

## ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE Standard for Binary Floating-Point Arithmetic. — New York, 1985. — 23 p.
2. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. — New York, 2008. — 70 p.
3. IEEE floating point – Wikipedia, the free encyclopedia. – Режим доступа : [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_floating\\_point](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_floating_point).
4. Оцінка точності обчислень спеціальних функцій при розробці комп'ютерних програм математичного моделювання / О. Я. Ніконов, О. В. Мнушка, В. М. Савченко // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск : Інформатика і моделювання. — Харків : НТУ. — 2011. — № 17. — С. 115—121.
5. Кулямин В. В. Формальные подходы к тестированию математических функций // Труды ИСП РАН. — 2006. — № 10. — С. 69—114.
6. Аноприенко А. Я., Иваница С. В. Гибкая разрядность и постбинарные форматы представления вещественных чисел // Вестник Инженерной Академии Украины. Теоретический и научно-практический журнал Инженерной Академии Украины. Выпуск 1. — Киев, 2012. — С. 92—98.
7. Жульковский О. О., Жульковська І. І. Зображення чисел з плаваючою комою у сучасних комп'ютерах // Тези доп. Міждерж. науково-метод. конф. «Проблеми математичного моделювання». — Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2011. — С.134.

пост.25.09.13

## Алгоритмы модернизированного управления доменным процессом Публикация VIII. Логико-математическое моделирование технологических перспектив применения пылеугольного топлива (ПУТ) в доменном процессе

*М. С. ЗАВГОРОДНИЙ, А. А. СЕГЕДА, В. А. СМОЛЯК*

ПАО Днепровский металлургический комбинат имени Ф.Э. Дзержинского  
Днепродзержинский государственный технический университет

Прогнозирующим логико-математическим моделированием определены теплоэнергетические параметры доменного газа при вдувании пылеугольного топлива в фурменную зону доменной печи.

Прогнозуючим логіко-математичним моделюванням визначені теплоенергетичні параметри доменного газу при вдуванні пилевугільного палива у фурмену зону доменної печі.

By predicting logico-mathematical modeling thermoenergetical parameters under blowing of top furnace gas into tuyere zone of blast furnace are determined.

**Вступление.** Из-за растущего подорожания и дефицита природного газа (ПГ) перед металлургами-доменщиками, в первую очередь, возникла проблема изыскания дополнительного альтернативного энергоносителя, способного снижать расход дорогостоящего металлургического кокса, производимого из дефицитного коксующегося угля, запасы которого ограничены. Известно, что из 100% имеющихся в земной коре запасов минеральных топлив свыше 93% приходится на твердое топливо (угли) и только 7% - на жидкое и газообразное (нефть и природный газ) и поэтому использование в доменном производстве природного газа ограничено. Расчеты показали, что из доступных натуральных дополнительных видов топлива природный газ – наименее эффективен при применении в доменном производстве.

О преимуществе применения ПУТ по сравнению с применением ПГ в доменном процессе свидетельствует следующее. При применении ПГ значительно снижается температура горения и повышается выход горновых газов по сравнению с ПУТ и требуется больших в два раза компенсирующих воздействий для стабилизации оптимального режима доменной плавки: повышение температуры горячего дутья или увеличения обогащения его кислородом, что реально не всегда воз-

можно выполнить. Поэтому в фурменную зону можно вдувать в два раза больше ПУТ и иметь большее снижение расхода кокса, следовательно, в настоящее время для широкого промышленного применения в доменном производстве остается лишь ПУТ, эффективность и ресурсы которого превосходят другие виды дополнительных топлив.

На разложение и нагрев холодных добавок в окислительной зоне доменной печи затрачивается определенное количество тепла, которое необходимо компенсировать путем повышения температуры дутья, снижения его влажности обогащением кислорода, что обеспечивает экономию кокса при хорошем использовании вдуваемого ПУТ и значительном улучшении технико-экономических показателей доменной плавки.

Желаемым условием вдувания пылеугольного топлива является сохранение хода печи на том же уровне, как и при плавке на обычном атмосферном дутье. Для достижения этого и получения возможно большей экономии кокса необходимо обеспечить относительное постоянство количества образующихся горновых газов и температуры горения у фурм.

**Формулировка проблемной цели данной работы.** Одной из главных технологических перспектив применения ПУТ в доменной плавке является необхо-

димостью наряду с выплавкой чугуна, получать доменный газ в заданных количестве химическом составе и калорийности, способный конкурентно заменить природный газ в качестве топлива для металлургических печей.

Для практического решения этой проблемной цели потребуется значительно модернизировать устройство для подвода дутья в фурменную зону дополнительно оборудовав его устройством для вдувания ПУТ,

Таблица 1

Технологическая карта работы печей при нормативном расходе шихтовых материалов за декабрь 2012 года

	ПАРАМЕТРЫ	Ед. изм.	Доменные печи			За месяц
			1М	8	12	
Установленное задание						
1	Производство чугуна	Т	85900	91200	84300	261400
2	Среднесуточное производство в номинальные сутки	Т	2771	2942	2719	8432
3	Среднесуточное производство в календарные сутки		2771	2942	2719	8432
4	Номинальное время работы	Сутки	31	31	31	93
5	КИПО (проектное: 0,541; 0,531; 0,589; 0,551)	М <sup>3</sup>	0,500	0,596	0,510	0,537
Нормативная база сырья, материалов и топлива						
6	Расход природного газа	м <sup>3</sup> /час	7600	9500	8200	25300
		% м <sup>3</sup> /т	4,7 66	5,7 78	5,3 72	5,2 72
7	Расход кислорода	м <sup>3</sup> /час	9500	10700	9000	29200
		% м <sup>3</sup> /т	24,8 82	25,0 87	24,7 79	24,8 83
8	Уд. расход скипового коса (индекс «CSR»-47,9%)	кг/т	500,0	490,0	486,0	492,0
9	Потери кокса от измельчения	кг/т				23
10	Расход антрицата	кг/т	20	20	20	20
11	Интенсивность горения кокса	кг/м <sup>3</sup> сут	1000	822	954	917
12	Выход колошникового газа	м <sup>3</sup> /час	232500	247000	225500	705000
13	Расход: агломерата ПАО «ДМКД» Руды железной Окатышей «СевГОК» Металлодобавки МОС-2	кг/т	206,00			1700
		кг/т				0
		кг/т				107
		кг/т				10
14	Содержание железа в ж.р.ч. шихты	%				63,48
Технологические параметры, учитывающие техническое состояние оборудования						
15	Расход дутья: до клапана «СНОРТ» после клапана «СНОРТ»	м <sup>3</sup> /мин	3100	3300	33050	9450
		м <sup>3</sup> /мин	2700	2800	2600	3100
16	Температура дутья	°С	1050	1100	1100	1083
17	Естественная влажность дутья Увлажнение дутья Суммарная влажность дутья	г/м <sup>3</sup>	3,05	3,05	3,05	3,05
		т/час	0	0	0	0
		г/м <sup>3</sup>	3,05	3,05	3,05	3,05
18	Давление газа под колошником	кг/см <sup>2</sup>	1,20	1,10	1,20	1,17
19	Перепад давлений «Дутье-колошник»	кг/см <sup>2</sup>	1,45	1,45	1,40	
20	Теоретическая температура горения	°С	2260	2260	2260	
21	Масса железорудной части подачи	Т	23	25	23	
22	Количество подач в сутки	Шт.	221	216	217	
23	Проплав железорудной части шихты	т/сут	5007	5316	4914	15237
24	Масса выпуска (количество выпусков)	Т	252	294	247	
25	Количество выпусков	Шт.	11	10	11	
26	Содержание кремния в чугуне	%	0,50	0,70	0,50	0,57
27	Содержание серы в чугуне, не более	%	0,020	0,020	0,020	0,020
28	Основность шлака	Доли ед.	1,19	1,19	1,19	1,19
29	Содержание MgO в шлаке	%	5,5	5,5	5,5	5,5
30	Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в шлаке	Доли ед.	1,10	1,10	1,10	1,10
31	Температура чугуна, не менее	°С	1470	1470	1470	1470
32	Система загрузки		ААКК	ААКК	ААКК	
33	Уровень засыпи	М	1,5	1,5	1,5	
34	Температура колошникового газа, не более	°С	250	250	250	

а также оптимально «приспособить» технологические шихтовые и температурнодутьевые параметры к работе доменной печи с применением пылеугольного топлива для частичной замены кокса.

**Основная расчетная часть логико математической модели.**

Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

### Расчет количества состава и калорийности колошникового газа при вдувании ПУТ для технологических условий доменных печей ДМКД.

Расчет выполнен по методике А.Н. Рамма[3]  
БАЛАНС ВОДОРОДА.

2. Количество водорода, поступающего в печь с коксом, пылеугольным топливом и влагой дутья, м<sup>3</sup>.

$$H_{\text{ш}} = \left( \frac{Z_k \cdot H_{\text{ш}} \cdot 22,4}{100 \cdot 2} + \frac{Л.В. \cdot Z_k \cdot H_{\text{ЛВ}} \cdot 22,4}{100 \cdot 100 \cdot 2} \right) + \left( \frac{Z_{\text{пнт}} \cdot H_{\text{пнт}} \cdot 22,4}{100 \cdot 2} + \frac{Л.В._{\text{пнт}} \cdot Z_{\text{пнт}} \cdot H_{\text{ЛВ}} \cdot 22,4}{100 \cdot 100 \cdot 2} \right) + Q_{\text{W}},$$

где  $Z_k$  – расход кокса с учетом влаги и выноса, кг;  
 $H_k$  – содержание водорода в коксе  $\approx 0,35\%$ ; 22,4 – число Авогадро; Л.В. – летучие вещества кокса, %;  
 $H_{\text{ЛВ}}$  – содержание водорода в летучих веществах кокса, % (К = ПУТ);  $Z_{\text{пнт}}$  – расход пылеугольного топлива (даже ПУТ) с учетом влаги и выноса, кг;  
 $H_{\text{пнт}}$  – содержание водорода в ПУТ; Л.В.<sub>пнт</sub> – летучие вещества ПУТ;  $Q_{\text{W}}$  – количество влаги в дутье, %.

$$H_{\text{ш}} = \left( \frac{43,01 \cdot 0,35 \cdot 22,4}{100 \cdot 2} + \frac{0,95 \cdot 43,01 \cdot 35 \cdot 22,4}{100 \cdot 100 \cdot 2} \right) = \left( \frac{9,76 \cdot 0,35 \cdot 22,4}{100 \cdot 2} + \frac{8,97 \cdot 9,76 \cdot 35 \cdot 22,4}{100 \cdot 100 \cdot 2} \right) + 1,5 = 5,72 \text{ м}^3.$$

2. Расход водорода на реакции косвенного восстановления, м<sup>3</sup>.  $H_{\text{кв}} = H_{\text{ш}} \cdot \eta_{\text{H}}$

где  $\eta_{\text{H}}$  – степень участия водорода в реакциях косвенного восстановления.

$$H_{\text{кв}} = 5,72 \cdot 0,33 = 1,89 \text{ м}^3$$

2.1 расход кокса и ПУТ общий, (кг/100кг чуг.)

$$C_{\text{пнт}} = \left( Z_k + \frac{Z_k \cdot W_k}{100} + \frac{Z_k \cdot V_k}{100} \right) + \left( Z_{\text{пнт}} + \frac{Z_{\text{пнт}} \cdot W_{\text{пнт}}}{100} + \frac{Z_{\text{пнт}} \cdot V_{\text{пнт}}}{100} \right),$$

где  $W_k$  – Содержание влаги в коксе, %;  $V_k$  – вынос кокса из доменной печи  $\approx 0,5\%$ ;  $W_{\text{пнт}}$  – содержание влаги в ПУТ, %;  $V_{\text{пнт}}$  – вынос ПУТ из доменной из доменной печи, % (нет данных, принимаем вынос кокса);

$$C_{\text{общ}} = \left( 43,01 + \frac{43,01 \cdot 3,9}{100} + \frac{43,01 \cdot 0,5}{100} \right) + \left( 9,76 + \frac{9,76 \cdot 1,87}{100} + \frac{9,76 \cdot 0,5}{100} \right) = 54,89 \frac{\text{кг}}{100/\text{т чуг}}$$

3. Расход водорода на образование метана по реакции  $C + 2 H_2 \rightarrow CH_4$ , м<sup>3</sup>

$$H_{\text{CH}_4} = \frac{C_{\text{общ}} \cdot C_{\text{CH}_4} \cdot 22,4 \cdot 2}{100 \cdot 12},$$

где  $C_{\text{CH}_4}$  – количество углерода, расходуемое на образование  $CH_4 = 0,75\%$

$$H_{\text{CH}_4} = \frac{54,89 \cdot 0,75 \cdot 22,4 \cdot 2}{100 \cdot 12} = 0,768 \text{ м}^3 \approx 0,77 \text{ м}^3$$

4. Количество водорода, переходящего в колошниковый газ, м<sup>3</sup>.

$$H_{\text{к.г.}} = H_{\text{ш}} - (H_{\text{кв}} + H_{\text{CH}_4}) = 5,72 - (1,89 + 0,77) = 3,06 \text{ м}^3$$

### БАЛАНС ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Диоксид углерода образуется при восстановлении оксидов железа, разложении известняка и вносится летучими веществами кокса и ПУТ.

1. Вносится  $Fe_2O_3$  шихтовыми материалами, кг.

$$Fe_2O_3 = \frac{Fe_2O_3 \cdot X^3 + Fe_2O_{3\text{изв}} \cdot Y + -0,01 \cdot A \cdot Z_{(k+\text{пнт})} \cdot Fe_2O_{3\text{з.к}}}{100} =$$

где  $Fe_2O_3$  – содержание в агломерате, %; X – расход агломерата на выплавку 100 кг чугуна, кг;

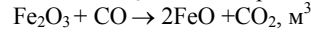
$Fe_2O_{3\text{изв}}$  – содержание в известняке, %; Y – расход известняка на выплавку 100 кг чугуна, кг;

$Fe_2O_{3\text{з.к}}$  – содержание в золе кокса, %;

$$Fe_2O_{3\text{ш}} = \frac{67,8 \cdot 165,1 + 0,66 \cdot 0,46 + 0,01 \cdot 9,97 \cdot 52,77 \cdot 22,74}{100} =$$

$$= 113,11 \text{ кг}$$

2. Количество кислорода, отнимаемого при восстановлении  $Fe_2O_3$  до FeO по реакции



$$O_{Fe_2O_3} \rightarrow Fe = Fe_2O_{3\text{ш}} \cdot \frac{22,4}{160 \cdot 2} = 113,11 \cdot \frac{22,4}{160 \cdot 2} = 7,92 \text{ м}^3$$

3. Количество кислорода, отнимаемого при восстановлении Fe из FeO непрямым путем по реакции  $Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2FeO + CO_2$ , м<sup>3</sup>

$$O_{Fe_2O_3} \rightarrow Fe = 94,67 (1 - 0,3) \cdot \frac{22,4}{56 \cdot 2} = 13,25 \text{ м}^3$$

4. Общее количество кислорода, отнимаемого косвенным путем, м<sup>3</sup>.

$$O_{\text{кв}} = O_{Fe_2O_3} \rightarrow FeO + O_{FeO} \rightarrow Fe = 7,92 + 13,25 = 21,17 \text{ м}^3$$

В том числе отнимаемое водородом, м<sup>3</sup>:

$$O_{\text{кв}}^{CO} = O_{\text{кв}} \cdot 0,5 = 1,89 \cdot 0,5 = 0,94 \text{ м}^3$$

5. Количество кислорода, отнимаемого оксидом углерода, м<sup>3</sup>.

$$O_{\text{кв}}^{CO} = O_{\text{кв}} - O_{\text{кв}}^{H_2} = 21,17 - 0,94 = 20,23 \text{ м}^3$$

6. Общее количество диоксида углерода в колошниковом газе доменной печи ( косвенное восстановление, разложение известняка, летучие вещества кокса и ПУТ), м<sup>3</sup>.

$$\Sigma CO_2 = 2 O_{\text{кв}}^{CO} + \left( Y \cdot CO_{2\text{изв}} + 0,01 \cdot Z_{(k+\text{пнт})} \cdot Л.В._{\text{среднен}} \cdot V_{CO_2} \right) \cdot 22,4 + 100 \cdot 44,$$

где  $V_{CO_2}$  – содержание  $CO_2$  в летучих веществах кокса и ПУТ, %;

$$\Sigma CO_2 = 2 \cdot 20,23 + \frac{(0,46 \cdot 42,57 + 0,01 \cdot 52,77 \cdot 8,97 \cdot 15) \cdot 22,4}{100 \cdot 44} = 40,48 \text{ м}^3$$

### БАЛАНС ОКСИДА УГЛЕРОДА

1. Углерод  $C_{\text{ш}}$  окисляется кислородом дутья по реакции  $C + 0,5O_2 \rightarrow CO$  и в процессах прямого восстановления оксидов. При этом образуется оксид углерода,

$$OC_{\text{д+пв}} = C_{\text{ок}} \cdot \frac{22,4}{12}, \text{ м}^3$$

где  $C_{\text{ок}}$  – количество углерода, окисленного дутьём и шихтой, кг

$$OC_{д+пв} = 41,42 \cdot \frac{22,4}{12} = 77,31 \text{ м}^3$$

1.2 Содержание твёрдого углерода С в коксе и ПУТ, %.

$$C_{тв} = 100 - (A_k + S - 0,01 \cdot A_{усп} \cdot S_{эк} + ЛВ_k + N_k + H_k + O_k), \%$$

$$C_{тв} = 100 - (10,8 + 1,21 - 0,01 \cdot 8,97 \cdot 1,56 + 0,95 + 0,3 + 0,35 + 0,3) = 86,48 \%$$

1.3 Вносится углеродом кокса и ПУТ, (1кг/1000 кг чугуна).

$$C_{общ} = C_{тв} \cdot \frac{Z_{к+пут}}{100} = 86,48 \cdot \frac{52,77}{100} = 45,64 \frac{\text{кг}}{\text{т чугуна}}$$

1.4 Количество углерода, окисляемое шихтой и дутьём, определяется по разности между общим количеством углерода, вносимого в печь, и его расходом на науглероживание чугуна и образование метана, кг:

$$C_{ок} = C_{общ} - [C] \cdot \frac{C_{общ} \cdot C_{CH_4}}{100} = 86,48 \cdot \frac{12,64 \cdot 0,5}{100} = 41,42 \text{ кг}$$

2. Вносится CO с летучими веществами кокса и ПУТ, м<sup>3</sup>.

$$V_{CH}^{общ} = \frac{Z_{к+пут} \cdot V_k \cdot V_{CO} \cdot 22,4}{22 \cdot 100 \cdot 100}, \text{ м}^3$$

где  $V_k$  – унос из печи кокса с колошниковым газом;  $V_{co}$  – содержание CO в летучих веществах кокса

$$V_{CH}^{общ} = \frac{52,77 \cdot 0,95 \cdot 33 \cdot 22,4}{22 \cdot 100 \cdot 100} = 0,13 \text{ м}^3$$

3. Расходуется CO на реакции косвенного восстановления, м<sup>3</sup>.

$$CO_{кв} = O_{кв}^{CO} \cdot 2 = 20,23 \cdot 2 = 40,46 \text{ м}^3$$

4. Количество CO в колошниковом газе, м<sup>3</sup>.

$$CO_{кг} = CO_{д+пв} + V_{CO}^{общ} - CO_{кв}, \text{ м}^3$$

где  $V_{CO}^{общ}$  – содержание CO в летучих веществах кокса

$$CO_{кг} = 77,31 + 0,1 - 40,46 = 36,95, \text{ м}^3$$

5. Количество метана в колошниковом газе (образовывалось в печи и внесено летучими веществами кокса и ПУТ), м<sup>3</sup>.

$$CH_{кг} = \frac{C_{общ} \cdot C_{CH_4} \cdot 22,4}{100 \cdot 12} +$$

$$\frac{Z_{к+пут} \cdot ЛВ_{усп} \cdot V_{CH_4} \cdot 22,4}{100 \cdot 100 \cdot 16}, \text{ м}^3$$

где  $V_{CH_4}$  – содержание  $CH_4$ , в летучих веществах кокса (данных о содержании  $CH_4$  в летучих веществах ПУТ нет).

$C_{CH_4}$  – содержание углерода в  $CH_4$ , %.

$$CH_{кг} = \frac{45,64 \cdot 0,75 \cdot 22,4}{100 \cdot 12} + \frac{52,77 \cdot 8,97 \cdot 16 \cdot 22,4}{100 \cdot 100 \cdot 16} = 1,69 \text{ м}^3$$

6. Количество азота в колошниковом газе (азот вносится коксом, азотным транспортированием ПУТ), ПУТ, дутьём

$$N_{кг} = \frac{Z_{к+пут} \cdot N_k \cdot 22,4}{100 \cdot 28} + \frac{Z_{к+пут} \cdot ЛВ_{усп} \cdot V_{N_2} \cdot 22,4}{100 \cdot 100 \cdot 28} +$$

$$+ 115,62 \cdot \frac{100 - 25}{100}$$

где 115,6 – расход дутья сухого  $V_{N_2}$  – вносится азот с дутьём (без учета вносимого транспортировочного азота)

$$N_{кг} = \frac{55,77 \cdot 0,3 \cdot 22,4}{100 \cdot 28} + \frac{55,77 \cdot 8,97 \cdot 16 \cdot 22,4}{100 \cdot 100 \cdot 28} +$$

$$+ 115,62 \cdot \frac{100 - 25}{100} = 87,49 \text{ м}^3$$

Основные результаты расчета количества, химического состава и calorийности доменного газа при дувании ПУТ.

Величины	Компоненты					
	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Σкг
Количество, м <sup>3</sup>	40,48	36,95	1,69	3,06	87,49	169,65
Содержание, %	23,85	21,78	1,00	1,80	51,57	100,00

7. Плотность колошникового газа, км/м<sup>3</sup>:

$$\gamma_{кг} = \frac{44 \cdot CO_2 + 28 \cdot CO + 16 \cdot CH_4 + 2 \cdot H_2 + 28 \cdot N_2}{22,4 \cdot \Sigma_{кг}}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

где  $\Sigma_{кг}$  – сумма компонентов колошникового газа, кг

$$\gamma_{кг} = \frac{44 \cdot 40,46 + 28 \cdot 36,95 + 16 \cdot 1,69 + 2 \cdot 3,06 + 28 \cdot 87,49}{22,4 \cdot 169,65} =$$

$$= 1,39 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

8. Объем колошникового газа

$$Q_{кг} = \Sigma_{кг} \cdot \gamma_{кг} = \frac{\text{м}^3}{100 \text{ кг чугуна}} \text{ или } \frac{\text{м}^3}{\text{т чугуна}}$$

$$Q_{кг} = 169,656 \cdot 1,39 = 235,8 \frac{\text{м}^3}{100 \text{ кг чугуна}} \text{ или } \frac{\text{м}^3}{\text{т чугуна}}$$

9. Calорийность колошникового газа: кДж/м<sup>3</sup>

$$CO = 21,78 \cdot h_{co} = 21,78 \cdot 126 = 2744; H_2 = 3,06 \cdot h_{H_2} = 3,06 \cdot 108 = 333; CH_4 = 1,00 \cdot h_{CH_4} = 1,00 \cdot 263 = 263$$

где  $h_{co}$ ,  $h_{H_2}$ ,  $h_{CH_4}$  – соответственно энтальпия газов.

$$2744 + 333 + 263 = 3,337 \text{ мДж/м}^3$$

По энтальпиям компонентов доменного газа при дувании ПУТ определена его calorийность.

Если принять, что 1 мДж = 238,845 ккал, то calorийность газа составит: 238,845 · 3,337 = 797 ккал/м<sup>3</sup>.

Точное определение состава колошникового газа производится масспектрометрическим комплексом «Гранат», который должен применяться взамен молоточного оптико-акустического газоанализатора ОА-0304. «Гранат» разработан Санкт-Петербургским ЗАО «ЦФТН Аналитик»

Примечание: Доменный газ Алчевского меткомбината при выплавке чугуна с применением ПУТ имеет следующий состав:

CO=24,9%; CO<sub>2</sub>=20,9%; H<sub>2</sub> = 2,9%; N<sub>2</sub> = 51,3%; CH<sub>4</sub> – данных нет, Плотность = 1,275 кг/м<sup>3</sup>, calorийность = 769 ккал/м<sup>3</sup>

Сравнительный анализ химического состава природного и доменного газов, образующегося при дувании ПУТ в доменные печи Алчевского металлургического комбината (таблица 2), подтверждает теплоэнергетическую возможность применять доменный газ для отопления металлургических печей [4].

Таблица 2

Компоненты	Энтальпия при 1000 °С	Природный газ	Доменный газ, %	
			Алчевский меткомбинат	Прогнозный расчет ДМКД
CH <sub>4</sub>	263	94,2		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4530	2,1		
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	6460	0,5		
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	8403	0,3		
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	10346	0,3		
N <sub>2</sub>		2,2	51,3	51,57
CO <sub>2</sub>	4844	0,4	20,9	23,85
H <sub>2</sub>	108		2,9	1,80
CO	126		24,9	21,78

По энтальпии химических реакций горения компонентов доменного газа определено, что при сжигании каждого процента оксида углерода теплота сгорания одного кубического метра газа повышается на 126 кДж, а каждого процента водорода и метана соответственно на 108 кДж и 263 кДж.

Наличие в доменном газе значительного количества азота объясняется азотным транспортированием ПУТ (рис. 1). Высокая калорийность доменного газа при вдувании ПУТ обусловлена обогащением дутья кислородом (рис. 2).

Анализ рисунков 1 и 2 показывает: при снижении содержания кислорода в дутье (по различным технологическим причинам) соответственно снижается калорийность доменного газа – уменьшается суммарное количество восстановительных газов CO, H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> и, как следствие, повышается содержание азота сверх его транспортировочного количества.

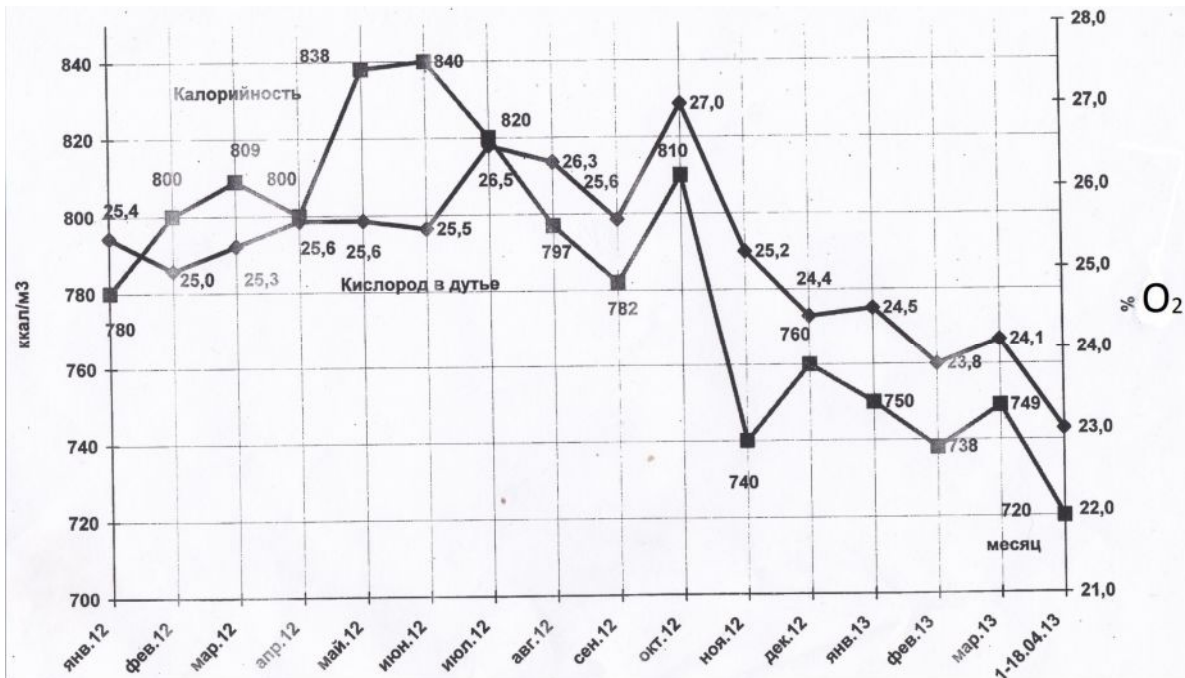


Рис. 1 Зависимость калорийности доменного от содержания кислорода в дутье при вдувании ПУТ в доменную печь Алчевского меткомбината

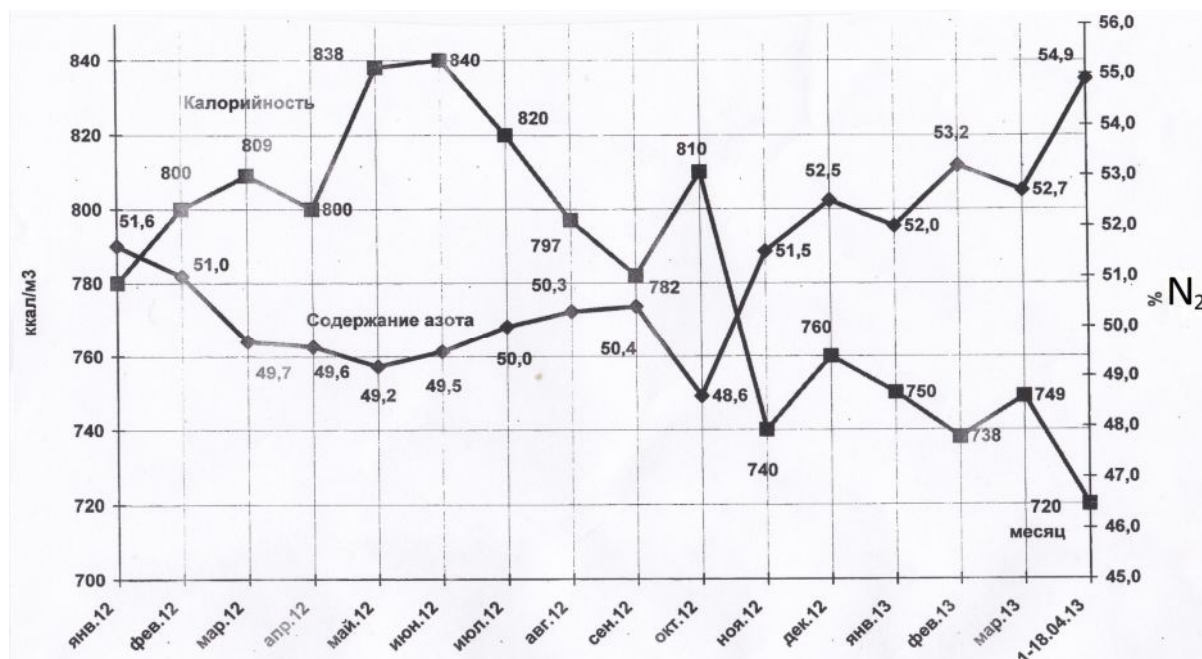


Рис. 2 Соотношение калорийности и содержания азота в доменном газе при вдувании ПУТ в доменную печь Алчевского меткомбината

### Выводы

В связи с дефицитом и значительным подорожанием природного газа вдувание ПУТ в фурменную зону доменных печей является важным фактором сокращения расхода кокса, производимого из дефицитных коксующихся углей.

Логико-математическим моделированием определены химический состав и калорийность доменного газа при вдувании ПУТ. Теплоэнергетические параметры доменного газа свидетельствуют о возможности его применения, альтернативно природному газу, для отопления металлургических печей.

Для экспрессного определения химического состава доменного газа при вдувании ПУТ доменные печи необходимо оснастить масспектрометрическим комплексом «ГРАНАТ» разработки Санкт-Петербургского ЗАО «ЦФТИ Аналитик» взамен малоточного оптоакустического газоанализатора ОА-0304.

Для экспрессного контроля мгновенного выноса колошниковой пыли из доменных печей при вдувании ПУТ нисходящие пылепроводы необходимо оборудовать пылемерами, позволяющими определять также суммарное накопление пыли в пылеуловителе за определенное время[5].

В первую очередь пылемером следует оборудовать пылепроводы, подводящие ПУТ к доменным печам, что позволит оперативно определять мгновенную плотность азотнопылеугольного потока (концентрацию ПУТ на метр кубический азота). Эта информация, являясь сигналом обратной связи позволит корректировать дозирование ПУТ в зависимости от возможностей его «приема» фурменной зоной доменной печи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Л. Ярошевский, Пылеугольное топливо – реальная альтернатива природному газу в металлургии. «Металл и литье Украины» 2006, № 3–4, С. 15–20.
2. В. И. Лошнов, И. М. Глушенко, В. И. Бехтер, Повышение использования кокса в народном хозяйстве. «Металлургия», 1986, Москва, 160 с.
3. А. Н. Рамм, Современный доменный процесс. Москва, «Металлургия», 1980, 300 с.
4. В. А. Смоляк, М. С. Завгородний. Моделирование теплового режима доменной плавки с применением ПУТ. Математичне моделювання. 2012, № 2 (27). С. 81–84.
5. Автоматический контроль выноса колошниковой пыли из доменных печей. Математичне моделювання. 2013, № 1 (28). С. 28–30.