

А.Л.Чайка, В.Ю.Шостак, Б.В.Корнилов, К.С.Цюпа, А.Н.Арзамасцев*

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЖЕКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДАЧЕ ТОПЛИВНЫХ ДОБАВОК В ГОРН ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

*Институт черной металлургии им.З.И.Некрасова, * ОАО «НЛМК»*

Целью работы является исследование подачи топливных добавок в горн доменной печи. Топливные добавки целесообразно предварительно подогревать и подавать в дутье через устройство горелочного типа, например, применяемых на печах, работающих с ПУТ или мазутом. В результате инжекционных процессов, возникающих при взаимодействии природного газа с дутьем, образуется смесь, параметры которой будут отличимые от параметров дутья, что в дальнейшем влияет на развитие струйных процессов в фурменной зоне и на полноту сжигания топлива.

доменная печь, фурма, топливная добавка, дутье, инжекция, смешение, сжигание, газодинамика

Освоение доменной плавки с использованием пылеугольного топлива и увеличение эффективности использования природного газа требует развития теоретической и практической базы, описывающей процесс сжигания топлива в доменной печи с учетом современных технических решений его подачи в горн через фурменные приборы. В данной работе рассматриваются процессы инжекции, возникающие в фурменном приборе во время подачи природного газа в центр потока дутья через устройство горелочного типа, например, применяемых на печах, работающих с ПУТ (рис.1).

Многoletний опыт технологии использования холодного природного газа показал, что при определенных условиях плавки в фурменной зоне доменной печи идет процесс его пиролиза, что снижает эквивалент замены кокса природным газом до $0,3 - 0,4 \text{ кг/м}^3$. На этот недостаток в своих работах указывали В.Г. Аносов, К.П. Бугаев, В.К. Корнев, И.Ф. Курунов, И.П. Семик, И.Г. Товаровский, С.В. Шаврин и др. исследователи [1]. При сжигании ПУТ также можно ожидать неполноту его сгорания в горне, на что указывают экспериментальные исследования и практика работы доменных печей [2–5].

Одной из причин неполного сжигания топлива является неполное смешение горючего с окислителем, применительно к доменному производству с кислородом в фурменной зоне [2,5]. Интенсифицировать процесс сжигания пылеугольного топлива и природного газа позволяет его подвод в горн доменной печи по оси фурм [6–7].

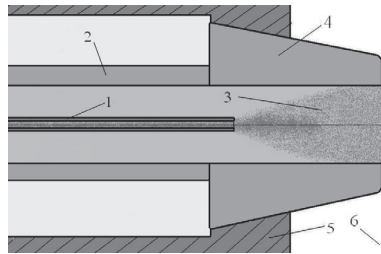


Рис.1. Фурма доменной печи.
в сунке: 1 — «копье», d_1 ; 2 — воздуховодное устройство, d_2 ; 3 — поток дутья после смешения с топливом; 4 — фурма, d_3 ; 5 — стена доменной печи; 6 — горн

В результате инъекционных процессов, возникающих при взаимодействии топливной добавки с дутьем, образуется смесь, параметры которой будут отличны от параметров дутья (рис.1). Эти параметры оказывают влияние на температурный и энергетический потенциал газового потока на входе в фурменный очаг, на скорость процесса горения и полноту сжигания топливной добавки [1,2,8–10]. Положительное влияние на полноту сжигания топливной добавки оказывает увеличение температуры, концентрация кислорода и давления в смеси, увеличение времени пребывания топливной добавки в окислительной зоне. Положительное влияние на газодинамику фурменной зоны оказывает уменьшение потерь давления дутья и давления смеси газов перед срезом воздушной фурмы.

Процессы вовлечения движущейся газообразной или жидкой средой другой среды иных физических свойств описывается теорией инъекции, которую целесообразно использовать для предварительной оценки изменений параметров потока дутья в результате его смешения с природным газом при подаче в горн доменной печи [8 –10]. В рамках этой теории фурменный прибор с инъекционной системой подачи дополнительного топлива будем рассматривать как своего рода газовый эжектор, с вытекающей отсюда возможностью использовать указанные теоретические наработки для выполнения расчета. В процессе работы такого эжектора на выходе с фурмы образуется однородный по своим параметрам газовый поток, параметры которого подлежат определению. В первом приближении пульсационные явления в фурменном очаге не учитываются, и принимается, что процесс смешения является стационарным. Предполагается, что смешение потоков происходит полностью, а природный газ в процессе смешения не вступает в реакцию горения с дутьем до полного его выхода из расчетной зоны.

Ниже рассмотрены инъекционные процессы, которые возникают при подаче природного газа в горн доменной печи. Математическое описание рассматриваемого процесса сводится к записи трех основных законов газовой динамики: сохранения массы, количества движения и энергии.

Закон сохранения массы запишем в виде:

$$\frac{G_3}{G_1} = n + 1, \quad (1)$$

где $n = \frac{G_2}{G_1}$ – коэффициент инъекции, G_1 , G_2 , G_3 – массовые расходы га-

зов в соответствующих сечениях, кг/с; индекс 1 обозначает параметры инжектирующего потока (природный газ), 2 – инжектируемого потока (дутье); 3 – параметры газа после смешения; 0 – заторможенный поток.

Закон сохранения энергии имеет вид:

$$Q + G_1 C_{p1} T_{01} + G_2 C_{p2} T_{02} = G_3 C_{p3} T_{03}, \quad (2)$$

где Q – это общее количество тепла, подводимое к газу путем излучения, теплопередачей и конвективным теплообменом через стенки фурмы, Дж/с; T_0 – температура торможения потока, °K.

C_p – массовая теплоемкость газов, Дж/(кг·с);

T_0 – температура торможения потока, °K.

Выполнив математические преобразования, получим выражения для определения полной температуры потока после смешения:

$$T_{03} = \frac{1 + \delta + nc\theta}{n+1} \frac{Cp_1}{Cp_3} T_{01}, \quad (3)$$

где $c = \frac{Cp_2}{Cp_1}$ – отношение теплоемкости дутья к теплоемкости природного газа,

$\theta = \frac{T_{02}}{T_{01}}$ – отношение температур торможения потоков, $\delta = \frac{Q}{G_1 Cp_1 T_{01}}$ – от-

ношение подведенного секундного количества тепла к теплосодержанию секундного расхода эжектирующего газа. Так как в первом приближении не учитываются процессы горения и предполагается полное отсутствие внешнего подвода тепла, то величина δ принимается равной нулю.

При анализе процесса инжекции принято, что боковая поверхность рассматриваемого гипотетического инжектора (боковая поверхность фурмы), ограничивающая область смешения потоков газа, имеет цилиндрическую форму постоянного радиуса сечения (рис.1). Тогда проекция внешних сил на ось фурмы, равна нулю.

Запишем закон сохранения количества движения:

$$I_1 + I_2 = I_3, \quad (4)$$

где $I = \frac{k+1}{2k} Ga_{kp} z(\lambda)$ – секундный перенос полного импульса газа, кг·м/с².

Выполнив преобразования, получим следующую зависимость для нахождения коэффициента скорости в выходном сечении фурмы:

$$z(\lambda_3) = \frac{z(\lambda_3) + n\alpha_2 A_2 z(\lambda_2)}{(n+1)\alpha_3 A_3}, \quad (5)$$

где $z(\lambda) = \lambda + \frac{1}{\lambda}$, $\alpha_1 = \frac{(K_2+1)K_1}{(K_1+1)K_2}$, $\alpha_3 = \frac{(K_3+1)K_1}{(K_1+1)K_3}$, $A_2 = \frac{a_{kp2}}{a_{kp1}}$, $A_3 = \frac{a_{kp3}}{a_{kp1}}$,

$$a_{kp} = \sqrt{\frac{2K}{K+1} RT_0}, \quad K = \frac{Cp}{Cv}, \quad R = Cp - Cv$$

С учетом трения, закон сохранения количества движения примет вид:

$$I_1 + I_2 = I_3 + F_{TP}, \quad (6)$$

Сила трения действующая вдоль оси потока находится по формуле:

$$F_{TP} = \xi \frac{l}{d_3} \frac{w_3^2}{2} \rho_3 F_3, \quad (7)$$

где l , d_3 – длина и диаметр зоны смешения соответственно, м, F_3 – площадь сечения, м².

Применив газодинамическую функцию $\chi = \frac{2K}{K+1} \xi \frac{l}{d}$, определим силы трения газа о стенку фурмы:

$$F_{TP} = \frac{K_3+1}{4K_3} \chi(\lambda_3) G_3 a_{kp3} \lambda_3, \quad (8)$$

где $\chi(\lambda) = \varphi(\lambda^0) - \varphi(\lambda)$, λ^0 – коэффициент скорости без учета трения, λ – коэффициент скорости с учетом трения

Тогда, с учетом соотношения (8) выражение для нахождения коэффициента скорости (5) примет вид:

$$z(\lambda_3) + \frac{\lambda_3}{2} \chi(\lambda_3) = \frac{z(\lambda_3) + n\alpha_2 A_2 z(\lambda_2)}{(n+1)\alpha_3 A_3}, \quad (9)$$

Для нахождения полного давления смеси P_{03} , заменим в законе сохранения масс (1), величины расхода газа G_3 и G_1 при помощи соотношения (10) [7]:

$$G = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{P_0 F q(\lambda)}{\sqrt{T_0}}}, \quad (10)$$

$$\text{где } q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

После подстановки получим:

$$\frac{P_{03}}{P_{01}} = \sqrt{(n+1) \frac{c_{p1} + n c_{p2} \theta}{c_{p3}} \frac{F_1 q(\lambda_1)}{F_3 q(\lambda_3)}}, \quad (11)$$

Таким же образом, через параметры потоков газов на входе в фурменный очаг, выражается коэффициент инжекции:

$$n = \frac{P_{02} F_2 q(\lambda_2) \sqrt{T_{01}}}{P_{01} F_1 q(\lambda_1) \sqrt{T_{02}}}, \quad (12)$$

Полученные уравнения (1–12), позволяют определить параметры потока после смешения по заданным дутьевым параметрам, давлению, объемному расходу и температуре дувяемого природного газа, диаметров фурмы и отверстия для дувания природного газа (таблица, рис.2–4). Расчеты выполнены для условий работы доменной печи «Россиянка» ОАО «НЛМК», объемом 4200 м³ с параметрам дутьевого режима: температура дутья – 1270 °С, расход дутья – 6,5 тыс. м³/мин (390 тыс. м³/час), давление дутья – 0,4 МПа, температура природного газа – 40 °С, расход природного газа – 50 тыс. м³/час, давление природного газа – 0,6 МПа, количество фурм – 36 штук (табл.1).

Результаты расчета показали, что инжекционные процессы смешения природного газа и дутья существенно влияют на изменение параметров комбинированного дутья на выходе из фурменного прибора: температура смеси изменяется на 16 – 28%, скорость на 10 – 15%, давление на 4 – 9% (таблица, рис.2–4.). Чем меньше диаметр воздушной фурмы, тем большее влияние на тепловой и энергетический потенциал фурменных газов оказывают изменения параметров и состава дутья.

Установлено, что при увеличении текущего объемного расхода природного газа на 10 тыс. м³/час давление смеси увеличивается на 0,1 %, скорость уменьшается на 1 %, а температура уменьшается на 4 % (рис.2). То есть, при увеличении расхода природного газа можно ожидать большее сопротивление потоку дутья, уменьшение его кинетической энергии и скорости протекания химической реакции горения природного газа вследствие уменьшения температуры смеси газов. Поэтому увеличение расхода природного газа целесообразно сопровождать увеличением температуры дутья.

При увеличении давления природного газа на каждые 100 кПа давление смеси увеличивается от 0,6% до 1,6 % в зависимости от диаметра фурм, скорость умень-

шается на 0,5 – 1,3 %, температура на 0,03 % (рис.2). От увеличения давления природного газа можно ожидать большее сопротивление потоку дутья, уменьшение его кинетической энергии.

Таблица. Влияние параметров газового потока внутри фурменного прибора, диаметра фурм и подвода природного газа на параметры смеси газов перед воздушной фурмой (+ увеличение; – уменьшение)

№	Факторы		Температура		Давление		Скорость	
	%	ед.изм.	%	С	%	ати	%	м/сек
1	Увеличение давления природного газа, %, ати:							
1а	10	0,55	0,01	0,08	0,65	0,03	-0,43	-0,86
1б	40	2,2	0,03	0,33	2,62	0,10	-1,71	-3,42
1в	70	3,85	0,05	0,58	4,61	0,18	-2,96	-5,92
2	Увеличение расхода природного газа, %, м3/час:							
2а	10	5000	-1,44	-18,28	0,05	0,00	-0,46	-0,91
2б	40	20000	-5,38	-68,28	0,23	0,01	-1,63	-3,26
2в	70	35000	-8,86	-112,48	0,45	0,02	-2,58	-5,16
3	Увеличение температуры природного газа, %, °С:							
3а	100	40	0,37	4,67	0,01	0,00	0,31	0,62
3б	500	200	2,08	26,40	0,01	0,00	1,77	3,55
3в	900	360	4,11	52,22	-0,03	0,00	3,54	7,08
4	Увеличение расхода дутья, %, м3/мин.:							
4а	10	650	1,41	17,89	0,20	0,01	9,03	18,07
4б	20	1300	2,64	33,50	0,44	0,02	18,04	36,10
4в	30	1950	3,72	47,27	0,69	0,03	27,05	54,10
5	Увеличение диаметра отверстия для подачи природного газа, %, мм:							
5а	10	3,2	0,02	0,26	0,54	0,02	-0,35	-0,69
5б	40	12,8	0,11	1,38	2,54	0,10	-1,59	-3,18
5в	70	22,4	0,23	2,97	5,07	0,20	-3,09	-6,19
6	Увеличение температуры дутья, %, °С:							
6а	5	63,5	3,87	49,12	0,08	0,00	3,25	6,50
6б	10	127	7,80	99,07	0,19	0,01	6,53	13,06
6в	15	190,5	11,63	147,74	0,31	0,01	9,69	19,38
7	Увеличение диаметра фурм, %, мм:							
7а	5	7,5	-0,04	-0,56	-0,49	-0,02	-7,80	-15,61
7б	10	15	-0,08	-0,97	-0,87	-0,03	-14,63	-29,26
7в	15	22,5	-0,10	-1,27	-1,19	-0,05	-20,62	-41,24

При увеличении температуры природного газа на 100°С давление смеси изменяется в пределах 0,1% в зависимости от диаметра фурм, скорость увеличивается на 1%, а прирост температуры смеси не превышает 2% в сравнении с параметрами дутья (рис.2). То есть, можно ожидать лучшие условия для сжигания природного газа и газодинамической работы фурменной зоны.

Наиболее сильное влияние на параметры смеси оказывает расход дутья, температура и его давление, диаметр фурм (рис.3,4). Увеличение расхода и температуры дутья увеличивают температурный потенциал смеси на 18%, скорость потока газа почти в три раза, но в тоже время увеличивают и давление смеси на 7%, уменьшить которое можно за счет увеличения диаметра фурм, уменьшения давления дутья и отверстия для подачи природного газа (рис.3,4).

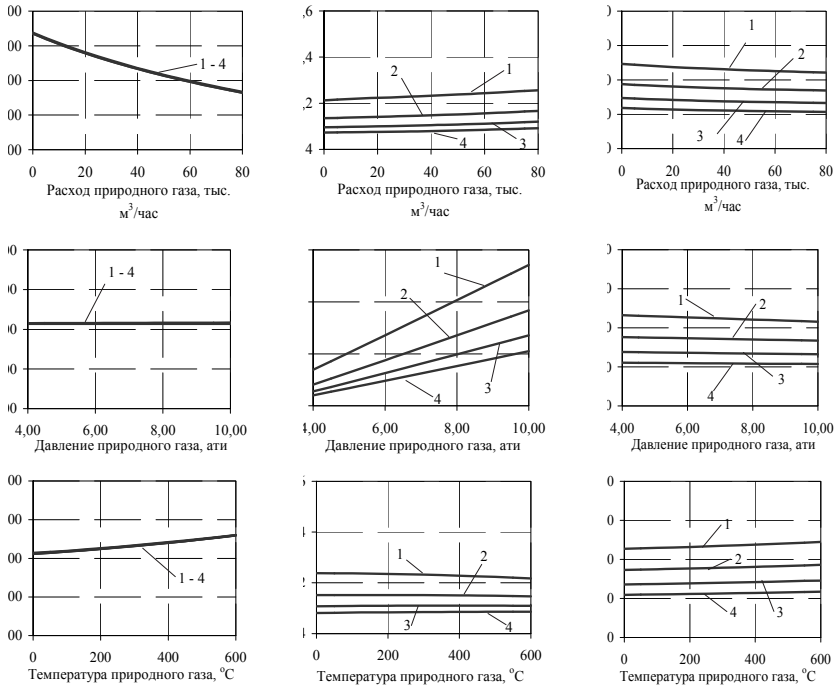


Рис. 2. Влияние параметров подачи природного газа и диаметра фурмы на параметры комбинированного дутья. Кривая 1 – при диаметре фурмы 130мм, 2 – при диаметре фурмы 150мм, 3 – при диаметре фурмы 170мм, 4 – при диаметре фурмы 190мм

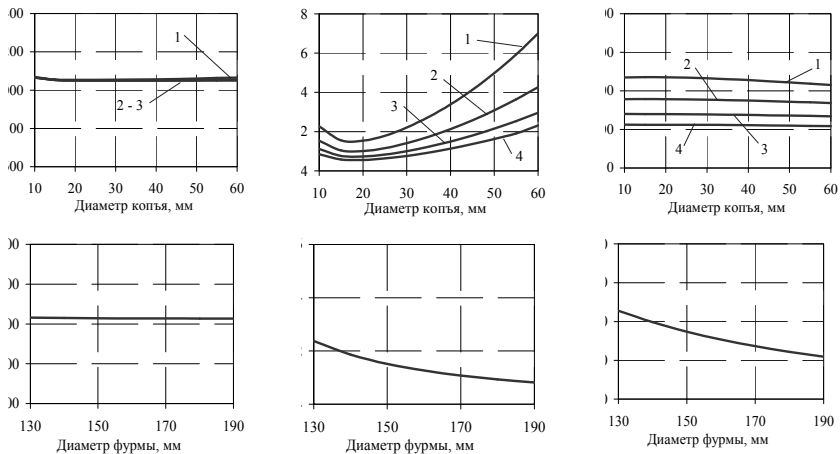


Рис. 3. Влияние геометрических параметров подачи дутья и природного газа на параметры комбинированного дутья. Кривая 1 – при диаметре фурмы 130мм, 2 – при диаметре фурмы 150мм, 3 – при диаметре фурмы 170мм, 4 – при диаметре фурмы 190мм

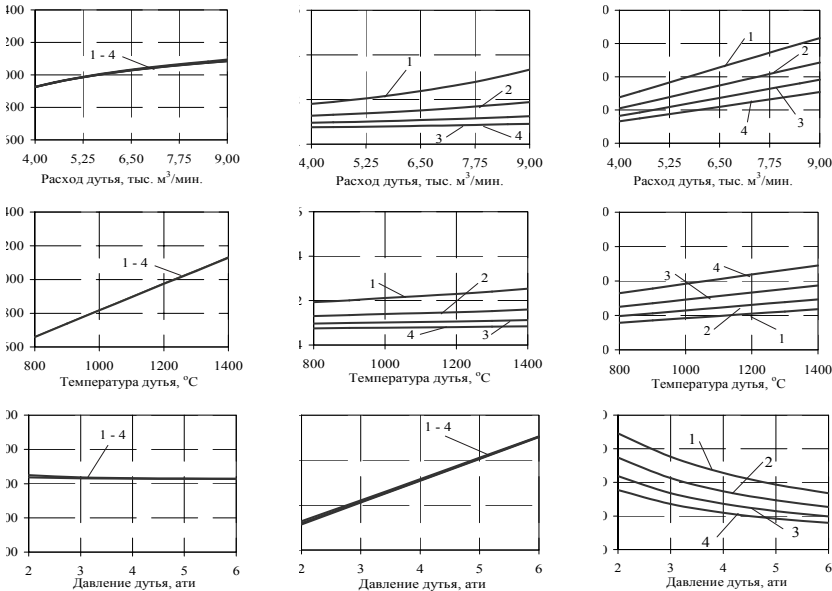


Рис. 4. Влияние дутьевых параметров и диаметра фурм на параметры комбинированного дутья. Кривая 1 – при диаметре фурмы 130мм, 2 – при диаметре фурмы 150мм, 3 – при диаметре фурмы 170мм, 4 – при диаметре фурмы 190мм

Уменьшить давление смеси и, соответственно, общий перепад давлений в печи на 5%, а также скорости смеси до 50% позволяет увеличение диаметра фурм со 130 до 190 мм и уменьшение отверстия для подвода природного газа до 20 мм (рис.3). При уменьшении диаметра отверстия для подвода природного газа менее 20 мм давление смеси увеличивается на 0,5–2% в зависимости от диаметра фурм (рис.3). То есть, существует оптимальное значение диаметра отверстия для подвода природного газа применительно к конкретным условиям.

Результаты расчета показали, что способ подвода природного газа и его параметры влияют на развитие газодинамических процессов на выходе комбинированного дутья из воздушной фурмы в горн, от которых в дальнейшем зависит полнота сжигания топлива, сопротивление газовому потоку на выходе из фурмы, энергетический потенциал потока. Теоретическая температура горения не учитывает эти процессы [8]. Увеличение эффективности сжигания топлив в фурменной зоне доменной печи является предметом дальнейших исследований.

Заключение. В результате инжекционных процессов, возникающих при взаимодействии топливной добавки с дутьем, образуется смесь, параметры которой будут отличимые от параметров дутья: давления до 8%, температуры до 25%, скорости до 15%. Для увеличения эффективности сжигания природного газа целесообразно его подавать по оси потока дутья через устройство горелочного типа, например, применяемых на печах, работающих с ПУТ. Природный газ перед подачей в дутье целесообразно предварительно подогревать, увеличение расхода природного газа сопровождать увеличением температуры дутья.

Расход и температура природного газа оказывает наиболее сильное влияние

на температуру комбинированного дутья, увеличить которую позволяет предварительный подогрев природного газа. Увеличение расхода природного газа, его давления и сечения отверстия для его подачи в дутье уменьшает скорость истечения смеси. Уменьшить давление комбинированного дутья на выходе из фурмы позволяет увеличение диаметра фурмы, уменьшение диаметра отверстия для подачи природного газа в дутье, уменьшение давления и расхода природного газа, уменьшение расхода дутья.

1. *Бородулин А.В.* Домна в энергетическом измерении. / А.В.Бородулин, А.Д. Горбунов, Г.И. Орел, В.И. Романенко и др. – Кривой Рог: Издательство СП «Мира», 2004г. – 436 с..
2. *Семикин И.Д., Аверин С.И., Радченко И.И.* Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1965. – 391 с.
3. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс. – М.: «Металлургия», 1980. – 304 с.
4. *Изменение содержания неиспользованного угля и кокса в пыли и шламе доменных печей и коэффициента использования угля при вдувании пылеугольного топлива с большим удельным расходом.* /Keng Wu, Hongfei Chen, Haixi He, Wen Pan, Wanren Xu. // ОАО «Черметинформация». Новости черной металлургии за рубежом. – 2009. – №3. – С.20–25
5. *Школлер М.Б.* Комплексная оценка углей западной и восточной Сибири в качестве сырья при производстве пылеугольного топлива для доменных печей. М.: Металлургия, 2011. – №2. – С.33–38
6. *Промышленная технология вдувания пылеугольного топлива в горн доменной печи.* / Приходько Ю.А., Ульянов А.Г., Носков В.А., Касаткин А.А. // Черная металлургия. Наука – технология – производство. Тематический сборник научных трудов ИЧМ под ред. И.Г.Узлова. – М.:Металлургия, 1989. – 440 с.
7. *Товаровский Й.Г., Лялюк В.П.* Эволюция доменной плавки. Днепропетровск: «Пороги», 2001. – 424 с.
8. *Аналитические исследования процессов в фурменной зоне и их приложения.* // А.Л.Чайка, А.Л.Ручаевский, А.В.Лычев, А.П.Васильев, А.Г.Байбуз. // Черные металлы. Материалы конференции к 100 летию А.Н. Рамма. –2003. – №12. – С.8–13.
9. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М: Металлургиздат, 1953. – 736 с.
10. *Инструкция по расчету и применению газовых эжекторов.* Москва. Государственный научно-исследовательский институт научной и технической информации. – 1958. – 54 с.

Статья рекомендована к печати академиком НАН Украины В.И.Большаковым

О.Л. Чайка, В.Ю. Шостак, Б.В. Корнілов, К.С.Цюпа, О.М. Арзамасцев
Дослідження інжекційних процесів при подачі паливних добавок в горн доменної печі

Метою роботи є дослідження подачі паливних добавок в горн доменної печі. Паливні добавки доцільно попередньо підігрівати і подавати в дуття через пристрій пальникового типу, який, наприклад, застосовують на печах, що працюють з пилувугільним паливом або мазутом. Внаслідок інжекційних процесів, що виникають при взаємодії природного газу з дуттям, утворюється суміш, параметри якої відмінні від параметрів дуття, що надалі впливає на розвиток струменевих процесів у фурменній зоні і на повноту згорання палива.