

УДК 669. 162

*д.т.н. Новохатский А. М.,
к.т.н. Должиков В. В.,
к.т.н. Диментьев А. О.,
Падалка А. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

О РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДИКАХ РАСЧЕТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ

Проведен анализ методик расчета теоретической температуры горения топлива в доменной печи для установления причин различия в результатах.

Ключевые слова: доменная печь, расчетные параметры доменной плавки, теоретическая температура горения топлива, методики расчета теоретической температуры, теплоемкость газов.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Теоретическая температура горения (t_T) — один из важных расчетных параметров доменной плавки, необходимых для технологического анализа. Ее абсолютные значения и изменения позволяют оценивать тепловые и газодинамические условия, складывающиеся в нижней части доменной печи. При создании математических моделей доменного процесса расчеты теплообмена между потоками шихты и газа невозможны без использования этого параметра.

Методика расчета t_T , основанная на тепловом балансе зоны горения топлива в горне, в целом не вызывает сомнений и описана достаточно подробно в литературе (например [1]). Для составления баланса используют:

- ряд постоянно контролируемых параметров дутья и вдуваемого через фурмы дополнительного топлива;
- физические характеристики веществ и процессов в зоне горения, принимаемые по справочным данным;
- различные допущения, количество которых варьируется в широких пределах (упрощение температурных зависимостей теплоемкостей газов; адиабатность процессов в зоне; постоянство физико-химических характеристик дополнительного топлива;

пренебрежение теплотой окисления чугуна, проходящего через зону, и т. д.).

Стремление облегчить расчет t_T за счет не всегда обоснованных допущений привело к появлению эмпирических формул [2, 3]. Некоторые из них максимально упрощены, что при современном доступе к вычислительной технике нельзя признать серьезным аргументом.

Изложение материала и его результаты.

В качестве примера, для сопоставительного анализа были выбраны следующие формулы (номера формул соответствуют номерам источников в списке литературы [1–3]).

Кроме того, сделаны расчеты по методикам [4, 5] на базе тепловых балансов. Базовым вариантом для расчетов служили следующие условия:

- температура сухого дутья 1000°C ;
- содержание кислорода в дутье 21 %;
- дополнительные топлива не вдувают;
- температура углерода кокса, поступающего в зону горения, $t_{\text{СК}} = 1500^\circ\text{C}$.

Результаты расчетов представлены в таблице.

Следует добавить, что формулы (2), (2'), (3) — эмпирические (в таблице текст выделен курсивом). Расчеты по этим формулам ориентированы в основном на оценку вариаций теоретической температуры при изменениях технологических параметров.

$$t_T = \{0,9341t_d + 8208 \omega - \varphi(2402 - 1,2177 t_d) - (1,9322 + 2,235W^P)S_{ж} - (0,39 + 2,2175C_T^P)S_{ТВ} - 2673S_{Г} + 94,76\} / \{1 + \omega + 2\varphi + (0,0012 + 0,0013W^P)S_{ж} + 0,0005S_{ТВ} + 2,026S_{Г}\}, \quad (1)$$

где t_d , φ , ω — параметры дутья: температура, °С; влажность, м³/м³; содержание кислорода, м³/м³;

$S_{ж}$, $S_{ТВ}$, $S_{Г}$ — расход жидкого, твердого (кг), газообразного (м³) вдуваемого топлива на 1 м³ сухого дутья;

C_T^P — содержание углерода, в элементарном составе рабочей массы топлива (кг/кг).

$$t_T = 2405 + 0,75 (t_d - 1200) - 5,40 \varphi + 43,0 (\omega - 21) - 52,0 D; \quad (2)$$

$$t_T = 2240 + 0,67 (t_d - 1200) - 4,90 \varphi + 48,8 (\omega - 21) - 60,6 D - 22,5Г - 24,8Д - 12,9Т - 9,8А; \quad (2')$$

$$t_T = 2000 + 0,75 (t_d - 1100) + 40 (2 - \varphi) + 50 (\omega - 25) + 53 (9 - D) - 26 КГ - 4 М, \quad (3)$$

где D — расход природного газа, % к дутью;

$Г$, $Д$, $Т$, $А$ — массы углей ПУТ газовых, длиннопламенных, тощих и антрацита соответственно, кг/т чугуна;

$КГ$ — расход коксового газа, % к дутью;
 $М$ — расход мазута, г/м³ дутья.

Таблица

Расчетные значения теоретической температуры (°С) и ее вариации Δt (°С) при изменениях технологических параметров

Параметры дутья		Метод расчета (по списку литературы)						
		1	2	2'	3	[4]	[5]	[7]
базовый вариант		2275	2255	2106	2282	2248	2226	
Изменения параметров	+1 % ω	2323	2298	2155	2332	2299	2272	—
	Δt	48	43	49	50	51	46	48
	+100 °С	2352	2330	2173	2357	2325	2304	—
	Δt	77	75	67	75	77	78	81
	+1% φ	2228	2212	2067	2242	2162	2179	—
	Δt	-47	-43	-39	-40	-86	-47	-49

Примечание: в [7] базовый вариант — $t_d=1130^\circ\text{C}$; $\omega=30\%$; $\varphi=1\%$; $D=15\%$; $t_{CK}=1400^\circ\text{C}$. Результаты расчета цитируются.

Результаты расчета по эмпирическим формулам существенно различаются по абсолютной величине, что делает их непригодными для сопоставительного анализа.

Формулы (1), [4, 5] получены из тепловых балансов зоны горения с различными допущениями, но дают более однородные результаты. Тем не менее разность в зна-

чениях, по нашему мнению, довольно ощутимая, требующая объяснений. (Завышенное, в сравнении с другими, влияние влажности дутья, вероятно, связано с ошибками в формуле [4]. В частности, при определении количества горнового газа за счет влаги дутья.)

При определении теоретической температуры на основе теплового баланса исходят из энтальпии горнового газа, равной приходу тепла в зону горения:

$$Q_{\Sigma} = V_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma},$$

где Q_{Σ} — приход тепла в зону горения;
 V_{Γ} , c_{Γ} — количество и теплоемкость горнового газа.

Совпадение результатов определения количества и состава горнового газа по разным методикам обусловлено материальным балансом. Теплоемкость смеси газов устанавливается количественным и качественным составом смеси и, что важно для дальнейшего, температурой. Это позволяет утверждать, что при одинаковых исходных данных для расчета получение различных значений t_{Γ} определяется разными значениями Q_{Σ} и (или) температурными зависимостями c_{Γ} .

На рисунке показаны температурные зависимости энтальпии (теплосодержания) дутья и горнового газа ($c_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma}$), предлагаемые в расчетах по методикам [1], [4], [5].

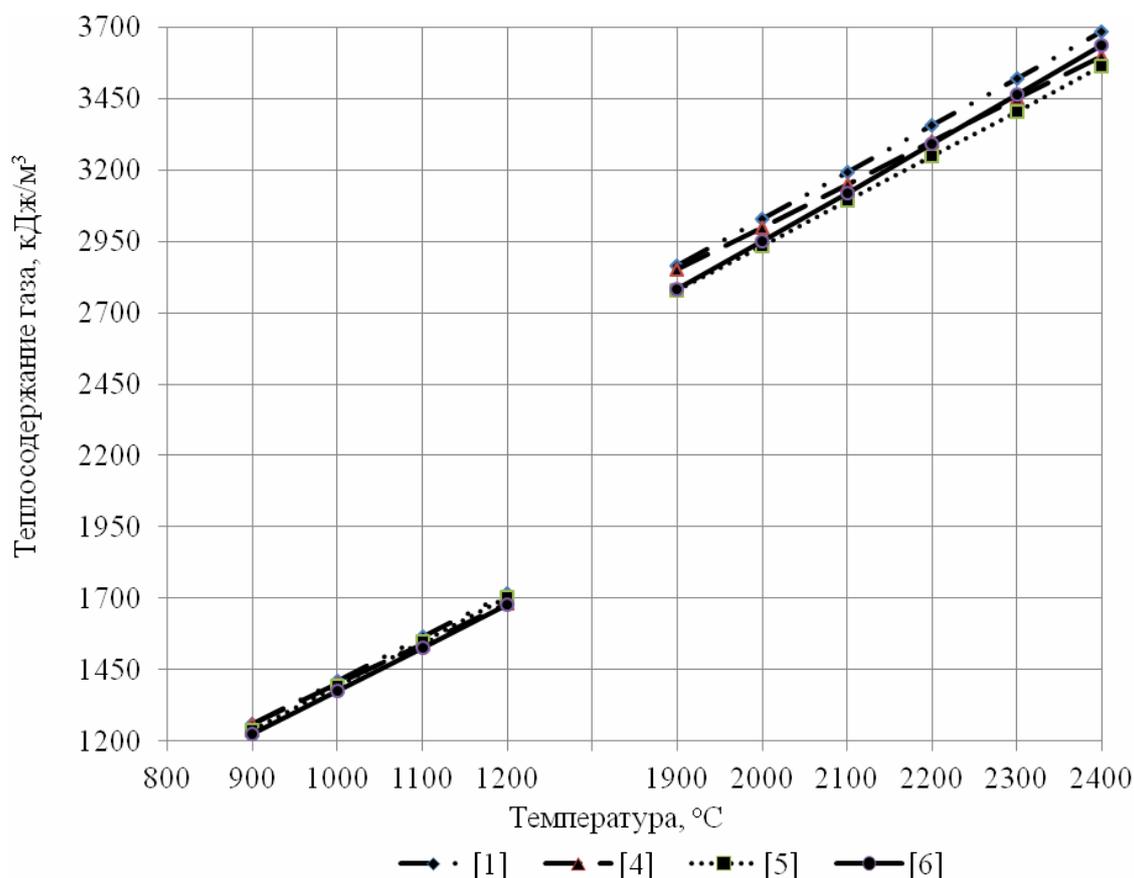


Рисунок Зависимость энтальпии дутья ($\omega = 21\%$; $\varphi = 0$) и горнового газа ($N_2 = 65,3\%$; $CO = 34,7\%$) от температуры

Эти зависимости являются линейными и, по мнению авторов, достаточно точно аппроксимируют нелинейность связи. Оценку качества приближения можно про-

вести сопоставлением с каноническим расчетом по уравнениям (нелинейным), приведенным в справочниках по металлургической термохимии [6].

Разница в расчетном теплосодержании дутья ($t_d = 1000^\circ\text{C}$) по разным методикам достигает 2 %, в расчетном теплосодержании горнового газа — до 3 %. Следует отметить удовлетворительное совпадение оценок влияния изменения основных параметров дутья на рассчитанную по разным балансовым методикам теоретическую температуру.

Полученные результаты показывают существенное влияние различия в используемых уравнениях температурной зависимости теплоемкости газов на величину теоретической температуры и, вероятно, отвечают на вопрос о главной причине несовпадения расчетных значений t_r .

По нашему мнению, уверенность в сопоставимости и абсолютных значений теоретической температуры представила бы возможность качественного анализа

результатов работы разных доменных печей.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Используемые методики расчета определяют как различные значения теоретической температуры, так и ее изменения под влиянием изменений технологических параметров.

2. Результаты расчета по эмпирическим формулам существенно различаются по абсолютной величине, что делает их непригодными для сопоставительного анализа.

3. Показано существенное влияние различия в используемых уравнениях температурной зависимости теплоемкости газов на величину теоретической температуры, что может служить главной причиной несовпадения расчетных значений t_r в разных методиках.

Библиографический список

1. Дунаев, Н. Е. Расчеты теоретической температуры фурменных газов в доменной плавке на дутье с добавками, обогащенном кислородом [Текст] / Н. Е. Дунаев, Т. И. Кухтин // *Сталь*. — 1977. — № 7. — С. 600–604.
2. Анищенко, С. А. Расчёт теоретической температуры горения в горне доменной печи при вдувании пылеугольного топлива [Текст] / С. А. Анищенко, А. А. Томаш, В. П. Кравченко / *Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки*. — 2010. — Вип. 20. — С. 25–28.
3. Волков, Ю. П. Технолог-доменицик [Текст] : справочник / Ю. П. Волков, Л. Я. Шпарбер, А. К. Гусаров. — М. : *Металлургия*, 1986. — 263 с.
4. Кассим, Д. А. Определение теоретической температуры горения при вдувании в горн доменной печи природного газа и пылеугольного топлива [Текст] / Д. А. Кассим, В. П. Лялюк, А. К. Тараканов, Б. С. Листопадов, Д. В. Пинчук // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2016. — № 2. — С. 38–43.
5. Писи Дж. Г. Доменный процесс. Теория и практика [Текст] / Дж. Г. Писи, В. Г. Давенпорт. — М. : *Металлургия*, 1984. — 142 с.
6. Кубашевский, О. *Металлургическая термохимия* [Текст] / О. Кубашевский, С. Б. Оллок. — М. : *Металлургия*, 1982. — 392 с.
7. Клименко, В. А. *Основы физики доменного процесса* [Текст] / В. А. Клименко, Л. С. Токарев. — Челябинск : *Металлургия*, 1991. — 288 с.

© Новохатский А. М.

© Должиков В. В.

© Диментьев А. О.

© Падалка А. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В.,
нач. доменного цеха ПАО «АМК» Диментьевым В. И.*

Статья поступила в редакцию 13.10.17.

д.т.н. Новохатський О. М., к.т.н. Должиков В. В., к.т.н. Діментьєв О. О., Падалка О. В.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ПРО РІЗНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ТЕОРЕТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ

Проведено аналіз методик розрахунку теоретичної температури горіння палива в доменній печі для встановлення причин відмінності у результатах.

Ключові слова: *доменна піч, розрахункові параметри доменної плавки, теоретична температура горіння палива, методи розрахунку теоретичної температури, теплоємність газів.*

Doctor of Tech. Sc. Novokhatskiy A. M., PhD Dolzhikov V. V., PhD Dimentiev A. O., Padalka A. V.
(DonSTU, Alchevsk, LPR)

VARIOUS METHODS FOR CALCULATING THEORETICAL TEMPERATURE OF COMBUSTION

Analysis has been given for theoretical temperature calculation methods upon fuel combustion in the blast furnace to determine the reason of final results variations.

Key words: *blast furnace, design parameters of blast furnace melting, theoretical temperature of fuel combustion, theoretical temperature calculation method, heat capacity of gases.*