

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ–ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ**

Расчетами с помощью разработанной многозонной модели установлен S-образный характер изменения температур шихты и газа по высоте печи–газогенератора и показаны изменения теплотребляющих процессов по высоте агрегата при разных режимах работы и использовании различных шихтовых материалов.

Введение

Согласно практическим данным работы газогенераторов с жидким шлакоудалением, температура выходящего из столба шихты газа колеблется в пределах 500–800⁰С. Однако такая высокая температура шахтного газа в колошниковом пространстве недопустима по условиям службы оборудования загрузки. Анализ влияния параметров газификации на показатели процесса показал, что наиболее эффективно снижение температуры шахтного газа достигается путём уменьшения температуры дутья и увеличения расхода твёрдых «охладителей» [1]. При использовании доменной печи в режиме газогенератора наиболее доступными и реальными являются два варианта работы:

1. Без рециркуляции газов на неподогретом дутье (200⁰С) с обогащением дутья кислородом до 23 %.
2. С рециркуляцией газов на неподогретом дутье (200⁰С) с обогащением дутья кислородом до 23 %.

В первом случае количество и теплоемкость «охладителей» обеспечивают снижение температуры отходящих из шахты газов до 300⁰С, во втором случае до 500⁰С, а остальное тепло отбирается подачей в подколошниковое пространство рециркулирующего газа.

Методика исследования

Для изучения температурного поля и тепловой работы доменной печи–газогенератора была разработана методика расчёта, основанная на совмещении систем уравнений общего и многозонного материально–теплового баланса при описании теплообмена простыми зависимостями.

Результаты общего материально–теплового баланса стали исходными данными при составлении многозонного расчёта процессов теплообмена и распределения температур по высоте доменной печи–газогенератора.

В основу методики зонального расчёта была положена кинетико–математическая модель, разработанная ранее [2], в которой расчёт материально–тепловых характеристик производится последовательно в 12 температурных зонах по высоте печи: 1–я зона – температура шихты от загрузки до 400⁰С, далее через каждые 100⁰С. В каждой зоне определяется

объём материалов и время их пребывания, а также температура и состав входящих и выходящих газов.

Итерационный цикл организован по уточнению сходимости суммарного времени пребывания материалов в печи (τ_{Σ}) и времени пребывания, вычисленного по производительности печи и плотности материалов ($\tau_{пл}$).

Несмотря на то, что количество загружаемых твёрдых «охладителей» (сварочный, конвертерный шлаки, шлак силикомарганца, металлодобавка) отвечают температуре шахтного газа, в ходе итераций варьируется и уточняется температура колошникового газа, поскольку погрешность при варьировании коэффициентом теплопередачи α_0 оказывает большее влияние на результаты расчётов распределения температур, чем равная ей по абсолютной величине погрешность при варьировании температурой колошника.

Значение температуры колошникового газа меняется в каждой итерации. Цикл оканчивается при $(\tau_{\Sigma} - \tau_{пл}) < 0,1$ по абсолютной величине.

Программирование методики зонального расчёта процессов по высоте доменной печи–газогенератора выполнялось в системе MathCAD.

В ходе расчетов варьировали состав «охладителей» и флюсов (табл.1). В качестве «охладителей» использовали шлак силикомарганца (ШСМ), металлсодержащую фракцию конвертерного шлака текущего производства (МСФ_т), металлический скрап сталеплавильный (МСС), а в качестве флюса – конвертерный шлак текущего производства (КШ_т) и известняк (Изв). Всего рассчитаны параметры для 4 вариантов шихт.

Таблица 1. Химический состав «охладителей» и флюсов

	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	Fe _{мет}
Шлак SiMn	44,0	20,0	5,5	6,5	19,4	–	–
Конвертерный шлак	22,2	37,8	6,5	2,8	6,1	17,0	1,0
Металлический скрап	1,5	3,0	0,1	0,3	0,1	5,0	90,0
Металлсодержащая фракция конвертерного шлака	14,2	18,1	3,65	4,5	3,8	4,5	40,5
Известняк	1,4	51,14	2,58	0,26	–	–	–

Каждый из шихтовых вариантов рассчитан при разных режимах газификации:

- температура шахтного газа 500⁰С без нагрева дутья (200⁰С), с рециркуляцией шахтного газа и обогащением дутья кислородом до 23 %;
- температура шахтного газа 300⁰С без нагрева дутья (200⁰С), без рециркуляции шахтного газа, с обогащением дутья кислородом до 23 %.

Все расчеты выполнены для четырёх видов топлива – тощий уголь, антрацит, коксовый «орех» и полукокс (табл. 2).

Таблица 2 – Химический состав топлив

Топливо	W^p	A^p	H^p	O^p	N^p	S^p	C^p	$C^{нелет.}$
Антрацит	5,0	7,0	2,73	0,79	1,50	1,4	81,58	81,0
Тощий	5,0	24,0	3,1	1,7	0,9	2,0	63,3	62,0
Коксовый «орех»	4,0	12,0	0,5	0,67	1,0	1,2	80,63	80,13
Полукокс	3,0	30,0	1,8	1,9	1,4	2,0	59,9	58,5

Анализ полученных результатов

Результаты расчётов подтверждают S-образный характер изменения температур шихты и газа по высоте печи с более или менее выраженной зоной замедленного теплообмена.

Схема теплообмена в доменной печи–газогенераторе носит классический двухступенчатый характер. Согласно этой схеме в верхней ступени теплоемкость газа превышает теплоемкость шихты и далее по мере опускания и прогрева шихты разность температур шихты и газов уменьшается до некоторого минимального значения, при котором отношение теплоемкостей шихты и газов близко, либо переходит через 1,0, после чего теплоемкость шихты становится выше теплоемкости газов, и разность температур вновь увеличивается (нижняя ступень). Увеличение теплоемкости шихты обусловлено ростом теплопотребляющих процессов, а последующее ее снижение – завершением этих процессов в нижних горизонтах печи.

Различие физико–химических свойств шихтовых материалов каждого из вариантов, обуславливает изменение общей теплопотребности, что вносит свои особенности в ход теплообменных процессов (табл.3). Общим для всех вариантов является то, что в ряду углей Антрацит – Коксовый «орех» – Тощий – Полукокс сокращается количество углерода на 1 кг угля, сгорающего у фурм, что сопровождается уменьшением выхода фурменного газа и соответствующим уменьшением теплоемкостей потоков материалов и газов.

Варианты без рециркуляции газа

На распределение температур по высоте доменной печи–газогенератора наиболее сильное влияние оказывает отношение значений теплоемкостей потоков шихты и газа, которое в свою очередь зависит от затрат теплоты на восстановление железа, трудновосстановимых оксидов, разложение известняка, содержания нелетучего углерода в углях, соотношения количества газа и компонентов шихты. Для всех исследуемых вариантов шихт, расположение границы между верхней и нижней тепловыми зонами, где выравниваются теплоемкости потоков шихты и газов, и

Таблица 3 –Теплопотребность процессов, кДж/кг угля при различных вариантах шихты (в знаменателе варианты с рециркуляцией газов)

«Охладитель»/флюс	Топливо	q_{r_d}	$q_{CaCO_3} + q_{MgCO_3}$	q_L	q_{Σ}
ШСМ / КШГ	Коксовый «орех»	908,0 / 768,6	0/-	871,0 / 722,3	5198,9 / 4357,4
	Антрацит	871,6 / 720,7	0/0	892,9 / 728,3	5196,2 / 4279,9
	Тощий уголь	730,3 / 609,9	0/0	607,7 / 478,5	3902,5 / 3174,6
	Полукокс	764,6 / -	0/-	533,8 / -	3671,5 / -
МСФТ / КШГ	Коксовый «орех»	489,6 / 445,2	0/-	775,5 / 647,7	5165,5 / 4333,4
	Антрацит	396,4 / 356,2	0/-	778,7 / 649,7	5088,7 / 4250,1
	Тощий уголь	528,4 / 513,4	0/0	574,3 / 460,7	3875,9 / 3160,3
	Полукокс	713,7 / -	0/-	526,4 / -	3667,6 / -
ШСМ / Изв	Коксовый «орех»	69,6 / 66,4	1700,0 / 1419,2	625,0 / 514,9	4167,3 / 3482,3
	Антрацит	- / 30,7	- / 1393,7	- / 520,4	- / 3413,5
	Тощий уголь	112,2 / 109,5	1253,3 / 1010,8	420,3 / 324,7	3135,6 / 2541,9
	Полукокс	- / 154,8	- / 1013,4	- / 269,2	- / 2390,9
МСФТ / Изв	Коксовый «орех»	400,8 / 334,4	91,9 / 130,2	757,6 / 625,2	5088,8 / 4250,7
	Антрацит	373,9 / 306,3	63,8 / 68,9	749,7 / 636,3	5075,6 / 4207,2
	Тощий уголь	304,3 / 243,2	283,3 / 342,0	521,2 / 397,3	3693,2 / 2945,4
	Полукокс	289,4 / 236,8	589,6 / 620,3	405,1 / 299,4	3285,4 / 2622,1

q_{rd} – тепло прямого восстановления железа, кДж/кг угля;

q_L – тепло восстановления Si , Mn , P и перелода серы в шлак, кДж/кг угля;

q_{CaCO_3} , q_{MgCO_3} – тепло диссоциации карбонатов и взаимодействия CO_2 с углеродом, кДж/кг угля;

q_{Σ} – суммарная теплопотребность шихты, кДж/кг угля.

меняется характер теплообмена между ними, находится в интервале температур 870–910⁰С и определяется в зависимости от состава шихты началом реакций разложения известняка, прямого восстановления и восстановления CO₂.

Использование шлака силикомарганца имеет две особенности. Во-первых, его состав характеризуется отсутствием оксидов железа и высоким содержанием MnO, реакция восстановления которого $MnO+C=Mn+CO-267,537$ кДж/моль начинается протекать при 1350–1400⁰С и вызывает снижение температуры в горне. Во-вторых, в комбинации с конвертерным шлаком или известняком в зоне температур 900–1350⁰С увеличивается отношение $W_{ш}/W_{г}$. Это вызвано значительным повышением затрат на прямое восстановление оксидов железа конвертерного шлака или затрат тепла на разложение известняка (рис.1).

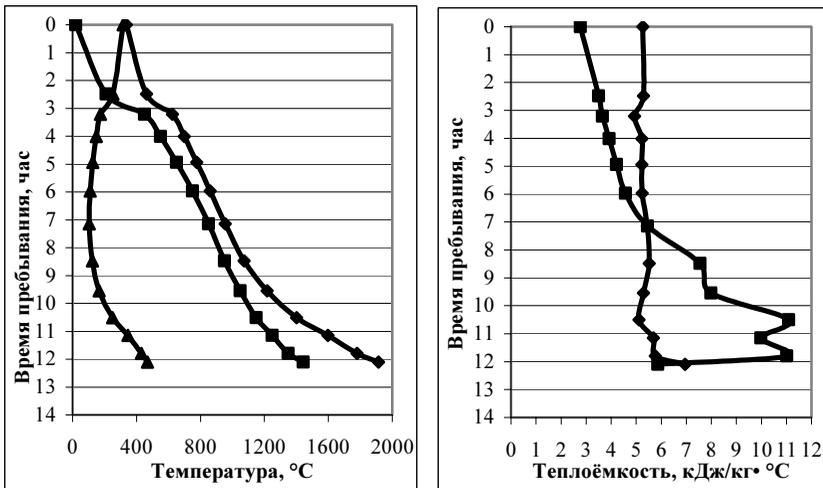


Рис.1. Распределение температур и теплоёмкостей потоков шихты и газа при газификации антрацита ШСМ/КШГ.

(◇–газ; □–шихта; Δ–разность температур)

Состав МСФт близок к самоплавкому, поэтому расход флюса (КШ, Изв) определяется количеством необходимым для офлюсования золы угля. Таким образом, с увеличением зольности угля и при использовании в качестве флюса известняка, газ обогащается диоксидом углерода, что приводит помимо затрат теплоты на разложение карбонатов к развитию реакции $C+CO_2=2CO-165,797$ кДж/моль и обусловленного этим изменением теплоёмкости потоков шихты и газа по высоте противотока (табл. 4).

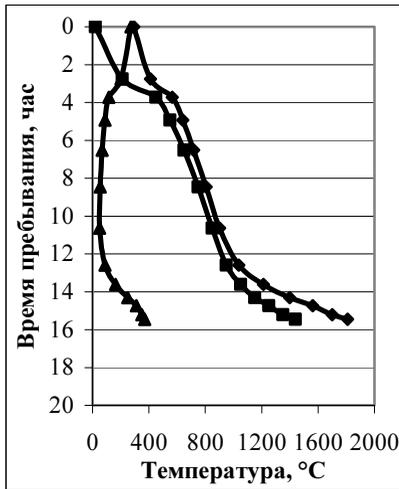
Таблица 4. Изменение отношения теплоёмкости потока шихты и газов в зависимости от состава шихтовых материалов

Расход «охладитель» / флюс, кг/кг угля	Антрацит		Полукокс	
	МСФт/КШт	МСФт/Изв	МСФт/КШт	МСФт/Изв
	2,532/0,055	2,562 /0,025	0,262 /1,068	0,997 /0,231
Температура в зоне:				
900–1000 ⁰ С	0,971	0,972	1,03	1,00
1000–1100 ⁰ С	1,143	1,183	1,47	1,74
1100–1200 ⁰ С	1,304	1,334	1,62	1,75

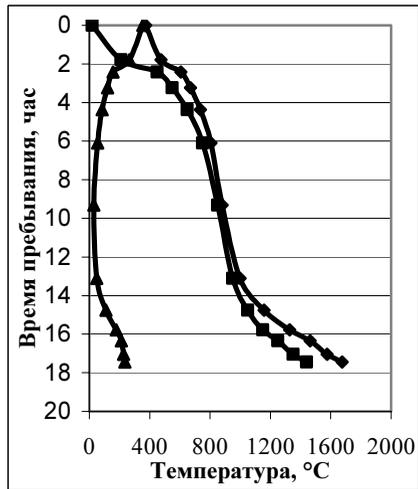
Варианты с рециркуляцией газа.

В вариантах с рециркуляцией газов температура шахтного больше, чем в вариантах без рециркуляции, что достигается меньшим расходом «охладителей». Это сказывается на характере теплообмена. Уменьшается отношение теплоёмкостей потока шихты и газов, что обусловлено следующими факторами:

– увеличивается выход газа на единицу угля, что связано с уменьшением расхода углерода на процессы прямого восстановления;



а



б

Рис.2. Изменение температуры материалов и газов во времени пребывания материалов в печи при газификации полукокса МСФт/Изв (а – без рециркуляции; б – то же с рециркуляцией газа)

– за счёт снижения расхода «охладителей» уменьшаются затраты теплоты на прямое восстановление железа, трудновосстановимых оксидов, диссоциацию карбонатов.

Из этого следует, что уменьшение величины $W_{ш}/W_T$ приводит к перемещению точки пересечения $W_{ш}$ и W_T в зону с более высокой температурой 900–1000⁰С.

Разность температур газов и материалов изменяется согласно закономерностям теплообмена по кривой с минимумом, соответствующим температурной границе двух зон теплообмена. В вариантах с рециркуляцией газа, увеличение времени пребывания шихты в печи при уменьшении рудных нагрузок приводит к уменьшению градиентов температур и распределение температур по высоте доменной печи–газогенератора становится ближе к классической схеме профессора Китаева Б.И.(рис. 2).

Заключение

Выполненные по разработанной методике аналитические исследования позволили установить следующие закономерности:

1. Установлен S–образный характер распределения температур по высоте доменной печи–газогенератора.

2. В вариантах без рециркуляции газов тепловой режим близок к выплавке передельного чугуна в доменной печи.

3. В вариантах с рециркуляцией газов за счёт уменьшения расхода «охладителей» температурное поле аналогично распределению температур при выплавке в доменной печи ферросплавов.

Полученные знания помогут определять наилучшие режимы газификации угля с учетом различных ограничений.

1. *Товаровский И.Г., Меркулов А.Е., Вышинская Е.Д.* Возможность использования доменной печи в качестве газогенератора некоксующих углей // *Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов НМетАУ. В двух книгах.– Книга вторая.*–Днепропетровск: Пороги, 2005. С. 333–348
2. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: Пороги, 2003.– 596 с.

Статья рекомендована к печати к.т.н. И.Г.Муравьевой