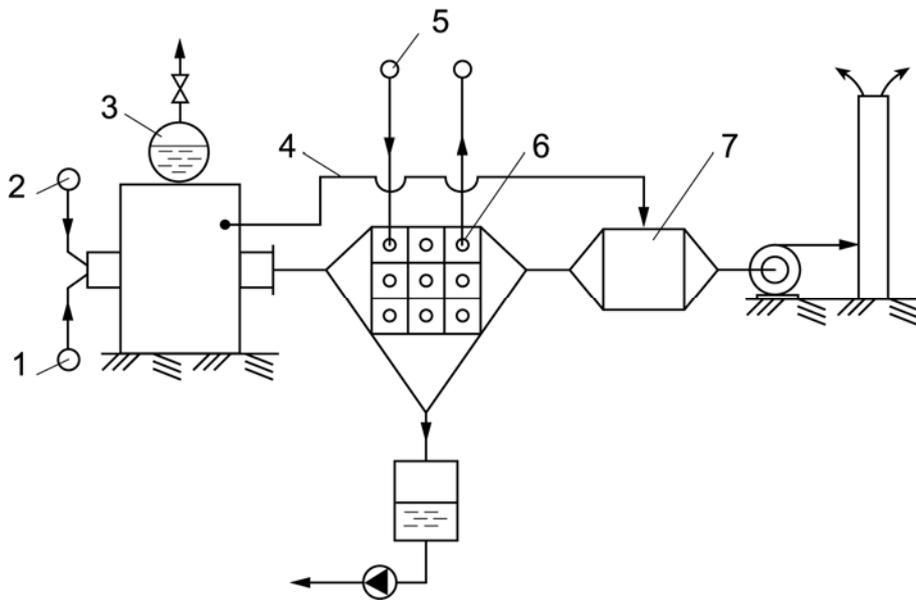


Рис.14. Схема охлаждения уходящих газов из котла:

1 – топливо; 2 – воздух; 3 – котел; 4 – байпасная линия;  
5 – теплофикационная вода; 6 – теплофикационный  
экономайзер; 7 – камера смешения

#### Исходные данные:

котельный агрегат:

$$D_{\text{п}} = 10 \text{ т/ч} , P_{\text{п}} = 1,0 \text{ МПа};$$

пар сухой насыщенный:

$$t_{\text{н.п}} = 179,9 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$i'' = 2777 \text{ кДж/кг},$$

$$v'' = 0,194 \text{ м}^3/\text{кг};$$

температура уходящих газов до реконструкции  $t_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 температура питательной воды  $t_{п.в} = 105 \text{ }^\circ\text{C}$  ;  
 теплота парообразования  $r = 2500 \text{ кДж/кг}$ .

### **Решение**

Расход газообразного топлива

$$B_T = \frac{D_T (i'' - i_{п.в})}{Q_i^r \eta} = \frac{10000 (2777 - 440)}{35615 \cdot 0,92} = 713,2 \text{ м}^3 / \text{ч} ,$$

где  $Q_i^r = 35615 \text{ кДж/м}^3$  - теплота сгорания природного газа;  
 $\eta = 0,92$  - коэффициент полезного действия.

Энтальпия питательной воды

$$i_{пв} = t_{пв} C_{пв} = 105 \cdot 4,19 = 440 \text{ кДж/кг} .$$

Количество образующихся продуктов сгорания:

- теоретическое количество воздуха  $V_B^0 = 9,08 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;
- теоретическое количество сухих продуктов сгорания  $V_{сг}^0 = 8,19 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;
- количество водяных паров  $V_{H_2O} = 2,04 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;
- количество влажных продуктов сгорания  $\Sigma V'_0 = 10,23 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;
- масса сухого газа  $\rho_{сг} = 0,758 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Влагосодержание продуктов сгорания за котлом

$$d_1 = \frac{G_{п}}{G_{сг}} = \frac{V_{H_2O} \rho_{п}}{V_{сг}^0 \rho_{сг}} = \frac{2,04 \cdot 0,58 \cdot 1000}{8,19 \cdot 0,758} = 190 \text{ г / кг} ,$$

где  $\rho_{п} = 1/v''$  - плотность сухого насыщенного пара,  $\text{кг/м}^3$ .

Часовой расход продуктов сгорания природного газа

$$V_{ух} = B_T \Sigma V'_0 = 713,2 \cdot 10,23 = 7296,0 \text{ м}^3/\text{ч} .$$

Принимаем, что половина продуктов сгорания ( $3668 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) проходит через теплофикационный экономайзер, а остальные продукты сгорания направляются по байпасу в камеру смешения.

Энтальпия газов (в точке 2)

$$I_2 = c_T t_T + d_T r \cdot 10^{-3} = 1,25 \cdot 63 + 190 \cdot 2500 \cdot 10^{-3} = 553,7 \text{ кДж/кг} ,$$

где  $C_{\Gamma} = 1,25$  – теплоемкость газов, кДж/(кг °С) ;  $t_{\Gamma}$  - температура газов определяется по I-d диаграмме;  $d_{\Gamma}$  - влагосодержание газов определяется по I-d диаграмме.

Энтальпия газов (в точке 3)

$$I_3 = ct + d r \cdot 10^{-3} = 1,25 \cdot 50 + 50 \cdot 2500 \cdot 10^{-3} = 187,5 \text{ кДж/кг} .$$

Количество теплоты, выделившееся при конденсации водяных паров

$$Q = 0,5 V_{\Gamma} V_{\text{сг}}^0 V_{\text{сг}} \rho_{\text{сг}} (I_2 - I_3) = 0,5 \cdot 713,2 \cdot 8,19 \cdot 0,758 (553,7 - 187,5) = 810686,2 \text{ кДж/ч} .$$

Расход сэкономленного топлива

$$V_{\Gamma}^{\text{э}} = \frac{Q}{Q_{\Gamma}^{\text{r}} \eta} = \frac{810686,2}{35615 \cdot 0,92} = 24,7 \text{ м}^3/\text{ч} , \text{ что составляет } 3,5 \%$$

от начального расхода топлива.

$Q_{\Gamma}^{\text{r}} = 35615 \text{ кДж/м}^3$  - теплота сгорания природного газа;  $\eta = 0,92$  - коэффициент полезного действия.

Годовой экономический эффект

$$\text{Э} = V_{\Gamma}^{\text{э}} \cdot 24 \cdot 360 \cdot k = 24,7 \cdot 24 \cdot 360 \cdot 4,5 = 960336 \text{ руб/год} .$$

где  $k = 4,5 \text{ руб/м}^3$  - стоимость  $1 \text{ м}^3$  природного газа.

Построение процессов изменения состояния продуктов сгорания на I-d диаграмме:

- температуру дымовых газов в точке 4 находят из уравнения теплового баланса камеры смешения

$$L_4 t_4 C_p + L_3 t_3 C_p = (L_4 + L_3) t_1 C_p$$

$$t_4 = t_1 + k (t_1 - t_3) = 120 + 1 \cdot (120 - 50) = 190 \text{ °С} ,$$

где  $k$  - кратность смешения  $k = 0,5-2,0$ .

- на I-d диаграмму наносится точка 1 по известным температуре ( $t_1=120 \text{ °С}$ ) и влагосодержанию ( $d_1=190 \text{ г/кг}$ );
- проводятся процессы 1-2 охлаждения продуктов сгорания в теплофикационном экономайзере и конденсации водяных паров 2-3;
- по температуре дымовых газов за теплофикационным экономайзером (по заданию равна  $50 \text{ °С}$ ) на пересечении с линией  $\phi = 100 \%$  находится точка 3;

- через точки 3 и 1 проводится луч процесса до пересечения с изотермой  $t_4=190\text{ }^\circ\text{C}$ .

На рис.15 показаны процессы изменения продуктов сгорания на I-d диаграмме.

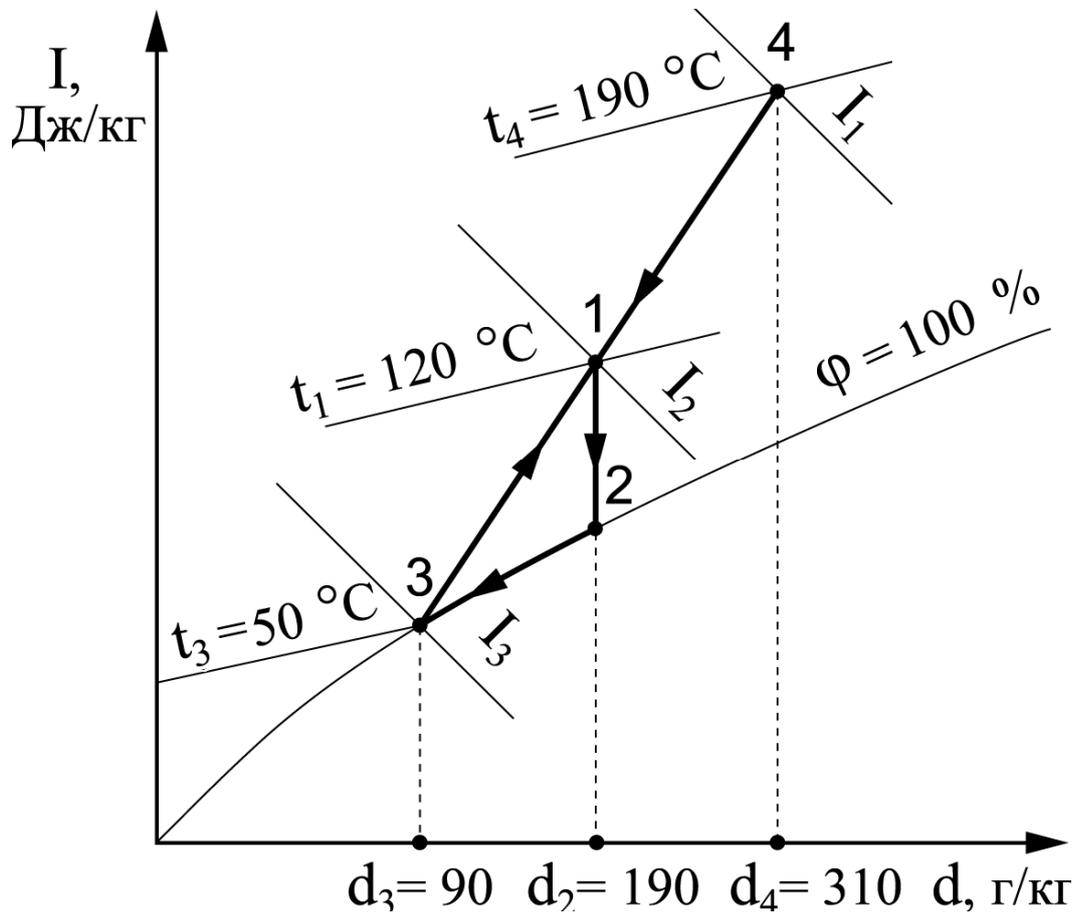


Рис.15. Процессы изменения состояния продуктов сгорания на I-d диаграмме:  
 1-2 - процесс охлаждения продуктов сгорания;  
 2-3 - процесс охлаждения и конденсации водяных паров;  
 3-1-4 - процесс смешения потоков с параметрами в т.3 и 4

### Задача №15. Расчет потерь топлива при истечении пара в окружающую среду

Определить потери теплоты и топлива, если в паропроводе имеется трещина размером  $2 \times 10$  мм, через которую вытекает

перегретый пар. Паропровод находится под давлением 0,6 МПа (6 ата).

### **Решение**

Критическая скорость истечения перегретого пара из щели

$$W_{кр} = \sqrt{2 g v_{кр} P \cdot 10^4 v''} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,546 \cdot 6 \cdot 10^4 \cdot 0,3214} = 456 \text{ м/с} ,$$

где  $v'' = 0,3214$  - удельный объем пара,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $v_{кр}$  - отношение давлений внешней среды к давлению в паропроводе, для перегретого пара  $v_{кр} = 0,546$ .

Площадь щели

$$f = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 .$$

Расход пара через щель

$$D_{п} = \frac{3600 \cdot f W_{кр}}{v''} = \frac{3600 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 456}{0,3214} = 101 \text{ кг/ч} .$$

Расход теплоты через щель

$$Q = D_{п} r = 101 \cdot 2086,0 = 210686,0 \text{ кДж/ч} ,$$

где  $r$  - теплота парообразования,  $r = 2086,0$  кДж/ч.

Расход газообразного топлива

$$B_{т} = \frac{Q}{Q_i^r \eta} = \frac{210686,0}{35615 \cdot 0,92} = 6,4 \text{ м}^3/\text{ч} ,$$

где  $Q_i^r = 35615$  кДж/ $\text{м}^3$  - теплота сгорания природного газа;  $\eta = 0,92$  - коэффициент полезного действия.

Стоимость топлива за год

$$S_{т} = B_{т} \cdot 24 \cdot 360 \cdot k = 6,4 \cdot 24 \cdot 360 \cdot 4,5 = 248832 \text{ руб/год} ,$$

где  $k = 4,5$  руб/ $\text{м}^3$  - стоимость 1  $\text{м}^3$  природного газа.

### **Задача №16. Расчет потерь энергии при дросселировании пара**

Теплотехнологическая установка снабжается паром из паропровода, имеющего давление  $P_1$ . С помощью редукционного

клапана давление снижается до  $P_2$ . Расход пара  $D_{\text{п}} = 10$  т/ч. Определить потерю энергии и топлива в результате дросселирования пара. Схема теплоснабжения теплотехнологической установки с помощью редуцирования пара приведена на рис.16.

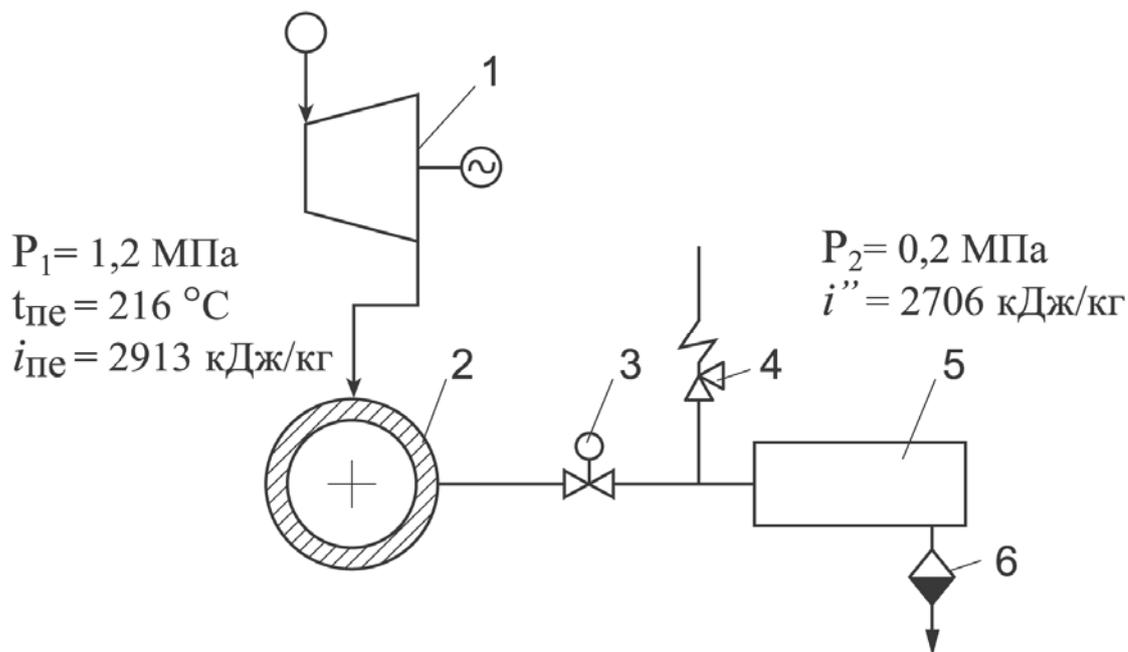


Рис.16. Схема теплоснабжения теплотехнологической установки с помощью редуцирования пара:

1 – паровая турбина; 2 – паропровод; 3 – редуциционный клапан; 4 – предохранительный клапан; 5 – теплотехнологическая установка; 6 – отвод конденсата

### **Исходные данные:**

Параметры пара в паропроводе:

давление

$$P_1 = 1,2 \text{ МПа,}$$

температура пара

$$t_{\text{пе}} = 216 \text{ °С,}$$

энтальпия пара

$$i_{\text{пе}} = 2913 \text{ кДж/кг .}$$

Параметры пара в теплотехнологической установке:

давление пара

$$P_2 = 0,2 \text{ МПа;}$$

энтальпия пара

$$i'' = 2708 \text{ кДж/кг .}$$

### *Решение*

При комбинированной выработке тепловой и электрической энергии расход вырабатываемой электрической энергии составляет

$$\begin{aligned} N_{э} &= \frac{D_{п} (i_{пе} - i'') \eta_{oi} \eta_{м} \eta_{г}}{3600} = \\ &= \frac{10 \cdot 10^3 (2913 - 2708) \cdot 0,8 \cdot 0,95 \cdot 0,99}{3600} = 428 \text{ кВт} \quad , \end{aligned}$$

где  $\eta_{oi}$ ,  $\eta_{м}$ ,  $\eta_{г}$  - КПД соответственно внутренний относительный, механический и генератора.

Перерасход топлива равен

$$V_{т} = \frac{D_{п} (i_{пе} - i'')}{Q_{i}^r \eta_{ка}} = \frac{10 \cdot 10^3 (2913 - 2708)}{34358 \cdot 0,9} = 66,3 \text{ м}^3 / \text{ч} \quad ,$$

где  $Q_{i}^r = 34358 \text{ кДж/м}^3$  - теплота сгорания природного газа;  $\eta_{ка} = 0,9$  - коэффициент полезного действия.

Годовой перерасход топлива

$$V_{т}^r = V_{т} \cdot 24 \cdot 300 = 66,3 \cdot 24 \cdot 300 = 477327 \text{ м}^3 / \text{год} \quad .$$

Годовая недовыработка электрической энергии

$$N_{э}^r = N_{э} \cdot 24 \cdot 300 = 428 \cdot 24 \cdot 300 = 3081600 \text{ кВт} / \text{год} \quad .$$

**Таблица термодинамических свойств воды и пара  
на линии насыщения**

<b>P,</b> атм	<b>P,</b> МПа	<b>t<sub>н</sub>,</b> °C	<b>v',</b> м <sup>3</sup> /кг	<b>v'',</b> м <sup>3</sup> /кг	<b>i'</b> (i <sub>кип</sub> ), кДж/ кг	<b>i''</b> (i <sub>нп</sub> ), кДж/ кг	<b>г,</b> кДж/кг
<b>1,0</b>	<b>0,1</b>	<b>99,63</b>	<b>0,0010434</b>	<b>1,6946</b>	<b>417,51</b>	<b>2675,7</b>	<b>2258,2</b>
2,0	0,2	120,23	0,0010608	0,88592	504,7	2706,9	2202,2
3,0	0,3	133,54	0,0010735	0,60586	561,4	2725,5	2164,1
4,0	0,4	143,62	0,0010839	0,46242	604,7	2738,5	2133,8
5,0	0,5	151,85	0,0010928	0,37481	640,1	2748,5	2108,4
6,0	0,6	158,84	0,0011009	0,31556	670,4	2756,4	2086,0
7,0	0,7	164,96	0,0011082	0,27274	697,1	2762,9	2065,8
8,0	0,8	170,42	0,0011150	0,24030	720,9	2768,4	2047,5
9,0	0,9	175,36	0,0011213	0,21484	742,6	2773,0	2030,4
<b>10,0</b>	<b>1,0</b>	<b>179,88</b>	<b>0,0011274</b>	<b>0,19430</b>	<b>762,6</b>	<b>2777,0</b>	<b>2014,4</b>
11,0	1,1	184,06	0,0011331	0,17739	781,1	2780,4	1999,3
12,0	1,2	187,96	0,0011386	0,16320	798,4	2783,4	1985,0
13,0	1,3	191,60	0,0011438	0,15112	814,7	2786,0	1971,3
14,0	1,4	195,04	0,0011489	0,14072	830,1	2788,4	1958,3
15,0	1,5	198,28	0,0011538	0,13165	844,7	2790,4	1945,7
16,0	1,6	201,37	0,0011586	0,12368	858,6	2792,2	1933,6
17,0	1,7	204,30	0,0011633	0,11661	871,8	2793,8	1922,0
18,0	1,8	207,10	0,0011678	0,11031	884,6	2795,1	1910,5
19,0	1,9	209,79	0,0011722	0,10464	896,8	2796,4	1899,6
<b>20,0</b>	<b>2,0</b>	<b>212,37</b>	<b>0,0011766</b>	<b>0,09953</b>	<b>908,6</b>	<b>2797,4</b>	<b>1888,8</b>
21,0	2,1	214,85	0,0011808	0,09488	919,9	2798,3	1878,4
22,0	2,2	217,24	0,0011850	0,09064	930,9	2799,1	1868,2
23,0	2,3	219,54	0,0011891	0,08676	941,6	2799,8	1858,2
24,0	2,4	221,78	0,0011932	0,08319	951,9	2800,4	1848,5
25,0	2,5	223,94	0,0011972	0,07990	962,0	2800,8	1838,8
26,0	2,6	226,03	0,0012011	0,07685	971,7	2801,2	1829,5
27,0	2,7	228,06	0,0012050	0,07402	981,2	2801,5	1820,3
28,0	2,8	230,04	0,0012088	0,07138	990,5	2801,7	1811,2
29,0	2,9	231,96	0,0012126	0,06892	999,5	2801,8	1802,3
<b>30,0</b>	<b>3,0</b>	<b>233,84</b>	<b>0,0012163</b>	<b>0,06662</b>	<b>1008,4</b>	<b>2801,9</b>	<b>1793,5</b>
31,0	3,1	235,66	0,0012200	0,06446	1017,0	2801,9	1784,9
32,0	3,2	237,44	0,0012237	0,06243	1025,5	2801,8	1776,3
33,0	3,3	239,18	0,0012273	0,06052	1033,7	2801,7	1768,0
34,0	3,4	240,88	0,0012310	0,05872	1041,8	2801,5	1759,7
35,0	3,5	242,54	0,0012345	0,05702	1049,8	2801,3	1751,5
36,0	3,6	244,16	0,0012381	0,05540	1057,6	2801,0	1743,4
37,0	3,7	245,75	0,0012416	0,05388	1065,3	2800,7	1735,4
38,0	3,8	247,31	0,0012451	0,05243	1072,8	2800,3	1727,5
39,0	3,9	248,84	0,0012486	0,05105	1080,2	2799,9	1719,7
<b>40,0</b>	<b>4,0</b>	<b>250,33</b>	<b>0,0012521</b>	<b>0,04974</b>	<b>1087,5</b>	<b>2799,4</b>	<b>1711,9</b>

## **Библиографический список**

1. Бельский, А.П. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: электрон. учеб. пособие / А.П. Бельский, В.Ю. Лакомкин, С.Н. Смородин; СПбГТУРП. – СПб., 2012. – 136 с.
2. Смородин, С.Н. Методы энергосбережения в энергетических, технологических установках и строительстве: учеб. пособие / С.Н. Смородин, В.Н. Белоусов, В.Ю. Лакомкин; СПбГТУРП. – СПб., 2014. – 99 с.
3. Климова, Г.Н. Энергосбережение на промышленных предприятиях: учеб. пособие / Г.Н. Климова; Томск: Томский политехнический университет, 2014. – 180 с.
4. Стрельников, Н.А. Энергосбережение: учебник/ Н.А. Стрельников; Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014. – 174 с.
5. Белоусов, В.Н. Энергосбережение и выбросы парниковых газов (CO<sub>2</sub>): учеб. пособие / В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, В.Ю. Лакомкин; СПбГТУРП. – СПб., 2014. – 52 с.
6. Белоусов, В.Н. Основы энергоаудита объектов. Энергетический паспорт предприятия : учеб. пособие / В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, В.Ю. Лакомкин; СПбГТУРП. – СПб., 2014. – 80 с.
7. Смородин, С.Н. Системы и узлы учета расхода энергоресурсов: учеб. пособие / С.Н. Смородин, В.Н. Белоусов, В.Ю. Лакомкин; СПбГТУРП. – СПб., 2014. – 20 с.

## Содержание

Введение.....	3
Задача №1. Расчет калорифера.....	4
Задача №2. Расчет подогревателя щелока.....	6
Задача №3. Расчет котла-утилизатора .....	9
Задача №4. Расчет паропровода.....	11
Задача №5. Расчет экономии газообразного топлива .....	13
Задача №6. Расчет экономии топлива при сушке бумаги.....	14
Задача №7. Расчет нагревательной печной установки.....	17
Задача №8. Расчет теплового баланса печной установки.....	18
Задача №9. Расчет экономического эффекта от установки теплоуловителя .....	21
Задача №10. Расчет охладителя конденсата .....	22
Задача №11. Расчет сепаратора.....	24
Задача №12. Расчет замещения природного газа корьевыми отходами.....	25
Задача №13. Расчет «глубокого» охлаждения продуктов сгорания в котельной установке с естественной тягой .....	27
Задача №14. Расчет экономии топлива за счет снижения температуры уходящих газов .....	30
Задача №15. Расчет потерь топлива при истечении пара в окружающую среду .....	34
Задача №16. Расчет потерь энергии при дросселировании пара .....	35
Таблица термодинамических свойств воды и пара на линии насыщения.....	37
Библиографический список.....	38

*Учебное издание*

Лакомкин Владимир Юрьевич

Громова Екатерина Николаевна

Сморodin Сергей Николаевич

## **Задачи по энергосбережению**

### **Сборник задач**

Редактор и корректор Т.А. Смирнова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Тем. план 2018 г., поз. 50

---

Подп. к печати . Формат 60x84/16. Бумага тип. №1. Печать офсетная.

Объем 2,75 печ. л.; 2,75 уч.-изд. л. Тираж 100 экз. Изд. № 50. Цена «С». Заказ

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,

Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4