

© Лукин С.В., Бахвалов М.А., Антонова Ю.В.,
Мухин В.В., Кузьминов А.Л., 2018

Лукин Сергей Владимирович

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Lukin Sergey Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia).
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Бахвалов Максим Андреевич

Специалист, ПАО «Северсталь»
(Череповец, Россия)
E-mail: ilikepirogok@gmail.ru

Bahvalov Maxim Andreevich

Specialist, PC «Severstal»
(Cherepovets, Russia)
E-mail: ilikepirogok@gmail.ru

Антонова Юлия Валерьевна

Кандидат технических наук, доцент,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: iulia.antonowa2010@yandex.ru

Antonova Yulia Valerievna

PhD in Technical Sciences, Associate
Professor, Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: iulia.antonowa2010@yandex.ru

Мухин Владимир Васильевич

Доктор физико-математических наук,
профессор, Череповецкий государственный
университет (Череповец, Россия)
E-mail: muchinvv@chsu.ru

Muchin Vladimir Vasilievich

Doctor of Physical and Mathematical sciences,
Professor, Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: muchinvv@chsu.ru

Кузьминов Александр Леонидович

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: TSiTB@chsu.ru

Kuzminov Alexander Leonidovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: TSiTB@chsu.ru

**МОДЕЛЬ СЖИГАНИЯ
ДОМЕННОГО ГАЗА
В СМЕШИВАЮЩЕМ
ПОДОГРЕВАТЕЛЕ ПЕРЕД
ГАЗОВОЙ УТИЛИЗАЦИОННОЙ
БЕЗКОМПРЕССОРНОЙ
ТУРБИНОЙ**

**MODEL OF COMBUSTION
OF BLAST FURNACE GAS
IN A MIXING HEATER BEFORE
TOP-PRESSURE RECOVERY
TURBINE**

Аннотация. В данной статье рассмотрена методика расчета горения доменного газа в смешивающем подогревателе перед газовой утилизационной безкомпрессорной турбиной (ГУБТ), представлена модель и определены факторы, влияющие на калорийность газа на выходе из ГУБТ.

Abstract. This article describes a method for calculating the combustion of blast furnace gas in a mixing heater before top-pressure recovery turbine (TRT), a model and the factors influencing the calorie gas outlet TRT are provided.

Ключевые слова: доменный газ, ГУБТ

Keywords: blast furnace gas, TRT

Введение

При выплавке чугуна в доменных печах сопутствующим продуктом является доменный газ. Он используется как газообразное топливо в доменном, коксохимическом и энергетическом производстве. В состав доменного газа входят: монооксид углерода (23–30 %), водород (1,5–9 %), метан (до 0,5 %), азот (45–52 %) и углекислый газ (16–19 %). Технология доменного процесса влияет на формирование его состава. Выход газа при выплавке 1 т чугуна колеблется от 1600 до 2100 м³. Температура воспламенения доменного газа изменяется от 650 до 700 °С и зависит от его состава.

Для использования потенциальной энергии доменного газа, поступающего из доменной печи, используют газовые утилизационные бескомпрессорные турбины (ГУБТ). Часть из них работают без подогрева газа. При включении в схему смешивающего газоподогревателя и увеличении температуры газа перед турбиной происходит повышение ее мощности.

При положительном влиянии роста температуры газа перед ГУБТ на увеличение мощности турбины происходит увеличение температуры газа и снижение его калорийности.

Потребность в создании данной модели обусловлена необходимостью определения калорийности доменного газа, отдаваемого потребителям, и высокой стоимости систем газового анализа.

Основная часть

В модели сжигания доменного газа в смешивающем подогревателе перед ГУБТ задаются следующие параметры:

- объемный состав сухого доменного газа после газоочистки X^c , %;
- влагосодержание газа после газоочистки d_c , г/нм³;
- температура газа после газоочистки t'_r , °С;
- давление газа после газоочистки p_r , МПа;
- температура газа перед ГУБТ t''_r , °С;
- температура воздуха перед смешивающим подогревателем t_a , °С;
- расход доменного газа перед смешивающим подогревателем G'_r , нм³/ч.

Определяемыми параметрами в модели являются следующие величины:

- расход доменного газа сжигаемого перед ГУБТ ΔG_r , нм³/ч;
- расход доменного газа после смешивающего подогревателя G''_r , нм³/ч;
- состав и калорийность доменного газа после смешивающего подогревателя.

Рассмотрим расчетные формулы, входящие в модель сжигания доменного газа в смешивающем подогревателе перед ГУБТ.

Пересчет объемного состава газа с сухого на влажный (рабочий) для доменного газа производится по формуле:

$$X^p = X^c \cdot \frac{100}{100 + 0,124 \cdot d_r},$$

где d_r – влагосодержание газа, г/нм³; X – содержание компонента (CO₂, CO, H₂, N₂, H₂O), % (об.).

Для доменного газа влагосодержание принимают порядка 25–80 г/нм³ [2], причем до смешивающего подогревателя часть влаги находится в виде пара, другая часть – в виде взвешенных капель воды:

$$d_{\text{г}} = d_{\text{г(пар)}} + d_{\text{г(вод)}}.$$

Величина $d_{\text{г(пар)}}$, г/нм³, может быть определена по выражению:

$$d_{\text{г(пар)}} = 1000 \cdot \rho''(t'_{\text{г}}) \cdot \frac{T'_{\text{г}}}{273} \cdot \frac{0,1013}{p_{\text{г}}},$$

где $\rho''(t'_{\text{г}})$ – плотность насыщенного водяного пара, кг/м³, при температуре $t'_{\text{г}}$ (по данным таблицам для воды и пара на линии насыщения); $T'_{\text{г}} = t'_{\text{г}} + 273$, К.

Величина $d_{\text{г(вод)}}$, г/нм³, определяется по выражению:

$$d_{\text{г(вод)}} = d_{\text{г}} - d_{\text{г(пар)}}.$$

Если принять, что основными горючими компонентами в доменном газе являются СО, Н₂, СН₄, то низшая теплота сгорания доменного газа, кДж/нм³, определяется суммированием тепловых эффектов реакций горения по выражению [3]:

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 126 \cdot \text{СО}^{\text{п}} + 108 \cdot \text{Н}_2^{\text{п}} + 358 \cdot \text{СН}_4^{\text{п}}.$$

В первом приближении определяется расход доменного газа, нм³/ч, сжигаемого в смешивающем подогревателе:

$$\Delta G_{\text{г}} \approx \frac{G'_{\text{г}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} \cdot \left(\frac{d_{\text{г(вод)}}}{1000} \cdot r + c_{\text{г}} \cdot (t''_{\text{г}} - t'_{\text{г}}) \right),$$

где $r = 2418$ кДж/кг – теплота испарения воды при 35 °С $t'_{\text{г}} \approx 35$ °С; $c_{\text{г}}$ – теплоемкость доменного газа, кДж/нм³, определяется по формуле:

$$c_{\text{г}} = 0,01 \cdot (\text{СО}_2^{\text{п}} \cdot c_{\text{СО}_2} + \text{СО}^{\text{п}} \cdot c_{\text{СО}} + \text{Н}_2^{\text{п}} \cdot c_{\text{Н}_2} + \text{Н}_2^{\text{п}} \cdot c_{\text{Н}_2} + \text{Н}_2\text{О}^{\text{п}} \cdot c_{\text{Н}_2\text{О}}),$$

где теплоемкость отдельных компонентов c_x , кДж/нм³, определяется по таблицам при средней температуре газа $t_{\text{г}} = (t'_{\text{г}} + t''_{\text{г}}) / 2$.

Далее производится расчет полного сгорания 1 нм³ доменного газа, причем коэффициент избытка воздуха можно принять минимальным: $\alpha = 1$. Теоретический расход сухого кислорода, м³/м³:

$$V_{\text{О}_2}^{\text{о}} = 0,01 \cdot [0,5 \cdot (\text{СО}^{\text{с}} + \text{Н}_2^{\text{с}}) + \text{О}_2^{\text{с}}].$$

Теоретический расход сухого окислителя, м³/м³:

$$V_{\text{ок}}^{\circ} = 100 \cdot V_{\text{O}_2}^{\circ} / O_{2\text{ок}} ,$$

где $O_{2\text{ок}}$ – объемное содержание кислорода в окислителе, % (для атмосферного воздуха 21 %).

Расход сухого окислителя при $\alpha > 1$:

$$V_{\text{ок}} = \alpha \cdot V_{\text{ок}}^{\circ} .$$

Выход сухих трехатомных газов (CO_2), $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (\text{CO}_2^{\text{с}} + \text{CO}^{\text{с}}) .$$

Теоретический выход азота, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{N}_2}^{\circ} = 0,01 \cdot (\text{N}_2^{\text{с}} + \text{N}_{2\text{ок}} \cdot V_{\text{ок}}^{\circ}) ,$$

где $\text{N}_{2\text{ок}}$ – объемное содержание азота в окислителе, % (для атмосферного воздуха 79 %).

Теоретический выход водяных паров, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} = 0,01 \cdot \text{H}_2^{\text{с}} + 0,00124 \cdot (d_{\text{г}} + d_{\text{ок}} \cdot V_{\text{ок}}^{\circ}) ,$$

где $d_{\text{ок}}$ – влагосодержание окислителя, $\text{г}/\text{м}^3$, для атмосферного воздуха можно принять $d_{\text{ок}} = 0,13 \text{ г}/\text{м}^3$.

Выход продуктов полного сгорания при $\alpha > 1$, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^{\circ} + 0,01 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{\text{ок}}^{\circ} \cdot \text{N}_{2\text{ок}} ,$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} + 0,00124 \cdot d_{\text{ок}} \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{\text{ок}}^{\circ} ,$$

$$V_{\text{г}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha - 1) \cdot V_{\text{ок}}^{\circ} .$$

Объемный состав продуктов полного сгорания, %, определяется по формуле:

$$X_{\text{пр}} = 100 \cdot V_X / V_{\text{г}} ,$$

где $X_{\text{пр}}$ – содержание компонента (CO_2 , O_2 , N_2 , H_2O), % (об.); V_X – выход продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Определяется расход воздуха на горение доменного газа, $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$G_{\text{в}} = V_{\text{ок}} \cdot \Delta G_{\text{г}} .$$

Находится более точный расход сжигаемого доменного газа, $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$\Delta G_r = \frac{G'_r}{Q_n^p} \cdot \left(\frac{d_{r(\text{вод})}}{1000} \cdot r + c_r \cdot (t''_r - t'_r) \right) + \frac{G'_b \cdot c_b \cdot (t''_b - t'_b)}{Q_n^p}.$$

Определяется выход продуктов горения доменного газа

$$G_{\text{п.г.}} = V_r \cdot \Delta G_r,$$

и выход отдельных компонентов, $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$G_{X_{\text{пг}}} = 0,01 \cdot X_{\text{пг}} \cdot G_{\text{пг}},$$

где $X_{\text{пг}}$ – содержание компонента (CO_2 , O_2 , N_2 , H_2O), % (об.), в продуктах сгорания.

Расход доменного газа после подогрева перед ГУБТ, $\text{нм}^3/\text{ч}$, находится по формуле:

$$G''_r = G'_r - \Delta G_r + G_{\text{п.г.}}.$$

Определяется расход компонентов перед смешением с продуктами горения, $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$G'_X = 0,01 \cdot X^p \cdot (G'_r - \Delta G_r).$$

Определяется расход каждого компонента в доменном газе после подогрева перед ГУБТ, $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$G''_X = G'_X + G_{X_{\text{п.г.}}}.$$

Определяется объемный рабочий состав доменного газа после подогрева, %:

$$X''_p = \frac{G''_X}{G''_r} \cdot 100.$$

По данному составу определяется теплота сгорания доменного газа на выходе из ГУБТ.

В качестве начальных параметров заданы следующие данные: расход доменного газа перед смешивающим подогревателем – 282 тыс. $\text{м}^3/\text{час}$, влажность газа на выходе из газоочистки – $80 \text{ г}/\text{м}^3$, calorийность газа на выходе из газоочистки на сухой состав – $3719 \text{ кДж}/\text{м}^3$, температура газа на выходе из газоочистки – 40°C , содержание кислорода в дутье 21 %, температура дутья – 30°C [4].

На рисунке представлены полученные зависимости изменения объема и calorийности доменного газа на входе в ГУБТ от изменения степени подогрева доменного газа в смешивающем подогревателе.

По данному графику видно, что при неизменных начальных параметрах и изменении степени подогрева доменного газа перед ГУБТ с 80 до 140°C происходит снижение его calorийности с 3119 до $2984 \text{ кДж}/\text{м}^3$, при этом объем увеличивается до $294,4$ тыс. $\text{нм}^3/\text{час}$.

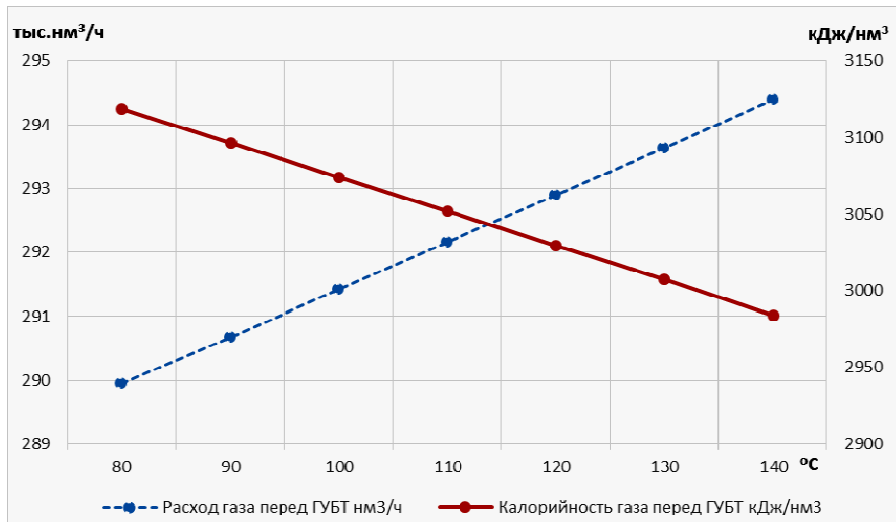


Рисунок. Изменение объема и калорийности доменного газа перед ГУБТ

Выводы

В статье рассмотрена методика расчета горения доменного газа в смешивающем подогревателе перед ГУБТ и проведен анализ влияния степени подогрева доменного газа на его параметры после смешивающего подогревателя. Расчетные данные наглядно показывает влияние параметров горения доменного газа перед ГУБТ на конечный продукт, отпускаемый потребителям.

Литература

1. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
2. Сазанов Б.В., Ситас В.И. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1990. 304 с.
3. ГОСТ 22667-82 Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа воббе.
4. Газовая утилизационная бескомпрессорная турбина типа ГУБТ. URL: <http://www.utz.ru/cgi-bin/catalog/viewgroup.cgi?prigroup=6>.

References

1. Teplovoi raschet kotlov (Normativnyi metod). St Petersburg: NPO TSKTI, 1998. 256 p.
2. Sazanov B.V., Sitas V.I. *Teplo-energeticheskiye sistemy promyshlennykh predpriyatii* [Heat power systems of industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 304 p.
3. GOST 22667-82 *Gazy goriuchiye prirodnyie. Raschetnyi metod opredeleniia teploty sgoraniia, otноситel'noi plotnosti i chisla vobbe* [Combustible natural gases. The calculation method for determining the heat of combustion, the relative density and the number of wobbles].
4. *Gazovaia utilizatsionnaia beskompressornaia turbina tipa GUBT* [Gas utilization recuperator compressor turbine type GUBT]. Available at: <http://www.utz.ru/cgi-bin/catalog/viewgroup.cgi?prigroup=6>.

Для цитирования: Лукин С.В., Бахвалов М.А., Антонова Ю.В., Мухин В.В., Кузьминов А.Л. Модель сжигания доменного газа в смешивающем подогревателе перед газовой утилизационной безкомпрессорной турбиной // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №2(83). С. 18–24. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-2

For citation: Lukin S.V., Bahvalov M.A., Antonova Yu.V., Muchin V.V., Kuzminov A.L. Model of combustion of blast furnace gas in a mixing heater before top-pressure recovery turbine. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 2 (83), pp. 18–24. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-

2