

## МЕТАЛУРГІЯ ЧАВУНУ

УДК 669.162.21:669.041

Анищенко С. А.<sup>1</sup>, Томаш А. А.<sup>2</sup>, Кравченко В. П.<sup>3</sup>

### РАСЧЁТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ В ГОРНЕ ДО- МЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ВДУВАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

*Рассмотрены ближайшие перспективы внедрения пылеугольного топлива (ПУТ) на доменных печах Украины и основные проблемы, связанные с этим. Сформулирована задача дозирования ПУТ. Аргументировано несовершенство существующих формул теоретической температуры горения ( $T_g$ ). Разработана уточнённая формула для расчёта температуры  $T_g$ , учитывающая наиболее важные статьи теплового баланса и влияние различных марок ПУТ.*

**Ключевые слова:** доменная печь, теоретическая температура горения, ПУТ, марки углей, тепловой баланс, дозирование.

*Аніщенко С. О., Томаш О. А., Кравченко В. П. Розрахунок теоретичної температури горіння в горні доменної печі за умови вдування пилоугільного палива. Розглянуті найближчі перспективи впровадження пилоугільного палива (ПВП) в Україні та основні проблеми пов'язані з цим. Сформульоване завдання дозування ПВП. Аргументована недосконалість існуючих формул теоретичної температури горіння ( $T_g$ ). Розроблена уточнена формула для розрахунку температури  $T_g$ , яка враховує найважливіші статті теплового балансу та вплив різних марок ПВП.*

**Ключові слова:** доменна піч, теоретична температура горіння, ПВП, марки вугілля, тепловий баланс, дозування.

*Anischenko S. O., Tomash A. A., Kravchenko V. P. The calculation of theoretical burning temperature in the horn of blast-furnace in case of blowing-in the dust-coal fuel (DCF). The nearest perspectives of inculcation of DCF in Ukraine and main problems with that are considered. The task of dosing of DCF is formulized. The imperfection of existing formulas of theoretical burning temperature ( $T_b$ ) is proved. There is more accurate formula of  $T_b$  that takes in account most important items of thermal balance and influence of different components of DCF worked out. The advantages of developed formula are shown.*

**Keywords:** blast-furnace, theoretical burning temperature, DCF, components of coal, thermal balance, dosing.

**Постановка проблемы.** Перспективные доменные технологии, разрабатываемые в ряде стран мира, базируются на максимальном использовании преимуществ кислородного дутья при соответственном повышении удельного расхода пылеугольного топлива (ПУТ). Варианты технологий определяются методами компенсаций избытка температурного потенциала горна и чрезмерного снижения удельного выхода горновых газов [1].

Внедрение ПУТ на отечественных комбинатах столкнулось с рядом проблем:

- недостаточное качество кокса (низкая горячая прочность);
- низкое качество железорудных материалов;
- недостаточно высокая температура дутья.

Перспективной представляется технология с вдуванием в горн одновременно 3-х различных дополнительных видов топлива [2] (различных марок углей), с различным содержанием

<sup>1</sup> аспирант, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

золы, летучих веществ и др. Задача правильного дозирования ПУТ заключается в выборе компонентного состава угольной шихты с учётом допустимой зольности смеси и стоимости углей. Важнейшим параметром является теоретическая температура горения ( $T_g$ ), которая должна выдерживаться в оптимальных пределах (1900–2200 °С). Её превышение приводит к неустойчивому сходу и подвисанию шихты, снижению показателей работы доменной печи (ДП).

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время практически отсутствует формула для расчёта  $T_g$  с учётом вдувания ПУТ. М. Я. Остроухов, Г. Г. Ефименко, Е. Ф. Вегман, А. Н. Рамм в своих работах [3–7] описывали методику определения  $T_g$ , однако приведенные ими выражения для расчёта  $T_g$  написаны в общем виде и неприменимы для реальных расчётов. С.Л. Ярошевский в [8] приводит конкретную формулу для расчёта  $T_g$  с учётом вдувания ПУТ, которая, однако, не учитывает различные статьи теплового баланса зоны горения: тепла, уносимого золой кокса и ПУТ, прихода тепла с коксом и др. Также формула в [8] неприменима для расчётов в условиях вдувания в горн одновременно 2-х и более различных марок углей. В производственных условиях до сих пор используют эмпирические формулы в виде полиномов, например:

$$T_g = 2405 + 0,75(T_d - 1200) - 5,40W_d + 43,00(w - 21) - 52,00V_{пг}, \quad (1)$$

где  $T_d$  – температура дутья, °С;  $W_d$  – влажность дутья, г/см<sup>3</sup>;  $w$  – содержание кислорода в дутье, %;  $V_{пг}$  – объём вдуваемого природного газа, м<sup>3</sup>/100м<sup>3</sup> дутья.

**Цель статьи** – получение уточнённого выражения для расчёта  $T_g$ , учитывающего наиболее важные статьи теплового баланса зоны горения и влияние различных марок ПУТ.

**Изложение основного материала.** При получении формулы для расчёта  $T_g$  был принят ряд допущений. Тепловой баланс зоны горения (ЗГ) учитывал следующие приходные статьи: тепло горения углерода кокса, природного газа, ПУТ, включая теплоту реакций летучих веществ, физическое тепло дутья, физическое тепло поступающего в ЗГ кокса. Расходные статьи теплового баланса включали теплоту диссоциации пара, тепло, уносимое из ЗГ золой кокса и ПУТ, тепло продуктов горения. Было принято, что зола кокса покидает зону горения с температурой шлака. Зола ПУТ, имея более измельчённую структуру, успевает быстро прогреться и покидает фурменный очаг с температурой горения. Незначительное физическое тепло природного газа, ПУТ и транспортирующего азота не учитывались. В расчёте также не учтены тепловые эффекты реакций окисления элементов чугуна в ЗГ из-за отсутствия достоверной информации о механизме их протекания. Весь тепловой баланс составляли на 1 кг углерода кокса, сгорающего у фурм ( $C_\phi$ ). Было получено следующее уравнение

$$T = \frac{9797 + m_{пут} \bar{q}_{пут} + V_{пг} q_{пг} + V_\phi \left[ (c_\phi + \phi c_{H_2O}) t_\phi - 10806\phi \right] - q_{пл.шл} \left( 0,01 m_{пут} \bar{A}_{пут} + \frac{A_k}{C_k} \right) - t_{шл} c_{шл} \frac{A_k}{C_k} + t_k c_k \frac{100}{C_k} + q_{x.p.} \frac{v_k}{C_k \rho_v}}{c_2 V_\phi + 0,01 c_{шл} \bar{A}_{пут} m_{пут}}, \quad (2)$$

где 9797 – тепло реакции горения углерода до СО, кДж/кг;

$m_{пут}$  – массовый расход ПУТ, кг/кг;

$\bar{q}_{пут}$  – средняя теплота сгорания ПУТ до СО с учётом летучих веществ, кДж/кг;

$\bar{A}_{пут}$  – средняя зольность ПУТ, %;

$V_{пг}$  – объёмный расход природного газа, м<sup>3</sup>/кг;

$C_\phi$  – тепловой эффект реакции неполного сгорания природного газа,  $q_{пг} = 1694$  кДж/м<sup>3</sup>;

$V_d$  – объёмный расход дутья, м<sup>3</sup>/кг;

$C_\phi$ ;  $c_d$ ,  $c_{H_2O}$ ,  $c_r$  – теплоёмкости дутья, водяного пара, продуктов горения, кДж/(м<sup>3</sup>·°С);

$\phi$  – влажность дутья, дол.ед.;  $t_d$  – температура дутья, °С;

$q_{пл.шл}$  – теплота плавления шлака, кДж/кг;

$A_k$ ,  $C_k$  и  $v_k$  – содержание золы, углерода и летучих веществ в коксе, %;

$c_{шл}$  и  $c_k$  – теплоёмкость шлака и кокса, кДж/(кг·°С);

$t_{шл}$  – температура шлака,

$t_{шл} = 1500$  °С;

$t_k$  – температура поступающего в зону горения кокса,

$t_{\Sigma} = 1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho_V$  – средняя плотность летучих веществ,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $q_{x.p.}$  – суммарный тепловой эффект реакций летучих,  $\text{кДж/м}^3$ ;  
 $V_r$  – объём продуктов горения,  $\text{м}^3$ .

На основании формулы (1) был построен ряд графиков (рис. 1, рис. 2).

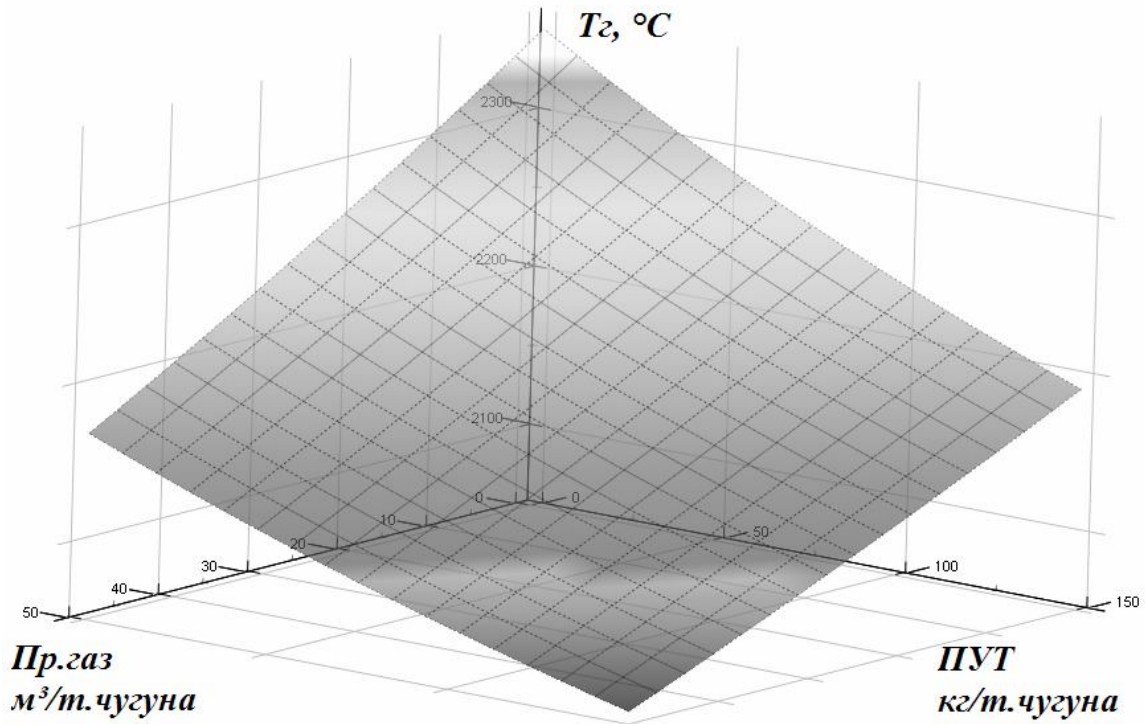


Рис. 1 – Зависимость теоретической температуры горения от расхода природного газа и ПУТ.

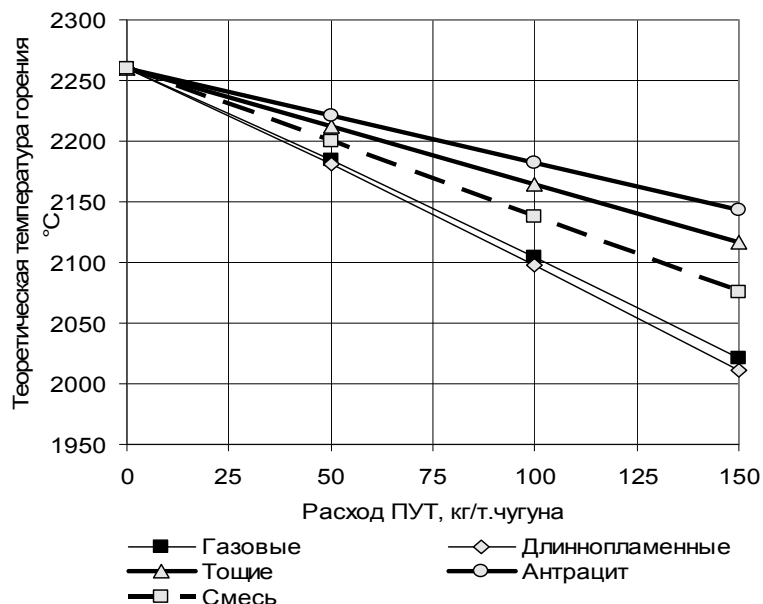


Рис. 2 – Зависимость температуры горения от расхода ПУТ из углей различных марок.

Из рисунков 1 и 2 видно, что увеличение расхода ПУТ снижает теоретическую температуру горения, однако в меньшей степени, чем вдувание природного газа. При этом различные марки углей по-разному снижают  $T_g$ . Наиболее сильное влияние на  $T_g$  оказывают газовые и длиннопламенные угли. Снижение  $T_g$  при вдувании тощих углей и антрацита значительно меньше.

Для упрощённого расчёта теоретической температуры горения можно предложить следующее линеаризованное уравнение, аналогичное формулам, применяемым на металлургических комбинатах

$$T_g = 2240 + 0,67(T_d - 1200) - 4,90W_d + 48,8(\omega - 21) - 60,6ПГ - 22,5Г - 24,8Д - 12,9Т - 9,8А, \quad (3)$$

где Г, Д, Т, А – массы углей ПУТ газовых, длиннопламенных, тощих и антрацита соответственно, кг/т.чугуна.

Следует отметить близкое сходство формулы (3) с промышленной формулой (1), используемой в настоящее время на металлургическом комбинате «Азовсталь».

В дальнейшем перспективными направлениями исследования могут быть разработки методов зонального теплового баланса горна доменной печи, а также систем автоматического дозирования компонентов ПУТ, автоматического управления тепловыми процессами горна доменной печи, автоматического поддержания оптимальных (с точки зрения себестоимости) параметров в реальном времени.

### **Выводы**

1. Получено уточнённое выражение для расчёта температуры  $T_g$ . Выражение учитывает использование ПУТ из углей различных марок, а также содержит неучитываемые ранее статьи теплового баланса (теплота реакций летучих веществ, тепло уносимое золой кокса и ПУТ, физическое тепло кокса и др.)
2. Результаты расчётов соответствуют известным фактам влияния ПУТ на теоретическую температуру горения  $T_g$ . Разработанная формула более качественно описывает процессы в фурменном очаге доменной печи.
3. Разработанное выражение для расчёта температуры  $T_g$  открывает возможность для создания системы автоматического управления тепловым балансом горна при помощи дозирования компонентов ПУТ.

### **Список использованных источников:**

1. Ноздрачев В. А. Перспективные технологии доменной плавки с применением кислорода и пылеугольного топлива. / В. А. Ноздрачев, С. Л. Ярошевский, В. П. Терещенко – Донецк: Новый мир, 1996. – 174 с.
2. Технология доменной плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива, природного газа и кислорода. / А. Н. Рыженков, А. И. Ковалёв, С. Л. Ярошевский и др. – Донецк: Новый мир, 2003 – 35 с.
3. Остроухов М. Я. Справочник мастера-доменщика. / М. Я. Остроухов, М. Я. Шпарбер. – М.: Металлургия, 1977. – 304 с.
4. Ефименко Г. Г. Металлургия чугуна. Изд. 2 / Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб, В. Е. Левченко. – Киев: Вища школа, 1974. – 488 с.
5. Вегман Е. Ф. Краткий справочник доменщика. / Е. Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
6. Вегман Е. Ф. Металлургия чугуна. / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев и др. – М.: Металлургия, 1989. – 512 с.
7. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. / А. Н. Рамм. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
8. Ярошевский С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. / С. Л. Ярошевский – М.: Металлургия, 1988. – 176 с.

Рецензент: В. А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 27.11.2009