



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Информационные технологии»

В. И. Токочаков

**МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-43 01 05
«Промышленная теплоэнергетика»
дневной и заочной форм обучения
В трех частях
Часть 1**

Гомель 2009

УДК 621.1.016(075.8)
ББК 31.391я73
Т51

*Рекомендовано научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 10 от 25.06.2007 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная теплоэнергетика
и экология» ГГТУ им. П. О. Сухого *М. Н. Новиков*

Токочаков, В. И.

Т51 Моделирование, оптимизация и управление теплотехническими системами : лаб. практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-43 01 05 днев. и заоч. форм обучения : в 3 ч. Ч. 1 / В. И. Токочаков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 32 с. – 41 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит математические модели и примеры расчетов для трех лабораторных работ данного курса при изучении тем «Моделирование установок и станций генерации тепла и пара для теплоснабжения промышленных предприятий» и «Моделирование тепло- и пароиспользующих установок и сетей теплоснабжения».

Для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.1.016(075.8)
ББК 31.391я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

ВВЕДЕНИЕ

Практикум содержит математические модели теплоиспользующих и теплогенерирующих установок, выполнение которых позволит получить студентам практические навыки работы с современными тепловыми схемами крупных агрегатов. Во время выполнения лабораторных работ студенты повысят свой уровень логического мышления при разработке алгоритмов расчета теплотехнических систем.

Обязательным условием защиты лабораторных и контрольных работ является наличие тепловой баланса установки с указанием приходной и расходной частей баланса.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЗЕРНОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

1.1. Моделирование работы зерносушильных установок, работающих на твердом и жидком топливе

Исходными данными для моделирования являются:

- w_n – влажность зерна до сушки, %;
- w_k – влажность зерна после сушки, %;
- t_0 – температура атмосферного воздуха, °С;
- φ_0 – влажность атмосферного воздуха, %;
- вид топлива и его элементарный состав: C^p , H^p , O^p , S^p , W^p , A^p ;
- Q_n^p – низшая теплотворная способность топлива, ккал/кг;
- F – площадь поверхности сушильной камеры, m^2 ;
- f , $f_{из}$ – толщина конструкционной оболочки сушильной камеры и изоляции, м;
- $G_ч$ – производительность сушилки, кг/ч;
- λ , $\lambda_{из}$ – теплопроводность материала оболочки сушильной камеры и изоляции, ккал/(м·ч·°С);
- t_1 – температура теплоносителя на входе в сушильную камеру, °С;
- $t_{доп}$ – допустимая температура нагрева зерна, °С.

Влагосодержание атмосферного воздуха на входе в топку d_0 определяется по t_0 и влажности φ_0 атмосферного воздуха по табл. П.1.

Теплосодержание атмосферного воздуха:

$$h_0 = c_{св} \cdot t_0 + d_0 \cdot (595 + 0,47 \cdot t_0) \cdot 0,001, \text{ ккал/кг}, (1.1)$$

где $c_{св}$ – теплоемкость сухого воздуха, равна 0,24 ккал/(кг · °С);

Количество сухого воздуха для полного сгорания 1 кг топлива:

$$L_0 = 0,115 \cdot C^P + 0,345 \cdot H^P - 0,043 \cdot (O^P - S^P), \text{ кг/кг}. (1.2)$$

Теплосодержание водяного пара при t_1 :

$$h_{п} = 595 + 0,47 \cdot t_1, \text{ ккал/кг}, (3)$$

Коэффициент избытка воздуха для твердого и жидкого топлива определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{Q_H^P \cdot \eta_T + c_T \cdot t_T - h_{п} (9 \cdot H^P + W^P) \cdot 0,01}{L_0 \cdot (d_0 \cdot h_{п} \cdot 0,001 + c_{тн} \cdot t_1 - h_0)}, \text{ о.е.}, (1.3)$$

где η_T – коэффициент полезного действия топки, принимается равным для высококалорийных видов топлива в интервале 0,92 ÷ 0,96, для среднекалорийных – 0,85 ÷ 0,92, для низкокалорийных – 0,7 ÷ 0,85; c_T – удельная теплоемкость топлива, ккал/(кг · °С); $c_{тн}$ – удельная теплоемкость теплоносителя, принимается как для воздуха, t_T – температура топлива, принимается равной t_0 .

Влагосодержание теплоносителя на входе в камеру:

$$d_1 = \frac{10 \cdot (9 \cdot H^P + W^P) + \alpha \cdot L_0 \cdot d_0}{1 - 0,01(9 \cdot H^P + W^P + A^P) + \alpha L_0}, \text{ г/кг}. (1.4)$$

Теплосодержание теплоносителя на входе в камеру h_1 определяется по формуле (1.1) при температуре t_1 .

Общий коэффициент теплопередачи через стенки сушильной камеры определяется по формуле:

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{f}{\lambda} + \frac{f_{уз}}{\lambda_{уз}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С}), (1.5)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от нагретого газа к стенке сушилки, принимается равным 6,02 ккал/(м² · ч · °С) [0]; α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки сушилки в окружающую среду, принимается равным 5,34 ккал/(м² · ч · °С).

Количество испаренной влаги в течении часа:

$$W_{ч} = G_{ч} \frac{W_H - W_K}{100 - W_K}, \text{ кг/ч}. (1.6)$$

Удельные потери теплоты в окружающую среду на 1 кг испаренной влаги определяются по формуле:

$$q_{oc} = \frac{F \cdot K \cdot (t_{cp} - t_0)}{W_{\text{ч}}}, \text{ ккал/кг, (1.7)}$$

где t_{cp} – средняя температура теплоносителя, определяется по формуле:

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_{\text{доп}}}{2}, \text{ } ^\circ\text{C. (1.8)}$$

Удельная теплоемкость зерна на выходе из сушильной камеры определяется по формуле:

$$c'_3 = \frac{(100 - w_k) \cdot c_3 + w_k \cdot c_{\text{вл}}}{100}, \text{ ккал/(кг} \cdot \text{ } ^\circ\text{C), (1.9)}$$

где c_3 – удельная теплоемкость сухого зерна, равна 0,37 ккал/(кг · °C);
 $c_{\text{вл}}$ – удельная теплоемкость влаги, равна 1 ккал/(кг · °C).

Удельные потери теплоты с нагретым зерном на 1 кг испаренной влаги определяются по формуле:

$$q_3 = \frac{G_{\text{ч}} \cdot c'_3 \cdot (t_{\text{доп}} - t_0)}{W_{\text{ч}}}, \text{ ккал/кг. (1.10)}$$

Разность поступлений и потерь теплоты в зоне сушильной камеры определяется по формуле:

$$\delta = c_{\text{вл}} \cdot t_1 - q_{oc} - q_3, \text{ ккал/кг. (1.11)}$$

Влагосодержание теплоносителя на выходе из сушильной камеры рассчитывается по формуле:

$$d_2 = \frac{1000 \cdot (c_{\text{св}} \cdot t_{\text{доп}} - h_1) + \delta \cdot d_1}{\delta - (595 + 0,47 \cdot t_{\text{доп}})}, \text{ г/кг. (1.12)}$$

Расход теплоносителя на 1 кг испаренной влаги:

$$g = \frac{1000}{d_2 - d_1}, \text{ кг/кг. (1.13)}$$

Удельный расход теплоты на испарение 1 кг влаги:

$$q_v = g \cdot (h_1 - h_0), \text{ ккал/кг. (1.14)}$$

Удельный расход условного топлива на сушку зерна рассчитывается по формуле:

$$H_{\text{сз}}^y = \frac{q_v \cdot (w_n - w_k)}{7 \cdot \eta_t \cdot (100 - w_n)}, \text{ кг у.т./т. (1.15)}$$

Удельный расход натурального топлива на сушку зерна рассчитывается по формуле:

$$H_{\text{сз}}^n = H_{\text{сз}}^y \frac{7000}{Q_n^p}, \text{ кг/т. (1.16)}$$

Часовой расход теплоты на испарение влаги равен:

$$Q_{\text{исп}} = W_{\text{ч}} \cdot q_{\text{в}} \cdot 0,001, \text{ Мкал/ч. (1.17)}$$

Часовые потери теплоты в окружающую среду равны:

$$Q_{\text{ос}} = W_{\text{ч}} \cdot q_{\text{ос}} \cdot 0,001, \text{ Мкал/ч. (1.18)}$$

Часовые потери теплоты с нагретым зерном равны:

$$Q_{\text{з}} = W_{\text{ч}} \cdot q_{\text{з}} \cdot 0,001, \text{ Мкал/ч. (1.19)}$$

Мощность сушильной установки определяется по формуле:

$$Q = 7 \cdot G_{\text{ч}} \cdot H_{\text{сз}}^y \left(0,001 + \frac{c_{\text{т}}}{Q_{\text{н}}^p} \right), \text{ Мкал/ч. (1.20)}$$

Пример. Произведем расчет сушки продовольственного зерна в барабанной сушилке типа СЗСБ-8,0А, работающей на дизельном топливе.

Исходными данными для расчета являются:

- $w_{\text{н}} = 21 \%$ – влажность зерна до сушки;
- $w_{\text{к}} = 14 \%$ – влажность зерна после сушки;
- $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура атмосферного воздуха;
- $\varphi_0 = 75 \%$ – влажность атмосферного воздуха;
- элементарный состав дизельного топлива: $C^p = 84,2\%$, $H^p = 13,3\%$, $O^p = 0$, $S^p = 0,3\%$, $W^p = 2\%$, $A^p = 0,1\%$;
- $Q_{\text{н}}^p = 10150 \text{ ккал/кг}$ – низшая теплотворная способность дизельного топлива;
- $F = 47,23 \text{ м}^2$ – площадь поверхности сушильной камеры;
- $f = 0,0025 \text{ м}$ – толщина конструкционной оболочки сушильной камеры;
- $G_{\text{ч}} = 8000 \text{ кг/ч}$ – производительность сушилки;
- $\lambda = 50 \text{ ккал/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{ }^\circ\text{C)}$ – теплопроводность материала оболочки сушильной камеры;
- $t_1 = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура теплоносителя на входе в сушильную камеру;
- $t_{\text{доп}} = 52 \text{ }^\circ\text{C}$ – допустимая температура нагрева зерна.

Влагосодержание атмосферного воздуха на входе в топку d_0 определяется по t_0 и влажности φ_0 атмосферного воздуха по табл. П1 $d_0 = 8,11 \text{ г/кг}$.

Теплосодержание атмосферного воздуха:

$$h_0 = 0,24 \cdot 15 + 8,11 \cdot (595 + 0,47 \cdot 15) \cdot 0,001 = 8,48, \text{ ккал/кг.}$$

Количество сухого воздуха для полного сгорания 1 кг топлива:

$$L_0 = 0,115 \cdot 84,2 + 0,345 \cdot 13,3 - 0,043 \cdot (0 - 0,3) = 14,3, \text{ кг/кг.}$$

Теплосодержание водяного пара при t_1 :

$$h_{\text{п}} = 595 + 0,47 \cdot 130 = 656, \text{ ккал/кг.}$$

Коэффициент избытка воздуха для твердого и жидкого топлива определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{10150 \cdot 0,95 + 0,5 \cdot 15 - 656(9 \cdot 13,3 + 2) \cdot 0,01}{14,3 \cdot (8,11 \cdot 656 \cdot 0,001 + 0,24 \cdot 130 - 8,48)} = 22,1, \text{ о.е.,}$$

где $\eta_T = 0,95$ – коэффициент полезного действия топки;

$c_T = 0,5$ ккал/(кг · °С) – удельная теплоемкость топлива;

$c_{\text{тн}} = 0,24$ ккал/(кг · °С) – удельная теплоемкость теплоносителя;

$t_T = 15$ °С – температура топлива.

Влагосодержание теплоносителя на входе в камеру:

$$d_1 = \frac{10 \cdot (9 \cdot 13,3 + 2) + 22,1 \cdot 14,3 \cdot 8,11}{1 - 0,01(9 \cdot 13,3 + 2 + 0,1) + 22,1 \cdot 14,3} = 12,0, \text{ г/кг.}$$

Общий коэффициент теплопередачи через стенки сушильной камеры определяется по формуле:

$$K = \left(\frac{1}{6,02} + \frac{0,0025}{50} + \frac{1}{5,34} \right)^{-1} = 2,83, \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С).}$$

Количество испаренной влаги в течении часа:

$$W_{\text{ч}} = 8000 \frac{21 - 14}{100 - 14} = 651, \text{ кг/ч.}$$

Средняя температура теплоносителя:

$$t_{\text{ср}} = \frac{130 + 52}{2} = 91, \text{ °С.}$$

Удельные потери теплоты в окружающую среду на 1 кг испаренной влаги определяются по формуле:

$$q_{\text{ос}} = \frac{47,23 \cdot 2,83 \cdot (91 - 15)}{651} = 15,6, \text{ ккал/кг.}$$

Удельная теплоемкость зерна на выходе из сушильной камеры определяется по формуле:

$$c'_3 = \frac{(100 - 14) \cdot 0,37 + 14 \cdot 1}{100} = 0,46, \text{ ккал/(кг} \cdot \text{°С).}$$

Удельные потери теплоты с нагретым зерном на 1 кг испаренной влаги определяются по формуле:

$$q_3 = \frac{8000 \cdot 0,46 \cdot (52 - 15)}{651} = 208,3, \text{ ккал/кг.}$$

Разность поступлений и потерь теплоты в зоне сушильной камеры определяется по формуле:

$$\delta = 1 \cdot 130 - 15,6 - 208,3 = -93,9, \text{ ккал/кг.}$$

Теплосодержание теплоносителя на входе сушильной камеры:

$$h_1 = 0,24 \cdot 130 + 12,0 \cdot (595 + 0,47 \cdot 130) \cdot 0,001 = 39,1, \text{ ккал/кг.}$$

Влагосодержание теплоносителя на выходе из сушильной камеры рассчитывается по формуле:

$$d_2 = \frac{1000 \cdot (0,24 \cdot 52 - 39,1) - 93,9 \cdot 12,0}{-93,9 - (595 + 0,47 \cdot 52)} = 38,8, \text{ г/кг.}$$

Расход теплоносителя на 1 кг испаренной влаги:

$$g = \frac{1000}{38,8 - 12,0} = 37,2, \text{ кг/кг.}$$

Удельный расход теплоты на испарение 1 кг влаги:

$$q_v = 37,2 \cdot (39,1 - 8,48) = 1138, \text{ ккал/кг.}$$

Удельный расход условного топлива на сушку зерна рассчитывается по формуле:

$$H_{сз}^y = \frac{1138 \cdot (21 - 14)}{7 \cdot 0,95 \cdot (100 - 21)} = 15,2, \text{ кг у.т./т.}$$

Удельный расход натурального топлива на сушку зерна рассчитывается по формуле:

$$H_{сз}^n = 15,2 \cdot \frac{7000}{10150} = 10,5, \text{ кг/т.}$$

Часовой расход теплоты на испарение влаги равен:

$$Q_{исп} = 651 \cdot 1138 \cdot 0,001 = 740,8, \text{ Мкал/ч.}$$

Часовые потери теплоты в окружающую среду равны:

$$Q_{oc} = 651 \cdot 15,6 \cdot 0,001 = 10,2, \text{ Мкал/ч.}$$

Часовые потери теплоты с нагретым зерном равны:

$$Q_3 = 651 \cdot 208,3 \cdot 0,001 = 135,6, \text{ Мкал/ч.}$$

Мощность сушильной установки определяется по формуле:

$$Q = 7 \cdot 8000 \cdot 15,3 \left(0,001 + \frac{0,5}{10150} \right) = 893,1, \text{ Мкал/ч.}$$

1.2. Моделирование работы зерносушильных установок, работающих на газообразном топливе

Исходными данными для моделирования являются:

- w_n – влажность зерна до сушки, %;

- w_k – влажность зерна после сушки, %;
- t_0 – температура атмосферного воздуха, °С;
- φ_0 – влажность атмосферного воздуха, %;
- вид топлива и его элементарный состав: CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , H_2S , CO_2 ;
- Q_H^p – низшая теплотворная способность топлива, ккал/кг;
- F – площадь поверхности сушильной камеры, м^2 ;
- f , $f_{из}$ – толщина конструкционной оболочки сушильной камеры и изоляции, м;
- G_q – производительность сушилки, кг/ч;
- λ , $\lambda_{из}$ – теплопроводность материала оболочки сушильной камеры и изоляции, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$;
- t_1 – температура теплоносителя на входе в сушильную камеру, °С;
- $t_{доп}$ – допустимая температура нагрева зерна, °С.

Влагосодержание атмосферного воздуха на входе в топку d_0 определяется по t_0 и влажности φ_0 атмосферного воздуха по табл. П.1.

Теплосодержание атмосферного воздуха определяется по формуле (1).

Количество сухого воздуха для полного сгорания 1 кг топлива:

$$L_0 = 1,38 \left[\sum \left(C_m H_n \frac{m + 0,25n}{12m + n} \right) + 0,0179\text{CO} + 0,248\text{H}_2 + 0,44\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2 \right],$$

кг/кг. (1.21)

Коэффициент избытка воздуха для газообразного топлива определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{Q_H^p \cdot z_T + c_T \cdot t_T - h_{п} \sum \left(C_m H_n \frac{0,09n}{12m + n} \right)}{V_0 \cdot (d_0 \cdot h_{п} \cdot 0,001 + c_{тн} \cdot t_1 - h_0)}, \text{ о.е. (1.22)}$$

Влагосодержание теплоносителя на входе в сушильную камеру определяется по формуле:

$$d_1 = \frac{\sum \left(C_m H_n \frac{90n}{12m + n} \right) + \alpha \cdot L_0 \cdot d_0}{1 - \sum \left(C_m H_n \frac{0,09n}{12m + n} \right) + \alpha L_0}, \text{ г/кг. (1.23)}$$

Общий коэффициент теплопередачи через стенки сушильной камеры определяется по формуле (1.5).

Количество испаренной влаги в течении часа определяется по формуле (1.6).

Удельные потери теплоты в окружающую среду на 1 кг испаренной влаги определяются по формуле (1.7).

Удельные потери теплоты с нагретым зерном на 1 кг испаренной влаги определяются по формуле (1.10).

Разность поступлений и потерь теплоты в зоне сушильной камеры определяется по формуле (1.11).

Влагосодержание теплоносителя на выходе из сушильной камеры рассчитывается по формуле (1.12).

Расход теплоносителя на 1 кг испаренной влаги определяется по формуле (1.13).

Удельный расход теплоты на испарение 1 кг влаги определяется по формуле (1.14).

Удельный расход условного топлива на сушку зерна рассчитывается по формуле (1.15).

Удельный расход натурального топлива на сушку зерна рассчитывается по формуле (1.16).

Часовой расход теплоты на испарение влаги, потери теплоты в окружающую среду и потери теплоты с нагретым зерном определяются по формулам (1.17-1.19).

Мощность сушильной установки определяется по формуле (1.20).

Пример. Произведем расчет сушки продовольственного зерна в барабанной сушилке типа СЗСБ-8,0А, работающей на природном газе.

Исходными данными для расчета являются:

- $w_n = 21 \%$ – влажность зерна до сушки;
- $w_k = 14 \%$ – влажность зерна после сушки;
- $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура атмосферного воздуха;
- $\varphi_0 = 75 \%$ – влажность атмосферного воздуха;
- элементарный состав природного газа: $\text{CH}_4 = 92,8 \%$, $\text{C}_2\text{H}_6 = 3,9 \%$, $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,1\%$, $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,4 \%$, $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1 \%$, $\text{N}_2 = 1,6 \%$, $\text{CO}_2 = 0,1\%$;
- $Q_n^p = 8050$ ккал/кг – низшая теплотворная способность природного газа;
- $F = 47,23 \text{ м}^2$ – площадь поверхности сушильной камеры;
- $f = 0,0025 \text{ м}$ – толщина конструкционной оболочки сушильной камеры;
- $G_{\text{ч}} = 8000$ кг/ч – производительность сушилки;

- $\lambda = 50$ ккал/(м·ч·°С) – теплопроводность материала оболочки сушильной камеры;
- $t_1 = 130$ °С – температура теплоносителя на входе в сушильную камеру;
- $t_{\text{доп}} = 52$ °С – допустимая температура нагрева зерна.

Влагосодержание атмосферного воздуха на входе в топку d_0 определяется по t_0 и влажности φ_0 атмосферного воздуха по табл. П1 $d_0 = 8,11$ г/кг.

Теплосодержание атмосферного воздуха:

$$h_0 = 0,24 \cdot 15 + 8,11 \cdot (595 + 0,47 \cdot 15) \cdot 0,001 = 8,48, \text{ ккал/кг.}$$

Количество сухого воздуха для полного сгорания 1 кг топлива:

$$L_0 = 1,38 \cdot 92,8 \frac{1 + 0,25 \cdot 4}{12 \cdot 1 + 4} + 1,38 \cdot 3,9 \frac{2 + 0,25 \cdot 6}{12 \cdot 2 + 6} + 1,38 \cdot 1,1 \frac{3 + 0,25 \cdot 8}{12 \cdot 3 + 8} + 1,38 \cdot 0,4 \frac{4 + 0,25 \cdot 10}{12 \cdot 4 + 10} + 1,38 \cdot 0,1 \frac{5 + 0,25 \cdot 12}{12 \cdot 5 + 12} = 16,9, \text{ кг/кг.}$$

Теплосодержание водяного пара при t_1 :

$$h_{\text{п}} = 595 + 0,47 \cdot 130 = 656, \text{ ккал/кг.}$$

Коэффициент избытка воздуха для газообразного топлива определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{8050 \cdot 0,95 + 0,37 \cdot 15}{16,9 \cdot (8,11 \cdot 656 \cdot 0,001 + 0,24 \cdot 130 - 8,48)} - \frac{656 \cdot 9 \left(\frac{92,8 \cdot 4}{12 \cdot 1 + 4} + \frac{3,9 \cdot 6}{12 \cdot 2 + 6} + \frac{1,1 \cdot 8}{12 \cdot 3 + 8} + \frac{0,4 \cdot 10}{12 \cdot 4 + 10} + \frac{0,1 \cdot 12}{12 \cdot 5 + 12} \right)}{16,9 \cdot (8,11 \cdot 656 \cdot 0,001 + 0,24 \cdot 130 - 8,48)} =$$

$$= 13,1, \text{ о.е.}$$

где $\eta_{\text{T}} = 0,95$ – коэффициент полезного действия топки;

$c_{\text{T}} = 0,37$ ккал/(кг·°С) – удельная теплоемкость природного газа;

$c_{\text{тн}} = 0,24$ ккал/(кг·°С) – удельная теплоемкость теплоносителя;

$t_{\text{T}} = 15$ °С – температура топлива.

Влагосодержание теплоносителя на входе в камеру:

$$d_1 = \frac{\left(\frac{92,8 \cdot 4 \cdot 90}{12 \cdot 1 + 4} + \frac{3,9 \cdot 6 \cdot 90}{12 \cdot 2 + 6} + \frac{1,1 \cdot 8 \cdot 90}{12 \cdot 3 + 8} + \frac{0,4 \cdot 10 \cdot 90}{12 \cdot 4 + 10} + \frac{0,1 \cdot 12 \cdot 90}{12 \cdot 5 + 12} \right) + 13,1 \cdot 16,9 \cdot 8,11}{1 - \frac{9}{100} \left(\frac{92,8 \cdot 4}{12 \cdot 1 + 4} + \frac{3,9 \cdot 6}{12 \cdot 2 + 6} + \frac{1,1 \cdot 8}{12 \cdot 3 + 8} + \frac{0,4 \cdot 10}{12 \cdot 4 + 10} + \frac{0,1 \cdot 12}{12 \cdot 5 + 12} \right) + 13,1 \cdot 16,9} = 18,1, \text{ г/кг.}$$

Общий коэффициент теплопередачи через стенки сушильной камеры определяется по формуле:

$$K = \left(\frac{1}{6,02} + \frac{0,0025}{50} + \frac{1}{5,34} \right)^{-1} = 2,83, \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Количество испаренной влаги в течении часа:

$$W_{\text{ч}} = 8000 \frac{21-14}{100-14} = 651, \text{ кг/ч.}$$

Средняя температура теплоносителя:

$$t_{\text{ср}} = \frac{130+52}{2} = 91, ^\circ\text{C}.$$

Удельные потери теплоты в окружающую среду на 1 кг испаренной влаги определяются по формуле:

$$q_{\text{ос}} = \frac{47,23 \cdot 2,83 \cdot (91-15)}{651} = 15,6, \text{ ккал/кг.}$$

Удельная теплоемкость зерна на выходе из сушильной камеры определяется по формуле:

$$c'_3 = \frac{(100-14) \cdot 0,37 + 14 \cdot 1}{100} = 0,46, \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Удельные потери теплоты с нагретым зерном на 1 кг испаренной влаги определяются по формуле:

$$q_3 = \frac{8000 \cdot 0,46 \cdot (52-15)}{651} = 208,3, \text{ ккал/кг.}$$

Разность поступлений и потерь теплоты в зоне сушильной камеры определяется по формуле:

$$\delta = 1 \cdot 130 - 15,6 - 208,3 = -93,9, \text{ ккал/кг.}$$

Теплосодержание теплоносителя на входе сушильной камеры:

$$h_1 = 0,24 \cdot 130 + 18,1 \cdot (595 + 0,47 \cdot 130) \cdot 0,001 = 43,0, \text{ ккал/кг.}$$

Влагосодержание теплоносителя на выходе из сушильной камеры рассчитывается по формуле:

$$d_2 = \frac{1000 \cdot (0,24 \cdot 52 - 43,0) - 93,9 \cdot 18,1}{-93,9 - (595 + 0,47 \cdot 52)} = 45,2, \text{ г/кг.}$$

Расход теплоносителя на 1 кг испаренной влаги:

$$g = \frac{1000}{45,2 - 18,1} = 36,8, \text{ кг/кг.}$$

Удельный расход теплоты на испарение 1 кг влаги:

$$q_{\text{в}} = 36,8 \cdot (43,0 - 8,48) = 1270, \text{ ккал/кг.}$$

Удельный расход условного топлива на сушку зерна рассчитывается по формуле:

$$H_{сз}^y = \frac{1270 \cdot (21 - 14)}{7 \cdot 0,95 \cdot (100 - 21)} = 16,9, \text{ кг у.т./т.}$$

Удельный расход натурального топлива на сушку зерна рассчитывается по формуле:

$$H_{сз}^н = 16,9 \frac{7000}{8050} = 14,7, \text{ м}^3/\text{т.}$$

Часовой расход теплоты на испарение влаги равен:

$$Q_{исп} = 651 \cdot 1270 \cdot 0,001 = 826,8, \text{ Мкал/ч.}$$

Часовые потери теплоты в окружающую среду равны:

$$Q_{ос} = 651 \cdot 15,6 \cdot 0,001 = 10,1, \text{ Мкал/ч.}$$

Часовые потери теплоты с нагретым зерном равны:

$$Q_з = 651 \cdot 208,3 \cdot 0,001 = 135,6, \text{ Мкал/ч.}$$

Мощность сушильной установки определяется по формуле:

$$Q = 7 \cdot 8000 \cdot 16,9 \left(0,001 + \frac{0,37}{8050} \right) = 990,0, \text{ Мкал/ч.}$$

Контрольные вопросы

1. Какие параметры окружающей среды влияют на экономичность работы сушилки?
2. К чему приводит мягкие режимы сушки зерна?
3. Какие технические мероприятия применяются на действующих зерновых сушилках для повышения КПД процесса сушки?
4. Как влажность атмосферного воздуха влияет на значение удельного расхода условного топлива на сушку зерна?
5. Сделайте оценку эффективности сжигания местных видов топлива для сушки зерна.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ТОПЛИВОПОТРЕБЛЯЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Топливный баланс предприятия разрабатывается на основании индивидуальных балансов отдельных топливопотребляющих установок. Он характеризует состояние поступления топлива всех видов и его использования на предприятии. Для удобства сопоставления величин каждый вид топлива переводится в условное топливо.

Приходная часть баланса показывает поступление видов топлива на предприятие с указанием источников. В расходной части баланса дается структура и объемы потребления топлива по основным направлениям использования.

Данные о расходе топлива по отдельным топливоиспользующим агрегатам суммируются для определения потребления отдельными процессами. Использование топлива отдельными процессами суммируется для получения потребления цеха, производства или объединения.

При группировке расхода топлива по процессам следует выделить потребление топлива:

- теплогенерирующими установками;
- электрогенерирующими установками;
- технологическими установками и агрегатами;
- на силовые нужды;
- транспортом.

Кроме того выделяется потери топлива при хранении и транспорте, а также отпуск топлива на сторону.

Определение расхода топлива должно базироваться на данных коммерческого учета и только в исключительных случаях по установленной мощности.

К топливопотребляющим установкам относятся:

- промышленные и отопительные котельные;
- различные печи, сушилки, теплогенераторы;
- двигатели, работающие на топливе;
- дизельные и газовые электростанции.

Энергетический баланс топливопотребляющего оборудования за рассматриваемый период устанавливает равенство между приходом и расходом теплоты:

$$Q_{\text{хт}} + Q_{\text{физ}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{ух}} + Q_{\text{хн}} + Q_{\text{мн}} + Q_{\text{окр}} + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{изд}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{н.п.}}, \quad (2.1)$$

где $Q_{\text{хт}}$ – химическая теплота горения топлива;

$Q_{\text{физ}}$ – теплота, вносимая в агрегат топливом, воздухом горения, различными технологическими компонентами;

$Q_{\text{пол}}$ – теплота, затраченная на нагрев технологических материалов или изделий, на испарение влаги, проведение эндотермических реакций;

$Q_{\text{ух}}$ – потери теплоты с уходящими газами;

$Q_{\text{хн}}$ – потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива;

$Q_{\text{мн}}$ – потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива при сжигании твердого топлива;

$Q_{\text{окр}}$ – потери теплоты в окружающую среду;

$Q_{\text{шл}}$ – потери теплоты со шлаком;

$Q_{\text{изд}}$ – потери теплоты с изделиями и техническими отходами;

$Q_{\text{изл}}$ – потери теплоты излучением через открытые окна;

$Q_{\text{тр}}$ – потери теплоты на нагрев транспортных средств;

$Q_{\text{охл}}$ – потери теплоты с охлаждающей водой;

$Q_{\text{нп}}$ – неучтенные потери теплоты.

Приход теплоты

Химическая теплота горения топлива определяется по формуле:

$$Q_{\text{хт}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot V_{\text{т}}, \text{ ккал/период, (2.2)}$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая рабочая теплота сгорания топлива, ккал/кг ; $V_{\text{т}}$ – расход топлива, кг/период.

Физическая теплота топлива и компонентов, вносимая в агрегат определяется по формуле:

$$Q_{\text{физ}} = \sum_i [c_i t_i G_i], \text{ ккал/период, (2.3)}$$

где c_i – удельная теплоемкость i -го компонента, ккал/(кг · °С); t_i – температура, с которой i -й компонент поступает в агрегат, °С; G_i – количество i -го компонента, кг/период.

Расход теплоты

Теплота, затраченная на нагрев технологических материалов или изделий, на испарение влаги, проведение эндотермических реакций определяется по формуле:

$$Q_{\text{пол}} = \sum_i [c_i \Delta t_i G_i] + \sum_i [r_i G_i] + \sum_k [\Delta H_k G_k] - \sum_j [\Delta H_j G_j], \text{ ккал/период, (2.4)}$$

где c_i – удельная теплоемкость i -го компонента, ккал/(кг · °С);

Δt_i – температура нагрева i -го компонента, °С;

G_i – расход i -го компонента, кг/период;

ΔH_j – теплота образования исходного j -го компонента, ккал/кг;

G_j – расход исходного j -го компонента, кг/период;

ΔH_k – теплота образования k -го продукта реакции, ккал/кг,

G_k – расход k -го продукта реакции, кг/период.

Потери теплоты с уходящими газами определяются по формуле:

$$Q_{yx} = V_{yx} c_{yx} t_{yx} V_T, \text{ ккал/период, (2.5)}$$

где V_{yx} – объем уходящих газов, м³/кг топлива;

c_{yx} – теплоемкость уходящих газов, ккал/(м³·°С), определяется по справочным данным в зависимости от вида топлива;

t_{yx} – температура уходящих газов, °С.

Потери теплоты от химического недожога принимаются равными нулю.

$$Q_{xn} = 0.$$

Потери теплоты от механического недожога твердого топлива определяются по формуле:

$$Q_{mh} = 79 \cdot \frac{V_T \cdot A^p \cdot \beta}{100}, \text{ (2.6)}$$

где A^p – зольность топлива, %;

β – содержание горячей части в очажных остатках, %.

Потери теплоты в окружающую среду

$$Q_{окр} = F_{пов} \alpha_{ст} (t_{пов} - t_{окр}) T, \text{ ккал/период, (2.7)}$$

где $F_{пов}$ – площадь наружной поверхности агрегата, м²;

$t_{пов}$ – температура на поверхности агрегата, °С;

$t_{окр}$ – температура окружающей среды, °С;

T – число часов в рассматриваемом периоде, ч;

$\alpha_{ст}$ – коэффициенты теплоотдачи от стенок наружных поверхностей к воздуху окружающей среды, ккал/(м²·ч·°С), определяется по формуле:

$$\alpha_{ст} = 8,4 + 0,06 (t_{пов} - t_{окр}), \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С). (2.8)}$$

Потери теплоты со шлаком определяются по формуле:

$$Q_{шл} = G_{шл} c_{шл} (t_{шл} - t_{окр}), \text{ ккал/период, (2.9)}$$

где $G_{шл}$ – количество шлака за рассматриваемый период, кг/период;

$t_{окр}$ – температура окружающей среды, °С;

$t_{\text{шл}}$ – температура шлака, °С;

$c_{\text{шл}}$ – удельная теплоемкость шлака, ккал/(кг · °С).

Потери теплоты с изделиями и техническими отходами определяются по формуле:

$$Q_{\text{изд}} = G_{\text{изд}} c_{\text{изд}} (t_{\text{изд}} - t_{\text{окр}}), \text{ ккал/период, (2.10)}$$

где $G_{\text{изд}}$ – количество технических отходов или масса изделий за рассматриваемый период, кг/период;

$t_{\text{изд}}$ – температура технических отходов или изделия, выходящих из агрегата, °С;

$c_{\text{изд}}$ – удельная теплоемкость технических отходов или изделия, ккал/(кг · °С).

Потери теплоты излучением через открытые окна определяются по формуле:

$$Q_{\text{изл}} = \sigma \varphi F \left[\left(\frac{t_{\text{г}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right] T, \text{ ккал/период, (2.11)}$$

где σ – приведенный коэффициент излучения абсолютно черного тела, равен 4,87 ккал/(м²·ч·К⁴);

T – время в рассматриваемом периоде, в течении которого открыто окно, ч;

$t_{\text{г}}$ – температура газов, внутри окна, °С;

F – площадь окна, м²;

φ – коэффициент диафрагмирования, определяется по номограммам в зависимости от размеров окна и толщины изоляции.

Потери теплоты на нагрев транспортных средств определяются по формуле:

$$Q_{\text{тр}} = g_{\text{к}} v_{\text{к}} c_{\text{к}} (t_{\text{к}}'' - t_{\text{к}}'), \text{ ккал/период, (2.12)}$$

где $g_{\text{к}}$ – вес 1 п. м конвейера, кг/п. м;

$v_{\text{к}}$ – скорость конвейера, м/период;

$t_{\text{к}}''$ – температура конвейера на выходе из агрегата, °С;

$t_{\text{к}}'$ – температура конвейера на входе в агрегат, °С;

$c_{\text{к}}$ – теплоемкость материала конвейера, ккал/кг.

Потери теплоты с охлаждающей водой определяются по формуле:

$$Q_{\text{охл}} = G_{\text{охл}} c_{\text{в}} \Delta t, \text{ ккал/период, (2.13)}$$

где $G_{\text{охл}}$ – количество охлаждающей воды за рассматриваемый период, кг/период;

Δt – температура перегрева охлаждающей воды, °С;

c_b – удельная теплоемкость воды, равна 1 ккал/(кг · °С).

Неучтенные потери теплоты, учитывающие расходы тепловой энергии на пуск агрегатов и недогрузку агрегатов в третью смену, принимаются равными:

$$Q_{н.п.} = (0,02 \div 0,05) \cdot Q_{хг}, \text{ ккал/период. (2.14)}$$

Объем дымовых газов при коэффициенте избытка воздуха $\alpha > 1$ определяется по формуле:

$$V_{yx} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha - 1) \cdot V^0, \text{ м}^3/\text{кг}(\text{м}^3). \text{ (2.15)}$$

Объем водяных паров при $\alpha > 1$ определяется по формуле:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0, \text{ м}^3/\text{кг}(\text{м}^3). \text{ (2.16)}$$

Теоретический объем сухого воздуха ($\alpha = 0$), необходимого для сжигания 1 кг твердого или жидкого топлива определяется по формуле:

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p, \text{ м}^3/\text{кг. (2.17)}$$

Теоретический объем азота:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,8 \cdot \frac{N^p}{100}, \text{ м}^3/\text{кг. (2.18)}$$

Теоретический объем трехатомных газов:

$$V_{R_2O} = 1,866 \cdot \frac{C^p + 0,375 \cdot S^p}{100}, \text{ м}^3/\text{кг. (2.19)}$$

Теоретический объем водяных паров:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V^0, \text{ м}^3/\text{кг. (2.20)}$$

Теоретический объем сухого воздуха ($\alpha = 0$), необходимого для сжигания 1 м³ газообразного топлива определяется по формуле:

$$V^0 = 0,0476 \left(0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left[\left(n + \frac{m}{4} \right) C_nH_m \right] - O_2 \right), \text{ м}^3/\text{м}^3. \text{ (2.21)}$$

Теоретический объем азота:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + \frac{N_2}{100}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \text{ (2.22)}$$

Теоретический объем трехатомных газов:

$$V_{R_2O} = 0,01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \sum [n \cdot C_nH_m]), \text{ м}^3/\text{м}^3. \text{ (2.23)}$$

Теоретический объем водяных паров:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,01(\text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + 0,5 \sum [m C_n \text{H}_m] + 0,124 d_T) + 0,0161 V^0, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.24)$$

где d_T – влагосодержание газообразного топлива, г/м³.

Пример. Рассмотрим модель теплового баланса хлебопекарной печи при сжигании природного газа.

Приход теплоты

Химическая теплота топлива определяется

$$Q_{\text{ХТ}} = Q_{\text{Н}}^p \cdot V_T, \text{ ккал/ч},$$

где $Q_{\text{Н}}^p$ – низшая рабочая теплота сгорания природного газа, равна 8050 ккал/м³;

V_T – определяемый расход газа, м³/ч.

Теплота, вносимая в агрегат топливом:

$$Q_{\text{Физ}} = c_T t_T V_T = 0,29 \cdot 10 \cdot V_T = 2,9 V_T, \text{ ккал/ч},$$

где c_T – удельная теплоемкость природного газа, 0,29 ккал/(м³ · °С);

t_T – температура природного газа, 10 °С.

Расход теплоты

1. Расход теплоты на выпечку хлеба

$$Q_{\text{пол}} = G_{\text{ГХ}} [w_{\text{исп}} (h_{\text{пп}} - h_{\text{в}}) + q_{\text{к}} c_{\text{к}} (t_{\text{к}} - t_{\text{Т}}) + (q_{\text{м}} c_{\text{м}} + w_{\text{в}} c_{\text{в}}) (t_{\text{м}} - t_{\text{Т}})], \text{ ккал/ч},$$

где $G_{\text{ГХ}}$ – производительность печи по горячему хлебу, 890 кг/ч;

$w_{\text{исп}}$ – упек относительно горячего хлеба, равен 0,14 кг/кг;

$h_{\text{пп}}$ – энтальпия перегретого пара при температуре 180 °С в пекарной камере, 664 ккал/кг;

$h_{\text{в}}$ – энтальпия воды в тесте, 30 ккал/кг;

$q_{\text{к}}$ – содержание корки в кг горячего хлеба, 0,17 кг/кг;

$c_{\text{к}}$ – теплоемкость корки, 0,43 ккал/(кг · °С);

$t_{\text{к}}$ – средняя температура корки, 120 °С;

$t_{\text{Т}}$ – температура теста, 30 °С;

$t_{\text{м}}$ – температура мякиша, 96 °С;

$w_{\text{в}}$ – содержание общей влаги в кг горячего хлеба, 0,50 кг/кг;

$q_{\text{м}}$ – содержание сухого вещества мякиша хлеба, 0,34 кг/кг;

$c_{\text{м}}$ – теплоемкость сухого вещества мякиша, 0,40 ккал/(кг · °С);

$c_{\text{в}}$ – теплоемкость влаги хлеба, 1 ккал/(кг · °С);

$$Q_{\text{пол}} = 890 [0,14(664 - 30) + 0,17 \cdot 0,43(120 - 30) + (0,34 \cdot 0,4 + 0,5 \cdot 1)(96 - 30)] = 115418, \text{ ккал/ч}.$$

2. Потери теплоты с уходящими газами

$$Q_{\text{ух}} = V_{\text{ух}} c_{\text{ух}} t_{\text{ух}} V_T, \text{ ккал/ч},$$

где V_{yx} – объем уходящих газов, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

c_{yx} – теплоемкость уходящих газов, при сжигании природного газа равна $0,34 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

t_{yx} – температура уходящих газов, $250 ^\circ\text{C}$;

Элементарный состав природного газа: $\text{CH}_4 = 92,8 \%$, $\text{C}_2\text{H}_6 = 3,9\%$, $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,1\%$, $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,4 \%$, $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1 \%$, $\text{N}_2 = 1,6 \%$, $\text{CO}_2 = 0,1\%$.

Объем уходящих газов, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$$V_{yx} = V_{\text{NO}_2}^0 + V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + 1,0161(\alpha - 1)V^0, \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где V^0 – теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания 1 м^3 газа, определяется по формуле:

$$V^0 = 0,0476 \sum \left[\left(n + \frac{m}{2} \right) C_n H_m \right], \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V^0 = 0,0476 \left[\left(1 + \frac{4}{4} \right) 92,8 + \left(1 + \frac{6}{4} \right) 3,9 + \left(1 + \frac{8}{4} \right) 1,1 + \left(1 + \frac{10}{4} \right) 0,4 + \left(1 + \frac{12}{4} \right) 0,1 \right] = 9,9, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический объем трехатомных газов:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01(\text{CO}_2 + \sum [n C_n H_m]) = 0,01(0,1 + 1 \cdot 92,8 + 2 \cdot 3,9 + 3 \cdot 1,1 + 4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,1) = 1,06, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический объем водяных паров:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,01 \sum \left[\frac{m}{2} C_n H_m \right] + 0,0161 V^0 = 0,01 \left(\frac{4}{2} 92,8 + \frac{6}{2} 3,9 + \frac{8}{2} 1,1 + \frac{10}{2} 0,4 + \frac{12}{2} 0,1 \right) + 0,0161 \cdot 9,9 = 2,2, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретическое количество азота, получаемого при сжигании 1 м^3 природного газа

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 V^0 + 0,01 \text{N}_2 = 0,79 \cdot 9,9 + 0,01 \cdot 1,6 = 7,84, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем водяных паров при $\alpha = 1,6$ определяется по формуле:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0 = 2,2 + 0,0161 \cdot (1,6 - 1)9,9 = 2,3, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем дымовых газов равен:

$$V_{yx} = 7,84 + 1,06 + 2,3 + (1,6 - 1)9,9 = 17,1, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Потери теплоты с уходящими газами равны:

$$Q_{yx} = 17,1 \cdot 0,34 \cdot 250 \cdot V_T = 1457 V_T, \text{ ккал/ч.}$$

3. Потери теплоты от химического недожога

$$Q_{\text{хн}} = 0.$$

4. Потери теплоты в окружающую среду

$$Q_{\text{окр}} = F_{\text{пов}} \alpha_{\text{ст}} (t_{\text{пов}} - t_{\text{окр}}) T, \text{ ккал/ч},$$

где $F_{\text{пов}}$ – площадь наружной поверхности агрегата, 123 м^2 ;

$t_{\text{пов}}$ – температура на поверхности агрегата, 60°C ;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, 16°C ;

T – число часов в рассматриваемом периоде, 1 ч;

$\alpha_{\text{ст}}$ – коэффициенты теплоотдачи от стенок наружных поверхностей к воздуху окружающей среды, $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$, определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{ст}} = 8,4 + 0,06(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр}}) = 8,4 + 0,06 \cdot (60 - 16) = 11, \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Потери теплоты в окружающую среду с учетом пода печи

$$Q_{\text{окр}} = 1,15 \cdot 123 \cdot 11 \cdot (60 - 16) \cdot 1 = 71574, \text{ ккал/ч}.$$

5. Потери теплоты на перегрев пара, поступающего в пекарную камеру

$$Q_{\text{пп}} = q_{\text{п}} G_{\text{гх}} (h_{\text{пп}} - h_{\text{нп}}), \text{ ккал/ч},$$

где $q_{\text{п}}$ – удельный расход пара на выпечку хлеба, $0,27 \text{ кг/кг}$;

$h_{\text{пп}}$ – энтальпия перегретого пара при температуре в пекарной камере 180°C , 664 ккал/кг ;

$h_{\text{нп}}$ – энтальпия насыщенного пара, 630 ккал/кг .

$$Q_{\text{пп}} = 0,27 \cdot 890 \cdot (664 - 630) = 8170, \text{ ккал/ч}.$$

6. Потери теплоты на нагрев транспортирующих устройств

$$Q_{\text{тр}} = g_{\text{к}} v_{\text{к}} c_{\text{к}} (t_{\text{к}}'' - t_{\text{к}}'), \text{ ккал/ч},$$

где $g_{\text{к}}$ – вес 1 п.м. конвейера, 50 кг/м ;

$v_{\text{к}}$ – скорость конвейера, $40,6 \text{ м/ч}$;

$t_{\text{к}}''$ – температура конвейера на выходе из печи, 130°C ;

$t_{\text{к}}'$ – температура конвейера на входе в печь, 30°C ;

$c_{\text{к}}$ – теплоемкость материала конвейера, $0,111 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

$$Q_{\text{тр}} = 50 \cdot 40,6 \cdot 0,111(130 - 30) = 22533, \text{ ккал/ч}.$$

7. Расход теплоты на нагрев вентиляционного воздуха

$$Q_{\text{вв}} = \frac{w_{\text{исп}} + q_{\text{п}}}{d_{\text{пк}} - d_{\text{в}}} G_{\text{гх}} c_{\text{возд}} (t_{\text{пк}} - t_{\text{окр}}) \text{ ккал/ч},$$

где $w_{\text{исп}}$ – упек относительно горячего хлеба, $0,14 \text{ кг/кг}$;

$q_{\text{п}}$ – удельный расход пара, $0,27 \text{ кг/кг}$;

$t_{\text{пк}}$ – температура парогазовой смеси, выбивающейся из окна загрузки и выгрузки, 130°C ;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающего воздуха, 16°C ;

$d_{пк}$ – влагосодержание парогазовой смеси при относительной влажности $\varphi = 60 \%$, $d_{пк} = 0,528$ кг/кг;

$d_{в}$ – влагосодержание окружающего воздуха при относительной влажности $\varphi = 60\%$, $d_{в} = 0,009$ кг/кг;

$c_{возд}$ – средняя теплоемкость воздуха, $0,24$ ккал/кг °С.

$$Q_{вв} = \frac{0,14 + 0,27}{0,528 - 0,009} 890 \cdot 0,24 (130 - 16) = 19236 \text{ ккал/ч.}$$

8. Потери теплоты излучением через открытые окна определяются по формуле:

$$Q_{изл} = 4,87 \cdot 0,8 \cdot 0,03 \cdot \left[\left(\frac{600 + 273}{100} \right)^4 + \left(\frac{16 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 1 = 671, \text{ ккал/ч.}$$

где t_r – температура газов, внутри окна, 600 °С;

F – площадь окна, $0,03$ м²;

φ – коэффициент диафрагмирования, равен $0,8$.

9. Неучтенные потери теплоты

$$Q_{нп} = 0,05 Q_{хт} = 402,5 B_T, \text{ ккал/ч}$$

Тепловой баланс печи:

$$8052,9 B_T = 237602 + 1859,5 B_T$$

Часовой расход природного газа равен:

$$B_T = 237602 / (8052,9 - 1859,5) = 38,4 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Удельный расход природного газа на производство хлеба равен:

$$b_T^H = \frac{1000 B_T}{G_{гх} (1 - w_{исп})} = \frac{1000 \cdot 38,4}{890 (1 - 0,14)} = 50,1, \text{ м}^3/\text{т.}$$

Удельный расход условного топлива на производство хлеба равен:

$$b_T^y = b_T^H \frac{7000}{Q_n^p} = 50,1 \frac{7000}{8050} = 43,6, \text{ кг у.т./т.}$$

Моделирование работы печей позволяет определить ее энергетические характеристики при изменении различных входных параметров:

- производительности печи;
- температуры уходящих газов;
- температуры в пекарной камере;
- температуры наружных стенок печи;
- площади смотровых окон;
- вида топлива и его калорийности,

что может привести к повышению эффективности работы печи и сэкономит энергоресурсы.

В таблице приведен тепловой баланс хлебопекарной печи при сжигании природного газа:

Наименование показателя	Мкал/ч	%
Приход	309,2	100
1. Химическая теплота горения топлива	309,1	99,95
2. Физическая теплота топлива	0,1	0,05
Расход	309,2	100
1. Расход теплоты на выпечку хлеба	115,4	37,3
2. Потери теплоты с уходящими газами	56,0	18,1
3. Потери теплоты от химического недожога	0,0	0,0
4. Потери теплоты в окружающую среду	71,6	23,2
5. Потери теплоты на перегрев пара, поступающего в камеру	8,2	2,7
6. Потери теплоты на нагрев транспортных устройств	22,5	7,3
7. Потери теплоты на нагрев вентиляционного воздуха	19,2	6,2
8. Потери теплоты излучением	0,7	0,2
9. Неучтенные потери теплоты	15,5	5,0

Представленный тепловой баланс хлебопекарной печи не учитывает потери теплоты при пуске печи, а также ухудшение энергетических показателей печи при технологических недогрузках по производству хлеба.

Контрольные вопросы

1. Как калорийность топлива влияет на значение удельного расхода условного топлива на производство хлеба?
2. Как производительность хлебопекарной печи влияет на значение удельного расхода условного топлива на производство хлеба?
3. Какие технические мероприятия применяются на хлебопекарных печах для повышения КПД печи?
4. Какие устройства применяются для снижения температуры отходящих газов?

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ КОТЕЛЬНОМИ УСТАНОВКАМИ

Котельные установки при производстве тепловой энергии непрерывно выбрасывают в атмосферу через дымовую трубу токсичные газы и мелкодисперсную золу. При высоких температурах в факеле топки происходит частичное окисление азота с образованием оксидов азота. При содержании серы в топливе в дымовых газах появляются оксиды серы. Основным показателем, характеризующим загрязнение воздушной среды, является выброс вредных веществ в единицу времени.

В современных производственных и отопительных котельных дымовая труба служит для отвода продуктов сгорания на определенную высоту, при которой обеспечивается рассеивание вредных веществ до допустимых санитарными нормами концентраций в зоне нахождения людей.

За стандарт качества воздуха приняты предельные допустимые концентрации (ПДК) различных токсичных веществ. ПДК атмосферных загрязнений устанавливается по двум показателям: максимально-разовому и среднесуточному. Максимально-разовая концентрация характеризует качество атмосферного воздуха при отборе пробы в течение 20 минут, а среднесуточная – в течение суток.

Расчеты ведутся по каждому вредному веществу в отдельности. При этом концентрация веществ не должна превышать значений, указанных в таблице:

$$C_i \leq \text{ПДК}_i. \quad (3.1)$$

Вещество	Среднесуточная ПДК, мг/м ³
1. Мелкодисперсная зола	0,05
2. Диоксид серы	0,05
3. Диоксид азота	0,085

Более жестким требованием является условие, при котором сумма отношений концентраций вредных веществ к их ПДК должна быть меньше единицы:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1. \quad (3.2)$$

Выброс мелкодисперсной золы определяется по формуле:

$$M_{\text{зл}} = \frac{10^3 V_p}{3,6} \left(1 - \frac{\eta_{\text{зу}}}{100}\right) \left[\left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \frac{A^p}{100} + \frac{q_4}{100} \right], \text{ г/с}, \quad (3.3)$$

где V_p – расчетный часовой расход топлива всеми котлами, т/ч; $\eta_{\text{зу}}$ – КПД золоуловителя, %; q_4 – потери теплоты от механической неполноты горения топлива, %; A^p – зольность топлива, %.

Расчетный часовой расход топлива всеми котлами равен:

$$V_p = \frac{3600 Q_\Sigma}{\eta_{\text{ном}} \eta_{\text{тп}} Q_H^p}, \text{ т/ч, (3.4)}$$

где $\eta_{\text{ном}}$ – номинальный КПД котлоагрегатов, %; $\eta_{\text{тп}}$ – КПД теплового потока, учитывающий собственные нужды котельной и зависящий от вида топлива, %; Q_H^p – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг, Q_Σ – суммарная мощность котлоагрегатов, МВт.

Выброс оксидов серы в пересчете на SO_2 определяется по формуле:

$$M_{\text{SO}_2} = \frac{V_p S^p}{0,18}, \text{ г/с, (3.5)}$$

где S^p – содержание серы в рабочей массе топлива, %.

Выброс оксидов азота в пересчете на NO_2 определяется по формуле:

$$M_{\text{NO}_2} = 0,034 \beta_1 k V_p Q_H^p \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) (1 - \beta_2 r) \beta_3, \text{ г/с, (3.6)}$$

где β_1 – коэффициент, учитывающий влияние качества сжигаемого топлива на выход оксидов азота; β_2 – коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркулирующих продуктов сгорания в зависимости от условий подачи их в топку; β_3 – коэффициент, учитывающий конструкцию горелок: для вихревых горелок принимается равным единице, для прямоточных – 0,85; r – степень рециркуляции продуктов сгорания в долях от производительности дутьевого вентилятора; k – коэффициент, характеризующий выход оксидов азота на одну тонну условного топлива, кг/т.

Коэффициент β_1 принимается по таблице:

Топливо	Содержание азота, %	β_1
1. Природный газ	–	0,85
2. Мазут	0,3 ÷ 0,6	0,8
3. Твердое топливо	1,0	0,55 ÷ 0,8
	1 ÷ 1,4	0,8 ÷ 1,0
	1,4 ÷ 2	1,0 ÷ 1,4
	2	1,4 ÷ 2,0

Коэффициент β_2 принимается по таблице:

Способ ввода в топку газов рециркуляции	β_2
1. При сжигании горючего газа и мазута:	
– в под топки	0,002
– через шлицы под горелками	0,015
– по наружному каналу горелок	0,020
– в воздушном дутье	0,025
– в рассечку двух воздушных потоков	0,030
2. При сжигании твердого топлива с температурой факела более 1400 °С и вводе газов рециркуляции:	
– в первичную аэросмесь	0,010
– во вторичный воздух	0,005

Коэффициент k для паровых котлов производительностью более 70 т/ч при сжигании природного газа и мазута во всем диапазоне нагрузок, а также для котлов, сжигающих твердое топливо при нагрузках выше 75 % номинальной и температуре факела более 1500 °С, рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{12D}{200 + D_{\text{ном}}}, \text{ кг/т; (3.7)}$$

для паровых котлов производительностью менее 70 т/ч:

$$k = \frac{D}{20}, \text{ кг/т; (3.8)}$$

для водогрейных котлов:

$$k = \frac{2,5Q}{20 + Q_{\text{ном}}}, \text{ кг/т, (3.9)}$$

где $D_{\text{ном}}$, D – номинальная и расчетная производительности парового котла, т/ч; $Q_{\text{ном}}$, Q – номинальная и расчетная мощности водогрейного котла, Гкал/ч.

При сжигании твердого топлива с нагрузками менее 75 % коэффициент умножить на 0,75. При сжигании твердого топлива с температурой факела менее 1500 °С во всем диапазоне нагрузок в формулах вместо D и Q подставлять их номинальные значения.

Диаметр устья дымовой трубы определяется по формуле:

$$D_{\text{тр}}^y = \sqrt{\frac{4V_{\text{тр}}}{\pi w_{\text{вых}}}}, \text{ м, (3.10)}$$

где $V_{\text{тр}}$ – объемный расход продуктов сгорания через трубу в выходном сечении, $\text{м}^3/\text{с}$; $w_{\text{вых}}$ – скорость продуктов сгорания на выходе из дымовой трубы, для труб с высотой до 100 м принимается равной $20 \div 30$ м/с.

Диаметр устья дымовой трубы, изготовленной из кирпича и железобетона, согласно СНиП принимается из стандартного ряда: 1,2; 1,5; 1,8; 2,1; 2,4; 3,0; 3,6; 4,2 и т.д.

Высота трубы по предварительной оценке определяется по формуле:

$$H = \sqrt{A \left(\frac{M_{\text{SO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{SO}_2}} + \frac{M_{\text{NO}_2}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}} \right) \sqrt[3]{\frac{z}{V_{\text{тр}} \Delta t}}}, \text{ м}, \quad (3.11)$$

где A – коэффициент, зависящий от метеорологических условий местности, для Республики Беларусь равен 120; z – число дымовых труб одинаковой высоты; Δt – разность температуры выбрасываемых газов и средней температуры воздуха самого жаркого месяца, $^{\circ}\text{C}$.

Высота трубы округляется до ближайшего целого значения.

Концентрация мелкодисперсной золы при выбранной высоте трубы H определяется по формуле:

$$C_{\text{зл}} = \frac{A M_{\text{зл}} F m n}{H^2 \sqrt[3]{V_{\text{тр}} \Delta t}}, \text{ мг/м}^3, \quad (3.12)$$

где F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания золы в атмосферном воздухе, принимается равным 2 (при $\eta_{\text{зл}} \geq 90\%$) и равным 2,5 (при $75\% < \eta_{\text{зл}} < 90\%$).

Концентрация оксидов серы определяется по формуле:

$$C_{\text{SO}_2} = \frac{A M_{\text{SO}_2} m n}{H^2 \sqrt[3]{V_{\text{тр}} \Delta t}}, \text{ мг/м}^3. \quad (3.13)$$

Концентрация оксидов азота определяется по формуле:

$$C_{\text{NO}_2} = \frac{A M_{\text{NO}_2} m n}{H^2 \sqrt[3]{V_{\text{тр}} \Delta t}}, \text{ мг/м}^3. \quad (3.14)$$

Коэффициент m определяется по формуле:

$$m = \left(0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f} \right)^{-1}, \quad (3.15)$$

где f – коэффициент, который вычисляется по формуле:

$$f = \frac{1000 w_{\text{вых}}^2 D_{\text{тр}}^y}{H^2 \Delta t}. \quad (3.16)$$

Коэффициент n определяется по формуле:

$$n = \begin{cases} 3, & \text{при } v_M \leq 0,3 \\ 3 - \sqrt{(v_M - 0,3)(4,36 - v_M)}, & \text{при } 0,3 < v_M \leq 2, \\ 1, & \text{при } v_M > 2 \end{cases} \quad (3.17)$$

где v_M – коэффициент, который вычисляется по формуле:

$$v_M = 0,65 \sqrt{\frac{V_{\text{тр}} \Delta t}{H}} \quad (3.18)$$

После определения концентраций вредных веществ проверяется условие (2), при его невыполнении увеличивается высота дымовой трубы, пересчитываются коэффициенты v_M , f , m , n и заново определяются концентрации вредных веществ и т.д.

Пример. Произведем выбор высоты дымовой трубы для отопительной котельной, в которой установлены два котла КВ-ГМ-11,63, работающих на природном газе.

Исходные данные:

- $Q_{\text{ном}} = 11,63 \text{ МВт} = 10 \text{ Гкал/ч}$ – номинальная мощность котла;
- $Q_{\Sigma} = 23,26 \text{ МВт} = 20 \text{ Гкал/ч}$ – суммарная мощность котельной;
- топливо: природный газ, $\beta_1 = 0,85$;
- установлены прямоточные горелки, $\beta_3 = 0,85$;
- рециркуляция дымовых газов отсутствует, $r = 0$;
- $q_4 = 0$ – потери теплоты от механической неполноты горения топлива;
- $Q_H^p = 33,8 \text{ МДж/м}^3$ – низшая теплотворная способность природного газа;
- $\Delta t = 230 \text{ }^\circ\text{C}$ – разность температуры выбрасываемых газов и средней температуры воздуха самого жаркого месяца;
- $\eta_{\text{ном}} = 0,92$ – номинальный КПД котла;
- $\eta_{\text{тп}} = 0,97$ – КПД теплового потока;
- $w_{\text{вых}} = 25 \text{ м/с}$ – скорость продуктов сгорания на выходе из дымовой трубы.

Коэффициент k равен:

$$k = \frac{2,5 \cdot 10}{20 + 10} = 0,83, \text{ кг/т.}$$

Расчетный часовой расход топлива всеми котлами равен:

$$B_p = \frac{3600 \cdot 23,26}{0,92 \cdot 0,97 \cdot 33800} = 2,78, \text{ тыс.м}^3/\text{ч.}$$

Выброс оксидов азота в пересчете на NO_2 равен:

$$M_{\text{NO}_2} = 0,034 \cdot 0,85 \cdot 0,83 \cdot 2,78 \cdot 33,8 \left(1 - \frac{0}{100}\right) (1 - 0) 0,85 = 1,92, \text{ г/с.}$$

Объемный расход продуктов сгорания через трубу в выходном сечении равен:

$$V_{\text{тр}} = B_p \cdot V^0 \cdot \alpha / 3,6 = 2,78 \cdot 12 \cdot 1,1 / 3,6 = 10,2, \text{ м}^3/\text{с.}$$

Расчетный диаметр устья дымовой трубы равен:

$$D_{\text{тр}}^y = \sqrt{\frac{4 \cdot 10,2}{\pi \cdot 25}} = 0,72, \text{ м.}$$

Принимаем диаметр устья дымовой трубы равным 1,2 м.

Высота трубы по предварительной оценке равна:

$$H = \sqrt[3]{120 \left(\frac{1,92}{0,085}\right)^3 \frac{1}{10,2 \cdot 230}} = 14,3, \text{ м.}$$

Принимаем высоту дымовой трубы равным 15 м.

Коэффициент f равен:

$$f = \frac{1000 \cdot 25^2 \cdot 1,2}{15^2 \cdot 230} = 14,5.$$

Коэффициент m равен:

$$m = \left(0,67 + 0,1 \sqrt{14,5} + 0,34 \sqrt[3]{14,5}\right)^{-1} = 0,53.$$

Коэффициент v_m равен:

$$v_m = 0,65 \sqrt{\frac{10,2 \cdot 230}{15}} = 8,13.$$

Коэффициент n равен:

$$n = 1.$$

Концентрация оксидов азота равна:

$$C_{\text{NO}_2} = \frac{120 \cdot 1,92 \cdot 1,88 \cdot 0,53}{15^2 \sqrt[3]{10,2 \cdot 230}} = 0,077, \text{ мг/м}^3.$$

Проверяется условие (2):

$$\frac{0,077}{0,085} = 0,91 \leq 1,$$

которое выполняется.

Условие (2) для рассматриваемого примера говорит о том, что имеется небольшой запас до превышения ПДК вредных веществ.

Контрольные вопросы

1. Как рециркуляция дымовых газов влияет на концентрацию вредных веществ?
2. Какие существуют методы очистки топлива от природной серы?
3. Какие технические мероприятия применяются в котельных для снижения выбросов оксидов азота?
4. К чему приводит чрезмерное снижение температуры дымовых газов?

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимович Л.С., Цубанов А.Г. и др. Справочник по теплоснабжению сельского хозяйства. – Мн.: «Ураджай», 1993.
2. Желтов В. С., Павлухин Г. Н., Соловьев В. М. Механизация послеуборочной обработки зерна. – М.: «Колос», 1985.
3. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Сельскохозяйственная техника. Каталог. – М. 1991.
5. Эстеркин Р. И. Котельные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

Приложение

Таблица П.1

Влагосодержание воздуха в зависимости от температуры t_0
и относительной влажности воздуха ϕ_0

$t_0, ^\circ\text{C}$	Влагосодержание воздуха, г/кг, при относительной влажности, %							
	100	90	80	70	60	50	40	30
-15	1,04	0,94	0,83	0,73	0,62	0,52	0,42	0,31
-10	1,63	1,47	1,30	1,14	0,98	0,82	0,65	0,49
-5	2,52	2,27	2,02	1,76	1,51	1,26	1,01	0,75
0	3,85	3,46	3,07	2,69	2,30	1,92	1,53	1,15
5	5,51	4,95	4,40	3,85	3,29	2,74	2,19	1,64
10	7,78	7,00	6,21	5,43	4,65	3,87	3,09	2,31
15	10,86	9,76	8,66	7,56	6,47	5,38	4,30	3,22
20	15,00	13,46	11,94	10,42	8,91	7,41	5,91	4,42
25	20,50	18,39	16,29	14,21	12,14	10,08	8,04	6,01

Таблица П.2

Параметры сушильных камер зерносушилок

Наименование и тип	Производительность, т/ч	Площадь поверхности сушильной камеры, м ²	Толщина оболочки, мм
1. Сушилка барабанная стационарная СЗСБ-4,0	4	29,56	3
2. Сушилка барабанная стационарная СЗСБ-8,0А	8	47,23	2,5
3. Сушилка универсальная передвижная СЗПБ-2,5	2,5	17,27	3,2
4. Сушилка шахтная стационарная СЗШ-8А	8	28,27	3,0
5. Сушилка шахтная стационарная СЗШ-16А	16	69,32	3,4
6. Сушилка шахтная стационарная М819	16	62,83	2,6

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЗЕРНОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК	3
1.1. Моделирование работы зерносушильных установок, работающих на твердом и жидком топливе	3
1.2. Моделирование работы зерносушильных установок, работающих на газообразном топливе	8
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ТОПЛИВОПОТРЕБЛЯЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ	14
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ КОТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ	24
ЛИТЕРАТУРА	30
Приложение	31

Токочаков Владимир Иванович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

**Лабораторный практикум
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-43 01 05
«Промышленная теплоэнергетика»
дневной и заочной форм обучения
В трех частях
Часть 1**

Подписано в печать 24.03.09.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л.1,82.

Изд. № 112.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждения образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.