

СЖИГАНИЕ ГОРЮЧИХ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Теплота сгорания твердого топлива существенно зависит от рабочей влажности W^p и приближенно ее можно определить по формуле Д. И. Менделеева, кДж/кг:

$$Q_H^p = 340C^p + 1030H^p - 109(O^p - S^p) - 25,2W^p.$$

Высшая теплота сгорания (теплота сгорания абсолютно сухого топлива) ствольной древесины практически не зависит от вида древесины и примерно равна 18,9 МДж/кг. Тогда для ствольной древесины ($C^r = 50,9\%$, $H^r = 6,1\%$, $O^r = 41,9\%$, $N^r = 0,8\%$, $S^r = 0,3\%$) формула Д. И. Менделеева упрощается

$$Q_H^p = 189(100 - A^p - 1,13W^p).$$

Пересчет теплоты сгорания топлива при изменении влажности (от W_1^p до W_2^p) и зольности (от A_1^p до A_2^p) можно произвести по формуле

$$Q_{H2}^p = (Q_{H1}^p + 25,2W_1^p) \frac{100 - W_2^p - A_2^p}{100 - W_1^p - A_1^p} - 25,2W_2^p, \text{ кДж/кг.}$$

Теоретическое количество воздуха необходимого для сжигания 1 кг топлива можно определить по формулам:

$$V_B^0 = 0,0889C^p + 0,265H^p + 0,033(S^p - O^p), \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$m_B^0 = 0,115C^p + 0,343H^p + 0,043(S^p - O^p), \text{ кг/кг.}$$

Температура горения топлива зависит, прежде всего, от трех факторов: количества подаваемого воздуха αm_B^0 , влажности топлива W^p и t_B температуры подаваемого на горение воздуха. Если пренебречь теплоемкостью золы, то температура горения (температура продуктов сгорания) рассчитывается по формуле

$$t^{\text{гор}} = \frac{Q_H^p + c_p^B \alpha m_B^0 (t_B - t_{o.c})}{c_p^r (1 + \alpha m_B^0)} + t_{o.c},$$

где c_p^r , c_p^B – удельная массовая изобарная теплоемкость дымовых газов и воздуха; $t_{o.c}$ – температура окружающей среды.

Для ствольной древесины ($C^r = 50,9\%$, $H^r = 6,1\%$, $O^r = 41,9\%$, $N^r = 0,8\%$, $S^r = 0,3\%$) температуру горения можно определить по упрощенной формуле:

$$t^{\text{гор}} = \frac{189(100 - A^p - 1,13W^p) + \alpha 0,0612(100 - W^p - A^p)t_B}{1,34(1 + \alpha 0,0612(100 - W^p - A^p))}.$$

При $\alpha = 1$, $W^p = 0$ и $A^p = 0$ максимальная температура горения

(жаропроизводительность) древесного топлива равна $t^{\text{гор}} = 1986^{\circ}\text{C}$.

Эффективность топки определяется на основе уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{п.с}} + Q_{\text{хим}} + Q_{\text{мех}} + Q_{\text{зола}},$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания топлива; $Q_{\text{пол}}$ – полезно используемое тепло; $Q_{\text{п.с}}$ – тепло, расходуемое на нагрев продуктов сгорания; $Q_{\text{хим}}$ – потери тепла от химического недожога; $Q_{\text{мех}}$ – потери тепла от механического недожога; $Q_{\text{зола}}$ – потери тепла со шлаком и золой.

Коэффициент полезного действия топки определяется по формуле

$$\eta_{\text{т}} = Q_{\text{пол}} / Q_{\text{н}}^{\text{р}}.$$

Основные параметры топочных устройств слоевого типа следующие.

1. **Зеркало горения** – верхнее сечение слоя, в котором происходит горение топлива. Для слоевых топок с горизонтальным и наклонным слоем площадь зеркала горения равно площади колосниковой решетки. Для слоевых топок с вертикальным слоем площадь зеркала горения равна площади окна в задней стенке топки, через которое выходят продукты сгорания. Для слоевых топок с зажатым слоем площадь зеркала горения равно площади зажимающей решетки, через которую выходят продукты сгорания.

Тогда площадь зеркала горения или площадь колосниковой решетки определяют по формуле

$$R = \frac{Q_{\text{к.а}}}{q_{\text{R}} \eta_{\text{к.а}}},$$

где $Q_{\text{к.а}} = G (h_{\text{п.п}} - h_{\text{п.в}})$ – производительность котлоагрегата, кВт; q_{R} – теплонапряжение зеркала горения, кВт/м² (см. таблицу); $\eta_{\text{к.а}}$ – КПД котлоагрегата; $h_{\text{п.в}}$ – энтальпия пара на выходе из котлоагрегата, кДж/кг; $h_{\text{п.в}} = t_{\text{п.в}} c_{\text{вод}}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг; $t_{\text{п.в}}$, $c_{\text{вод}}$ – температура и теплоемкость питательной воды.

2. **Объем топочного пространства** – пространство, ограниченное слоем топлива, трубами экранов котла и стенками обмуровки, т. е. замкнутое пространство над слоем топлива.

$$V_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{к.а}}}{q_{\text{V}} \eta_{\text{к.а}}},$$

где q_{V} – объема топочного пространства, кВт/м³ (см. таблицу).

Таблица

Тип топочного устройства	Вид топлива	Теплонапряжение		
		зеркала горения, q_{R} , кВт/м ²	колосниковой решетки, кВт/м ²	объема топочного пространства, q_{V} , кВт/м ³

Топка с горизонтальным слоем	Дрова	1160	1160	350
Топка с вертикальным слоем	Дрова	3500	1400	350
Топка с наклонным слоем колосников	Дрова	1400	1400	350
Топка со ступенчатой наклонной решеткой	Древесные опилки	700	700	300
Топка с зажатым слоем	Рубленая щепа	7500	–	410

3. Расход топлива:

– условного, т у. т./ч:

$$B_{y.т} = \frac{0,1228Q_{к.а}}{\eta_{к.а}}$$

– массового, т/ч

$$B_T = \frac{3,6Q_{к.а}}{Q_H^p \eta_{к.а}},$$

– объемного, м³/ч

$$B_{м^3} = \frac{B_T}{\rho_T \Pi},$$

где ρ_T – плотность топлива, кг/м³; Π – коэффициент насыпной плотности, отношение объема топлива в плотных кубометрах к объему топлива, занимаемого штабелем или кучей.

Широкое применение находит более эффективный процесс сжигания топлива в «кипящем» слое. Принцип его заключается в том, что при определенной скорости дутья, подаваемого под слой топлива с заданным размером частиц, лежащего на решетке, этот слой приходит в движение, напоминающее кипение жидкости.

Напор газа, при котором возникает «кипящий» слой, определяется по следующей формуле:

$$\Delta p_{кр} = Hg(\rho_T - \rho_B)(1 + \varepsilon) + \Delta p',$$

где H – высота слоя топлива, м; ρ_T , ρ_B – плотность топлива и воздуха соответственно, кг/м³; ε – коэффициент порозности, представляющий собой отношение величин объемов пустот и слоя; $\Delta p'$ – перепад давления, необходимый для отрыва частиц друг от друга, Па.

Характерную скорость подачи воздуха $v'_{кип}$, при которой начинается движение частиц топлива в слое, можно определить по следующей формуле:

$$Re'_{кип} = \frac{v'_{кип} d}{v_B} = 0,11Ar^{0,52},$$

где $Re'_{\text{кпп}}$ – число Рейнольдса; $Ar = \frac{d^3(\rho_{\text{T}} - \rho_{\text{B}})g}{\nu_{\text{B}}^2 \rho_{\text{B}}}$ – число Архимеда; d –

эквивалентный диаметр частиц топлива, м; ν_{B} – кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$.

Задачи для практических занятий

Задача 2.1

Определить, каким должен быть минимальный КПД печи для того, чтобы $5 + 0,2 \cdot N$ кг дров хватило для приготовления пищи четверем человекам. Норма расхода тепла $900 + 150 \cdot N$ кДж на одного человека. Теплота сгорания дров 9 МДж/кг.

Задача 2.2

Какое количество древесной массы необходимо для получения $150 + 5 \cdot N$ МДж тепла при КПД установки 80%. Теплота сгорания древесины 9 МДж/кг.

Задача 2.3

Определить, какое количество воздуха необходимо подавать в топку котла, для того чтобы сжигать дрова с расходом $20 + N$ кг/с и с избытком воздуха в топке $\alpha = 1,2$. Состав дров $C^{\text{P}} = 30 + 0,5 \cdot N\%$, $H^{\text{P}} = 5,1\%$, $S^{\text{P}} = 0,2\%$, $N^{\text{P}} = 0,9\%$, $O^{\text{P}} = 37 - 0,5 \cdot N\%$, $A^{\text{P}} = 1,8\%$, $W^{\text{P}} = 25\%$.

Задача 2.4

Рабочий состав древесины $C^{\text{P}} = 25\%$, $H^{\text{P}} = 5,1\%$, $S^{\text{P}} = 0,2\%$, $N^{\text{P}} = 0,9\%$, $O^{\text{P}} = 22\%$, $A^{\text{P}} = 1,8\%$, $W^{\text{P}} = 45\%$. Теплота сгорания древесины $Q = 4 + 0,2 \cdot N$ МДж/кг. Определить, как изменится теплота сгорания топлива при сушке древесины до влажности $W^{\text{P}} = 15 + 0,1 \cdot N\%$.

Задача 2.5

Горючий состав стволовой древесины $C^{\text{Г}} = 50,9\%$, $H^{\text{Г}} = 6,1\%$, $O^{\text{Г}} = 41,9\%$, $N^{\text{Г}} = 0,8\%$, $S^{\text{Г}} = 0,3\%$. Рабочая влажность и зольность топлива $W^{\text{P}} = 60 - 1,5 \cdot N\%$, $A^{\text{P}} = 1,8\%$. Определить теплоту сгорания рабочего топлива и теоретическое объемное количество сухого воздуха, необходимого для полного сгорания 1 кг топлива.

Задача 2.6

Какая будет температура t_{r} в топке при сжигании древесного топлива, если рабочая влажность и зольность топлива $W^{\text{P}} = 60 - 1,5 \cdot N\%$, $A^{\text{P}} = 1,8\%$. Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha = 1,3$. Температура подаваемого в топку воздуха $t_0 = 80^\circ\text{C}$. Горючий состав стволовой древесины $C^{\text{Г}} = 50,9\%$, $H^{\text{Г}} = 6,1\%$, $O^{\text{Г}} = 41,9\%$, $N^{\text{Г}} = 0,8\%$, $S^{\text{Г}} = 0,3\%$. Теплоемкость воздуха

$c_b=1,3$ кДж/(кг·К), теплоемкость дымовых газов $1,34$ кДж/(кг·°С).

Задача 2.7

Какой надо поддерживать влажность топлива, чтобы для исключения шлакования обеспечить температуру в топке $t_r = 900 + 20 \cdot N$ °С. Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha = 1,3$. Температура подаваемого в топку воздуха $t_0 = 100 - 2 \cdot N$ °С. Горючий состав ствольной древесины $C^r = 50,9\%$, $H^r = 6,1\%$, $O^r = 41,9\%$, $N^r = 0,8\%$, $S^r = 0,3\%$. Зольность топлива $A^p = 0\%$. Теплоемкость воздуха $c_b = 1,3$ кДж/(м³·К), теплоемкость дымовых газов $1,34$ кДж/(кг·°С).

Задача 2.8

Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha_T = 1,3$. Состав топлива $C^p = 32 + N\%$, $H^p = 5,1\%$, $S^p = 0,2\%$, $N^p = 0,9\%$, $O^p = 35 - N\%$, $A^p = 1,8\%$, $W^p = 25\%$.

Определить объем продуктов сгорания.

Задача 2.9

В топке с наклонным слоем сжигаются дрова, имеющие следующий состав: $C^p = 30 + 0,5 \cdot N\%$, $H^p = 5,1\%$, $S^p = 0,2\%$, $O^p = 37 - 0,5 \cdot N\%$, $N^p = 0,9\%$, $A^p = 1,8\%$, $W^p = 25\%$. Температура питательной воды $t_{п.в.} = 140$ °С. Объем топочного пространства $V_T = 64$ м³. Энтальпия перегретого пара $h_{пп} = 3285$ кДж/кг. Паропроизводительность котла $D = 9 - 0,1 \cdot N$ кг, коэффициент полезного действия $\eta_{к.а} = 88\%$.

Определить расход топлива, площадь колосниковой решетки и тепловое напряжение топочного объема (тепловое напряжение зеркала горения q_R взять из таблицы).

Задача 2.10

В топке с вертикальным слоем сжигаются дрова, имеющие следующий состав: $C^p = 30 + 0,5 \cdot N\%$, $H^p = 5,1\%$, $S^p = 0,2\%$, $N^p = 0,9\%$, $O^p = 37 - 0,5 \cdot N\%$, $A^p = 1,8\%$, $W^p = 25\%$. Зеркало горения $R = 25$ м². Расход топлива $B = 4 - 0,1 \cdot N$ кг/с. Потери тепла от механического недожога $2,0\%$, от химической неполноты сгорания $3,0\%$, с уходящими дымовыми газами 6% , через обмуровку котла 2% .

Определить объем топочного пространства и тепловое напряжение площади колосниковой решетки, если тепловое напряжение объема топочного пространства q_V взять из таблицы.

Задача 2.11

В топке сжигаются дрова, имеющие следующий состав $C^p = 30 + 0,5 \cdot N\%$, $H^p = 5,1\%$, $S^p = 0,2\%$, $O^p = 37 - 0,5 \cdot N\%$, $N^p = 0,9\%$, $A^p = 1,8\%$, $W^p = 25\%$. Температура уходящих газов $t_{yx} = 160$ °С. Температура

воздуха, подаваемого на горение, $t_b = 180 - 25 \cdot N^\circ\text{C}$. Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha_T = 1,2$. Коэффициент избытка воздуха в на выходе из котлоагрегата $\alpha_{yx} = 1,4$. Потери тепла от механического недожога топлива $q_4 = 4\%$. Средние теплоемкости газа и воздуха $c_T = 1,415 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, $c_{\text{возд}} = 1,297 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$.

Определить потери тепла с уходящими газами.

Задача 2.12

В топке сжигаются древесное топливо, имеющее следующий состав $C^p = 30 + 0,5 \cdot N\%$, $H^p = 5,1\%$, $S^p = 0,2\%$, $O^p = 37 - 0,5 \cdot N\%$, $N^p = 0,9\%$, $A^p = 1,8\%$, $W^p = 25\%$. Тепловое напряжение площади колосниковой решетки $q_R = 7500 + 100 \cdot N \text{ кВт}/\text{м}^2$. Температура питательной воды $t_{п.в} = 140^\circ\text{C}$. Энтальпия перегретого пара $h_{пп} = 3285 \text{ кДж}/\text{кг}$. Коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha = 1,15$. Паропроизводительность котла $D = 9 - 0,1 \cdot N \text{ кг}/\text{с}$, коэффициент полезного действия $\eta_{к.а} = 88\%$.

Определить максимальный допустимый размер частиц топлива для организации кипящего слоя, если плотность топлива $870 \text{ кг}/\text{м}^3$, плотность воздуха $1,32 \text{ кг}/\text{м}^3$.