

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГАЗОМАЗУТНОЙ ГОРЕЛКИ ДЛЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Докт. техн. наук, проф. ЖИХАР Г. И., инж. ЖИХАР И. Г.

*Белорусский национальный технический университет,
ОАО «Мотовело»*

При двухступенчатом сжигании природного газа в газификационной камере горелки образуются продукты неполного сгорания газа, так как в камере коэффициент избытка воздуха $\alpha < 1$. При температуре более 800 °С в равновесных условиях состав продуктов сгорания определяется компонентами реакции водяного газа. Концентрация метана при равновесных условиях столь незначительна, что его можно не учитывать. Равновесный углерод может образоваться в случае сжигания природного газа при $\alpha \leq 0,25$, а в случае сжигания мазута – при $\alpha \leq 0,38$.

При сжигании топлива на основе СО и Н₂ углерод не образуется. Для расчета состава продуктов сгорания природного газа при $\alpha < 1$ составляем уравнения материального баланса углерода, водорода и кислорода [1]. Эти уравнения запишутся в следующем виде:

$$\sum n_{гi} V_{C_r} = \sum n_m V_C;$$

$$\sum m_{гi} V_{H_r} = \sum m_m V_H;$$

$$\sum k_{гi} V_{O_r} = \sum k_m V_O.$$

Здесь $n_{гi}, m_{гi}, k_{гi}$ – коэффициенты при элементах С, Н и О, которые входят в состав продуктов неполного сгорания; $V_{C_r}, V_{H_r}, V_{O_r}$ – объемы продуктов сгорания, которые содержат соответственно углерод, водород и кислород, м³/м³; n_m, m_m, k_m – коэффициенты при элементах С, Н и О, которые содержатся в химическом составе топлива. Их численное значение равно числу атомов в молекуле химического соединения топлива; V_C, V_H, V_O – объемы составляющих топлива, которые содержат С, Н и О, м³/м³.

Объем кислорода, поступающего в камеру газификации горелки при двухступенчатом сжигании топлива, равен

$$V_{O_2} = 0,21\alpha_1 V^0, \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где α_1 – коэффициент избытка воздуха, поступающего в газификационную камеру горелки (первая ступень горения); V^0 – теоретический объем воздуха, м³/м³.

Предварительно принимаем в первом приближении полноту тепловыделения $\varphi_{\text{прин}}$ в газификационной камере горелки из рис. 1 по значению α_1 в камере. В дальнейшем полнота тепловыделения φ уточняется расчетом. Расхождение $\varphi_{\text{прин}}$ и $\varphi_{\text{расч}}$ не должно превышать $\pm 0,5\%$ φ . В противном случае принимаем новое $\varphi_{\text{прин}}$ и определяем $\varphi_{\text{расч}}$ во втором приближении.

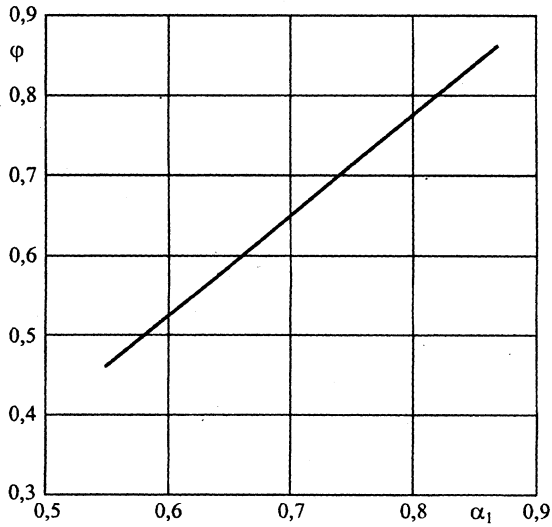


Рис. 1. Степень полноты тепловыделения в камере газификации горелки в зависимости от доли первичного воздуха: природный газ с $Q_H^p = 37,28$ МДж/м³; $t_{x,v} = 30$ °С

По принятому значению $\varphi_{\text{прин}}$ определяем теоретическую температуру горения по формуле

$$t_{\text{теор}} = \frac{\varphi_{\text{прин}} Q_H^p + I_B}{C_{\Gamma} V_{\Gamma}}$$

Энтальпию воздуха, поступающего в газификационную камеру горелки, находим по выражению

$$I_B = V_{\text{пер}}^B c t_B.$$

Количество влажных продуктов сгорания при $\alpha < 1$ равно

$$V_{\Gamma}^{\alpha} = V_{\text{CO}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0 \alpha_1 + V_{\text{N}_2}^m.$$

Тогда

$$V_{\Gamma}^{\alpha} = V_{\text{CO}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + \Sigma V_{\text{N}_2},$$

где $\Sigma V_{\text{N}_2} = 0,79 \alpha_1 V^0 + V_{\text{N}_2}^m$.

Количество сухих продуктов сгорания при $\alpha < 1$ составит

Предварительно принимаем в первом приближении полноту тепловыделения $\varphi_{\text{прин}}$ в газификационной камере горелки из рис. 1 по значению α_1 в камере. В дальнейшем полнота тепловыделения φ уточняется расчетом. Расхождение $\varphi_{\text{прин}}$ и $\varphi_{\text{расч}}$ не должно превышать $\pm 0,5\%$ φ . В противном случае принимаем новое $\varphi_{\text{прин}}$ и определяем $\varphi_{\text{расч}}$ во втором приближении.

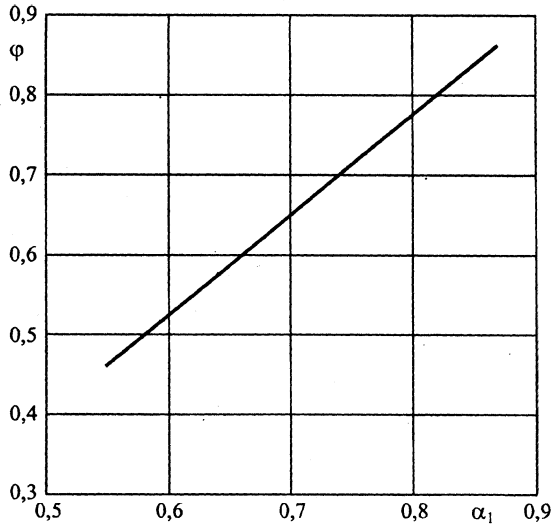


Рис. 1. Степень полноты тепловыделения в камере газификации горелки в зависимости от доли первичного воздуха: природный газ с $Q_n^p = 37,28$ МДж/м³; $t_{x,v} = 30$ °С

По принятому значению $\varphi_{\text{прин}}$ определяем теоретическую температуру горения по формуле

$$t_{\text{теор}} = \frac{\varphi_{\text{прин}} Q_n^p + I_v}{C_r V_r}$$

Энтальпию воздуха, поступающего в газификационную камеру горелки, находим по выражению

$$I_v = V_{\text{пер}}^v c t_v$$

Количество влажных продуктов сгорания при $\alpha < 1$ равно

$$V_r^\alpha = V_{\text{CO}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0 \alpha_1 + V_{\text{N}_2}^m$$

Тогда

$$V_r^\alpha = V_{\text{CO}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + \Sigma V_{\text{N}_2}$$

где $\Sigma V_{\text{N}_2} = 0,79 \alpha_1 V^0 + V_{\text{N}_2}^m$.

Количество сухих продуктов сгорания при $\alpha < 1$ составит

Таблица 1

T	k	T	k
1000	0,7254	1800	3,9670
1100	1,0560	1900	4,3630
1200	1,4320	2000	4,7410
1300	1,8400	2100	5,0970
1400	2,2660	2200	5,4300
1500	2,6990	2300	5,7460
1600	3,1350	2400	6,0390
1700	3,5550	2500	6,3110

По найденному $\varphi_{\text{расч}}$ уточняем теоретическую температуру и среднюю эффективную температуру факела T_{ϕ} .

Степень черноты газификационной камеры горелки определяется в соответствии с [3]

$$a_k = \frac{a_{\phi}}{a_{\phi} + (1-a)\psi_{\text{ср}}},$$

где a_{ϕ} – эффективная степень черноты факела; $\psi_{\text{ср}}$ – коэффициент тепловой эффективности газификационной камеры.

Эффективная степень черноты факела рассчитывается

$$a_{\phi} = ma_{\text{св}} + (1-m)a_r.$$

Величины же $a_{\text{св}}$ и a_r определяются по выражениям:

$$a_{\text{св}} = 1 - e^{-(k_r r_n + k_c)PS};$$

$$a_r = 1 - e^{-k_r r_n PS}.$$

Коэффициент m равен 0,6 для природного газа при $q_v \geq 1000$ кВт/м³.

Коэффициент ослабления лучей для трехатомных газов определяется по формуле [3]

$$k = k_r r_n = \left(\frac{7,8 + 16r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_n S}} - 1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_{\text{к}}''}{1000} \right) r_n.$$

Коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами находим по выражению

$$k_c = 0,3(2 - \alpha_1) \left(1,6 \frac{T_{\text{к}}''}{1000} - 0,5 \right) \frac{C^{\text{P}}}{\text{H}^{\text{P}}},$$

где $\frac{C^{\text{P}}}{\text{H}^{\text{P}}} = 0,12 \Sigma \frac{m}{n} C_m \text{H}_n$.

Эффективная толщина излучающего слоя в газификационной камере горелки вычисляется по формуле

$$s = 3,6 \frac{V_k}{F_{ст}}, \text{ м.}$$

Температуру внутренней ошипованной стенки газификационной камеры горелки рассчитываем [4]

$$T_{ст} = -0,5\sqrt{2}x + \sqrt{\frac{b}{2\sqrt{2}x} - 0,5x},$$

$$\text{где } x = \sqrt[3]{\frac{b^2}{16} + \sqrt{\frac{b^4}{256} + \frac{c^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{b^2}{16} - \sqrt{\frac{b^4}{256} + \frac{c^3}{27}}}.$$

В этих формулах величины b и c равны:

$$b = \frac{R_{ш.с}^{np} \alpha_k + 1}{R_{ш.с}^{np} 5,67 \cdot 10^{-11} \alpha_k};$$

$$c = T_{\phi}^4 + \frac{T_{ср} + R_{ш.с}^{np} \alpha_k T_{\phi}}{5,67 \cdot 10^{-11} \alpha_k R_{ш.с}^{np}}.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией в газификационной камере определяется по формуле [4]

$$\alpha_k = 0,0065 \frac{\lambda_r W_{вх}}{V_r}, \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Приведенное термическое сопротивление ошипованной стенки газификационной камеры горелки находится по выражению [5]

$$R_{ш.с}^{np} = \frac{R_1 R_2}{f_{ш} R_2 + (1 - f_{ш}) R_1},$$

$$\text{где } R_1 = \frac{1}{\alpha_2} + R_{ст} + R_{ш} + R'_n + R_{шл} \approx R_{ш} + R'_n + R_{шл};$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} + R_{ст} + R''_n + R_{шл} \approx R''_n + R_{шл}.$$

Для плоской ошипованной стенки

$$f_{ш} = 0,785 \frac{d_{ш}^2}{s_1 s_2},$$

где $f_{ш}$ – плотность шипования; $d_{ш}$ – диаметр шипа; s_1 – шаг шипов в ряду; s_2 – поперечный шаг шипов.

Термическое сопротивление шипа

$$R_{ш} = \frac{l_{ш}}{\lambda_{ш}},$$

где $l_{ш}$ – длина шипа, м; $\bar{\lambda}_{ш}$ – коэффициент теплопроводности шипа, Вт/(м²·К).

Термическое сопротивление футеровки над шипом

$$R'_H = \frac{\delta'_H}{\bar{\lambda}_H},$$

где δ'_H – толщина футеровки над шипом, м; $\bar{\lambda}_H$ – коэффициент теплопроводности футеровки, Вт/(м²·К).

Термическое сопротивление слоя шлака над шипом $R_{шл}$ при сжигании природного газа равно нулю.

Термическое сопротивление футеровки между шипами определяется по выражению

$$R''_H = \frac{l_{ш} + \delta'_H}{\bar{\lambda}_H}.$$

Суммарное термическое сопротивление шипа и футеровки над шипом равно

$$R_1 = R_{ш} + R'_H.$$

Термическое сопротивление футеровки между шипами и шлаковой пленкой

$$R_2 = R''_H + R_{шл} = R''_H,$$

где $R_{шл} = 0$.

Удельное тепловосприятие стен газификационной камеры горелки

$$q = \alpha_k (T_{ф} - T_{ст}) + 5,67 \cdot 10^{-11} \alpha_k (T_{ф}^4 - T_{ст}^4), \text{ кВт/м}^2.$$

Количество теплоты, воспринятой стенкой газификационной камеры:

$$Q_k^{ст} = \frac{qF_k}{B_r},$$

где F_k – внутренняя поверхность стенки газификационной камеры.

Энтальпия газов на выходе из газификационной камеры горелки

$$I_k'' = \Sigma(Vc)I_k'' = Q_k - Q_k^{ст} = \phi Q_H^p + I_B - Q_k^{ст}.$$

По значению I_k'' находим температуру газов на выходе из камеры по выражению

$$t_k'' = \frac{I_k''}{c_{\Gamma} V_{\Gamma}}.$$

Полученное значение температуры t_k'' сравниваем с предварительно принятым. Расхождение между ними не должно превышать ± 50 °С. В противном случае температуру газов на выходе из газификационной камеры горелки принимаем во втором приближении как среднее арифметическое между $t_k''^{\text{прин}}$, принятой в первом приближении и полученной расчетной

$$t_k''^{\text{расч}}, \text{ т. е. } t_k'' = \frac{t_k''^{\text{прин}} + t_k''^{\text{расч}}}{2}.$$

Температура наружной стенки газификационной камеры горелки со стороны вторичного воздуха определяется по формуле

$$t_{\text{ст}}^{\text{н}} = t_{\text{ст}}^{\text{вн}} - \frac{q}{2\bar{\lambda}_{\text{ст}}^{\text{пр}}} d_1 \ln \frac{d_2}{d_1},$$

где $\bar{\lambda}_{\text{ст}}^{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент теплопроводности ошипованной стенки газификационной камеры горелки, $\bar{\lambda}_{\text{ст}}^{\text{пр}} = \frac{l_{\text{ш}} + \delta'_{\text{н}}}{R_{\text{ш.с}}^{\text{пр}}}$; q – удельное тепловосприятие стенки газификационной камеры, кВт/м²; d_1 – внутренний диаметр газификационной камеры, м; d_2 – то же наружный, м.

Количество теплоты, воспринятой охлаждающим вторичным воздухом, равно

$$Q = V_{\text{в}} c_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}}.$$

Количество теплоты, переданной наружной поверхностью газификационной камеры горелки вторичному воздуху, равно

$$Q = \alpha_{\text{к}} (t_{\text{ст}}^{\text{н}} - t_{\text{об}}) H,$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией со стороны наружной стенки газификационной камеры.

Значение $\alpha_{\text{к}}$ определяется по выражению [6]:

$$\text{Nu} = 0,043 \text{Re}^{0,8}.$$

Откуда

$$\alpha_{\text{к}} = 0,043 \left(\frac{\lambda_{\text{в}} w_{\text{в}}}{\nu_{\text{в}}} \right)^{0,8}.$$

Температура вторичного воздуха после подогрева его в воздушной рубашке газификационной камеры горелки

$$t_{г.в} = t_{в} + \frac{Q}{c_{в} V_{в}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

ВЫВОД

Предложен метод теплового расчета газомазутной горелки для двух-ступенчатого сжигания природного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский В. И., Несенчук А. П., Трусова И. А. Промышленные теплотехнологии. - Мн.: Выш. шк., 1998. - Ч. 3. - 422 с.
2. Шеелюк М. И. Теоретические основы проектирования жидкостных ракетных двигателей. - М.: Оборонгиз, 1960 - 684 с.
3. Липов Ю. М., Самойлов Ю. Ф., Виленский Т. В. Компонка и тепловой расчет парового котла. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 208 с.
4. Жихар Г. И. Физико-химические процессы в газомазутных котлах. - Мн.: Тэхналогія, 2002. - 325 с.
5. Маршак Ю. Л., Рыжак А. В.. Шиповые экраны топок паровых котлов. - М.: Энергия, 1969. - 240 с.
6. Шатиль А. А. Сжигание природного газа в камерах газотурбинных установок. - Л.: Недра, 1972.-232 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 3.02.2003

УДК 536.5

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Докт. техн. наук, проф. ТАЙМАРОВ М.А., инж. ЛАВИРКО Ю.В., ТАЙМАРОВ В.М

Казанский государственный энергетический университет

Имеющиеся в научной и справочной литературе данные по интегральной степени черноты материалов сильно различаются между собой [1,2]. Это обусловлено не только инструментальной погрешностью экспериментов, но и неточностями в описании исходного состояния поверхности, скоростью нагрева, химического состава исследуемых материалов [3,4]. Важным этапом получения надежных данных является разработка методики получения повышенных температур излучающей поверхности при исследовании степени черноты.