УДК 669.162

Производство

**В. П. Лялюк /д. т. н./, А. К. Тараканов /д. т. н./, Д. А. Кассим /к. т. н./** Национальная металлургическая академия Украины, г. Днипро, Украина

**Д. В. Пинчук, П. И. Оторвин /к. т. н./** «АрселорМиттал Кривой Рог», г. Кривой Рог, Украина

# Необходимость учёта полной энергии горнового газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива

**V. P. Lyalyuk /Dr. Sci. (Tech.)/, A. K. Tarakanov /Dr. Sci. (Tech.)/, D. A. Kassim /Cand. Sci. (Tech.)/** National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

**D. V. Pinchuk, P. I. Otorvin /Cand. Sci. (Tech.)/** «ArcelorMittal Kryviy Rih», Krivoy Rog, Ukraine

# Necessity of computing of the total energy of furnace hearth gas when pulverized coal injecting into the blast furnace

***Цель.*** *Повышение эффективности использования пылеугольного топлива в доменной плавке на основании оценки и регулирования размеров зон горения перед фурмами печи и распределения газового потока по радиусу горна.*

***Методика.*** *Разработана методика расчета полной энергии потока горнового газа при вдувании пылеугольного топлива, которая позволяет контролировать как средние значения данного комплексного показателя, так и его значения по фурмам доменной печи.*

***Результаты.*** *Оперативный расчетный контроль значений полной энергии потока горнового газа по фурмам доменной печи при вдувании пылеугольного топлива позволяет улучшить газодинамические условия доменной плавки, а следовательно, и ее эффективность.*

***Научная новизна.*** *Предложена методика расчета полной энергии потока горнового газа при совместном использовании пылеугольного топлива и природного газа.*

***Практическая значимость.*** *Разработанная методика может быть использована в АСУ доменной плавки для управления распределением газового потока по радиусу горна доменной печи. (Ил. 2. Библиогр.: 10 назв.)*

***Ключевые слова:*** *доменная плавка, вдувание ПУТ, поток горнового газа, теоретическая температура горения, полная мощность потока газа.*

**Постановка проблемы.** На международной научно-производственной конференции доменщиков «Опыт внедрения и пути решения проблем освоения технологии вдувания ПУТ в доменном производстве» (г. Кривой Рог, 12–13 мая 2016 г.) был освещен опыт внедрения этой технологии на печах многих металлургических комбинатов, в том числе и на доменной печи № 9 объемом 5000 м$^3$ предприятия «АрселорМиттал Кривой Рог». В докладе предприятия отмечалось, что в пуско-наладочный период имело место большое количество технологических и особенно технических проблем, таких как частые случаи деформации и горения фурменных приборов и холодильников. На холодильниках заплечиков в районе чугунной летки № 1 наблюдалось увеличение перепадов температур. Наиболее проблемным участком печи были холодильники фурменной зоны с 1 по 8 и с 33 по 42 фурмы. Наибольшей неприятностью стала разгерметизация кожуха на стыке холодильников фурменной зоны и заплечиков в районе фурмы 40, которая произошла 22 марта 2016 г.

Надо отметить, что указанный район фурменной зоны всегда был проблемным. Так, авторы работ [1; 2] отмечают, что после установки на капитальном ремонте в 1983–1984 гг. на доменной печи № 9 42 фурм (вместо 36) диаметром 150 мм печь продолжала работать неустойчиво. Попытки форсировать ход печи, в том числе путем увеличения расхода кислорода, приводили лишь к чрезмерному разогреву брони в секторе чугунных леток № 1 и № 4, вплоть до покраснения кожуха заплечиков и повреждения холодильников над фурмами 36 и 37. Причиной явилось неравномерное распределение дутья

© В. П. Лялюк /д. т. н./, А. К. Тараканов /д. т. н./, Д. А. Кассим /к. т. н./, Д. В. Пинчук, П. И. Оторвин /к. т. н./, 2017 г.

по фурмам и газового потока по окружности печи. Как показали исследования, повышенный расход дутья имел место в районе фурм 1–16 и 36–42. Через каждую из этих фурм в печь поступало в среднем 222 м$^3$/мин дутья. С противоположной стороны расход дутья в среднем был 161 м$^3$/мин, на 28 % меньше. Такое распределение расхода дутья по фурмам обусловлено способом соединения прямого воздухопровода с кольцевым. С противоположной стороны этого соединения расход дутья всегда больше [1–3]. Тепловизор, который в то время был установлен на колошнике доменной печи, также показал, что зона самых высоких температур находилась в районе фурм 42–7 и имела вид сектора от стен колошника до оси печи [4]. Неравномерность поступления дутья при равномерной по окружности загрузке шихты и одинаковом расходе природного газа по фурмам обусловили односторонний неустойчивый ход печи с образованием каналов или зон с интенсивным газовым потоком в районе летки № 1 и в прилегающих к ней участках печи. Содержание кремния в чугуне из летки № 1 всегда было больше, чем в чугуне из остальных леток. На этот сектор в период работы печи с 1975 по 1983 гг. приходилось наибольшее количество сгоревших фурм, а также холодильников в заплечиках и шахте. Стабилизировать работу печи удалось установкой 21-й фурмы диаметром 140 мм в районе повышенного расхода дутья, что снизило количество прогаров фурм и выход из строя холодильников заплечиков, а также колеблемость содержания кремния в чугуне по леткам [1–3].

Доменную печь № 9 в декабре 2015 г. с началом использования технологии ПУТ опять задули на всех фурмах диаметром 150 мм. В мае 2016 г. стали уменьшать диаметр фурм и к августу установили все фурмы диаметром 140 мм.

Контроль расхода ПУТ по фурмам доменной печи объемом 5000 м$^3$ предприятия «Арселор-Миттал Кривой Рог» (приведенный в докладе предприятия на указанной ранее конференции) показал значительную неравномерность его распределения (рис. 1). Например, на фурме № 24 расход ПУТ был меньше, чем на фурме № 31, на 63 %.

**Формулировка цели.** Анализ опыта внедрения технологии вдувания ПУТ на доменной печи № 9 показал значительную неопределенность в оценке размеров зон горения перед фурмами печи и распределении газового потока по радиусу ее горна. Для повышения эффективности использования пылеугольного топлива в доменной плавке необходимо осуществлять оценку и регулирование размеров зон горения перед фурмами печи и распределения газового потока по радиусу горна.

**Фактический материал.** Использовавшаяся длительное время для суждения об изменениях длины зоны горения перед фурмой доменной печи кинетическая энергия дутьевого потока, оказалась, как показали исследования, слабо связанной с длиной зоны горения и степенью проникновения газового потока к центру горна, так как составляет лишь часть полной энергии потока газа в горне, включающего также энергию увеличения объёма газа (энергию давления) в зоне горения [5–9]. В указанных работах приведена методика определения полной энергии потока горнового газа при вводе в фурму природного газа.

Часто вдувание ПУТ совмещают с вдуванием природного газа. В связи с этим в вышедшую из фурмы в зону горения струю дутья подводится энергия, связанная с горением кокса, природного газа и ПУТ. В результате этого состав, масса, температура, плотность и теплоемкость потока горнового газа изменяются. Для расчета полной механической энергии потока горнового газа с вдуванием пылеугольного топлива в фурмы доменной печи можно воспользоваться уравнением полной энергии потока воздушного дутья [5–9], дополнив формулу учётом изменений выхода горнового газа и теоретической температуры горения топлива при вдувании ПУТ:

$$E_{пм\ гг} = 371,2\frac{Q_{огг\ пут}\cdot T_{т\ пут}}{n} + \\ +68877,6\frac{\rho_{од}\cdot Q_{од}^3\cdot T_д^2}{n^3\cdot S_ф^2\cdot P_д^2},\quad \text{Дж/с}, \qquad (1)$$

где $Q_{огг\ пут}$ – выход горнового газа, приведенный к нормальным условиям при вдувании ПУТ совместно с природным газом, нм$^3$/с; $T_{т\ пут}$ – тем-

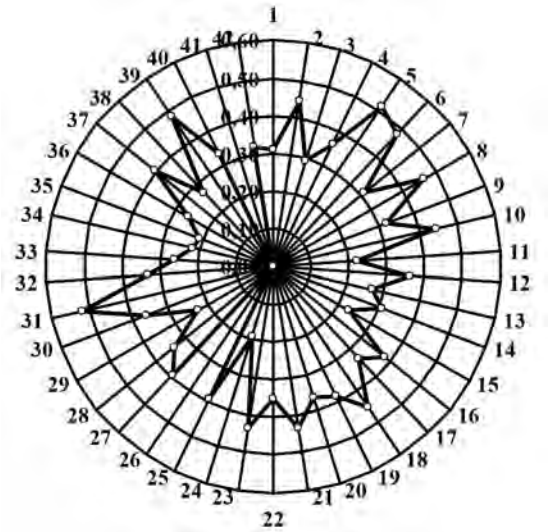


**Рис. 1. Диаграмма изменения расхода ПУТ по фурмам печи объемом 5000 м$^3$ (цифры по радиусу диаграммы, т/час)**

пература в зоне горения при вдувании ПУТ (теоретическая температура горения ПУТ совместно с природным газом), К; $\rho_{од}$ – нормальная плотность воздушного дутья, кг/м$^3$; $Q_{од}$ – нормальный объемный расход дутья, измеренный приборами на печи, нм$^3$/с; $T_д$ – температура дутья, К; $n$ – количество фурм, шт.; $S_ф$ – площадь сечения фурмы, м$^2$; $P_д$ – абсолютное давление дутья, Па.

Наряду с горновым газом, образующимся при горении углерода и углеводородов топлива в горне доменной печи и диссоциации влаги дутья, к общему объему горнового газа присоединяются летучие вещества ПУТ и азот, выполняющий функцию газа-носителя угля. Средняя изобарная теплоемкость смеси газообразных соединений, выделяющихся в горне из ПУТ, составляет 2,252 кДж/м$^3$·град. в интервале температур 800–1227 °С [10].

С учетом теплоемкости летучих веществ угля, газа-носителя ПУТ (азота) и теплоты, затрачиваемой на образование шлака из золы ПУТ, общее уравнение для расчета теоретической температуры горения при вдувании в горн доменной печи природного газа и ПУТ может быть представлено в следующем виде [10]:

$$Q_{огг} = Q_{од}\cdot[2O_2 + (1 - O_2) + \varphi] + k_{пг}\cdot Q_{ог} + +(k_{пут} + Q_{N2})\cdot m_{пут},\ м^3/с, \quad (3)$$

где $k_{пг}$ – средний выход водорода при разложении углеводородов природного газа, который изменяется в диапазоне 1,95–2,05 в зависимости от состава газа; $k_{пут}$ – средний выход водорода из ПУТ, который изменяется в диапазоне 0,42–0,48 м$^3$/кг.

**Изложение основных результатов исследований.** На рис. 2 приведена диаграмма изменения полной механической энергии потока горнового газа по фурмам доменной печи объемом 5000 м$^3$ при вдувании ПУТ. Сплошным кругом постоянного диаметра показана рассчитанная по среднесуточным параметрам полная энергия, а ломаные кривые с точками в узлах перед номером фурмы отображают фактические значения полных энергий по фурмам. Неравномерные расходы дутья и ПУТ по фурмам доменной печи приводят к значительной неравномерности полных энергий потоков горнового газа и, соответственно, глубины проникновения газового потока к центру горна, от чего зависит эффективность доменной плавки при вдувании ПУТ.

$$T_m = 273 + \frac{1700\cdot Q_{ог} + 10521{,}9\cdot\left[Q_{од} - Q_{ог}\left(0{,}5 + \frac{1-O_2}{2O_2}\right)\right]O_2 + 1{,}4\cdot Q_{од}\cdot t_д +}{1{,}5\cdot\left\{\left(3 + \frac{1-O_2}{2O_2}\right)Q_{ог} + \left(2 + \frac{1-O_2}{O_2}\right)\cdot\left[Q_{од} - Q_{ог}\left(0{,}5 + \frac{1-O_2}{2O_2}\right)\right]O_2 + 1{,}5\cdot Q_{од}\cdot\varphi\right\} +}\cdots$$

$$\cdots\frac{+2340\cdot O_2\left[Q_{од} - Q_{ог}\left(0{,}5 + \frac{1-O_2}{2O_2}\right) - 0{,}67\cdot m_{пут}\right] - 10806\cdot Q_{од}\cdot\varphi - C_ш\cdot A_{пут}\cdot m_{пут}}{+(1{,}42\cdot Q_{N2} + 2{,}252\cdot V^c)\cdot m_{пут}}, \quad (2)$$

где $Q_{ог}$ – нормальный объемный расход природного газа, нм$^3$/с; $O_2$ – содержание кислорода в дутье, м$^3$/м$^3$; $t_д$ – температура дутья, °С; φ – влажность дутья, м$^3$/м$^3$; $m_{пут}$ – расход ПУТ, кг/с; $C_{шл}$ – теплоемкость шлака, образующегося при плавлении золы ПУТ, кДж/(кг·град) [можно принять $C_ш$ = 1700 кДж/(кг·град)]; $A_{пут}$ – содержание золы в ПУТ, д. ед.; 1,42 – средняя теплоемкость азота в интервале температур 100–1227 °С, кДж/нм$^3$·град; $Q_{N2}$ – удельный расход азота-носителя, м$^3$/кг ПУТ; 2,252 – средняя теплоемкость летучих веществ угля в интервале температур 800–1227 °С, кДж/нм$^3$·град, определяемая по составу газа и средним теплоемкостям компонентов; $V^c$ – выход летучих веществ угля, д. ед.

Общее уравнение для расчета выхода горнового газа при горении природного газа и ПУТ можно найти из выражения (3), учитывающего выход водорода из природного газа и ПУТ, а также объем азота-носителя, вдуваемого в печь:

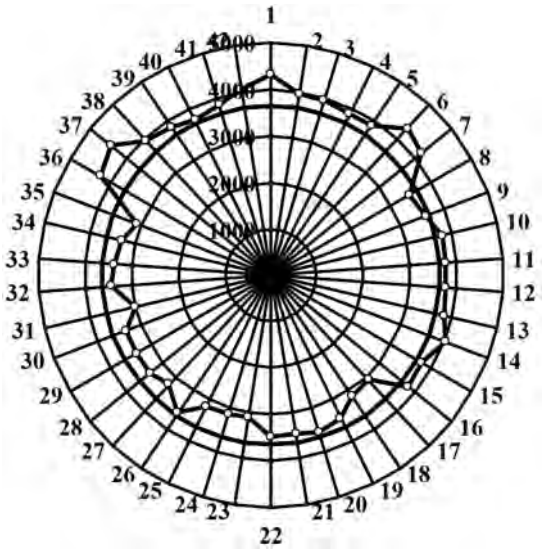


**Рис. 2. Диаграмма изменения полной механической энергии потока горнового газа по фурмам печи объемом 5000 м$^3$ при вдувании ПУТ (цифры по радиусу диаграммы, кДж/с)**

**Выводы.** Разработаны методические рекомендации по расчету полной энергии потока горнового газа при вдувании ПУТ, которые позволяют контролировать как средние значения данного комплексного показателя, так и его значения по фурмам доменной печи, что даёт возможность контролировать и регулировать глубину проникновения потока горнового газа к центру печи для каждой фурмы и, следовательно, позволяет улучшать газодинамические условия доменной плавки.

**Библиографический список / References**

1. Влияние распределения дутья по фурмам на газовый поток в доменной печи / К. М. Бугаев, В. М. Антонов, Г. В. Варшавский и др. // Сталь. – 1987. – № 2. – С. 17–22.

Bugaev K. M., Antonov V. M., Varshavskij G. V. *Vlijanie raspredelenija dut'ja po furmam na gazovyj potok v domennoj pechi* [Influence of blast tuyeres distribution of the gas flow in the blast furnace]. *Stal'*, 1987, no. 2, pp. 17-22.

2. Влияние диаметра воздушных фурм на работу доменной печи объемом 5000 м$^3$ / И. Е. Почекайло, В. В. Тарановский, В. Н. Петухов и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1988. – № 2. – С. 6–8.

Pochekajlo I. E., Taranovskij V. V., Petuhov V. N. *Vlijanie diametra vozdushnyh furm na rabotu domennoj pechi ob'emom 5000 m$^3$* [Influence of the diameter of air lances to work of the blast furnace with volume of 5000 m$^3$]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*, 1988, no. 2, pp. 6-8.

3. Влияние подвода дутья в кольцевой воздухопровод на равномерность его распределения по фурмам доменной печи / И. Г. Ризницкий, В. Д. Гладуш, В. П. Лялюк и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1987. – № 1. – С. 9–10.

Riznickij I. G., Gladush V. D., Lyalyuk V. P. *Vlijanie podvoda dut'ja v kol'cevoj vozduhoprovod na ravnomernost' ego raspredelenija po furmam domennoj pechi* [Influence of blast ring air pipe supply on the uniformity of its distribution tuyeres of the blast furnace]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*, 1987, no. 1, pp. 9-10.

4. Контроль распределения температур поверхности засыпи на колошнике доменной печи / М. Н. Байрака, Н. С. Гринштейн, А. К. Тараканов и др. // Сталь. – 1985. – № 4. – С. 3–7.

Bajraka M. N., Grinshtejn N. S., Tarakanov A. K. *Kontrol' raspredelenija temperatur poverhnosti zasypi na koloshnike domennoj pechi* [Control of the temperature distribution of the surface of grist in the blast furnace top]. *Stal'*, 1985, no. 4, pp. 3-7.

5. Лялюк В. П. Современные проблемы технологии доменной плавки / В. П. Лялюк. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – 164 с.

Lyalyuk V. P. *Sovremennye problemy tehnologii domennoj plavki* [Modern problems of blast furnace technology.]. Dnepropetrovsk, Porogi, 1999, 164 p.

6. Лялюк В. П. Полная энергия потока дутья и горнового газа / В. П. Лялюк, Р. Д. Каменев, А. Я. Зусмановский // Сталь. – 1999. – № 6. – С. 13–18.

Lyalyuk V. P., Kamenev R. D., Zusmanovskij A. Ja. *Polnaja energija potoka dut'ja i gornovogo gaza* [The total energy of the flow of blast gas and of furnace hearth gas]. *Stal'*, 1999, no. 6, pp. 13-18.

7. Лялюк В. П. Выбор режимов доменной плавки на комбинированном дутье с оценкой параметров фурменной зоны / В. П. Лялюк, И. Г. Товаровский // Черные металлы. – 2003. – № 11. – С. 13–16.

Lyalyuk V. P., Tovarovskij I. G. *Vybor rezhimov domennoj plavki na kombinirovannom dut'e s ocenkoj parametrov furmennoj zony* [Selection of blast furnace conditions on the combined blast with the assessment of the tuyere zone settings]. *Chernye metally*, 2003, no. 11, pp. 13-16.

8. Лялюк В. П. Механизм образования и влияние процессов в фурменных очагах на ход доменной плавки / В. П. Лялюк // Познание процессов доменной плавки: монография / под ред. В. И. Большакова и И. Г. Товаровского. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 439 с.

Lyalyuk V. P. *Mehanizm obrazovanija i vlijanie processov v furmennyh ochagah na hod domennoj plavki* [The mechanism of formation and the influence of the processes in the outbreaks tuyeres on the course of blast furnace]. *Poznanie processov domennoj plavki*. Dnepropetrovsk: Porogi, 2006, 439 p.

9. Управление газодинамическим режимом работы доменной печи на основе расчётного контроля обобщающих показателей дутьевого режима плавки / В. П. Лялюк, А. К. Тараканов, Д. А. Кассим // Черная металлургия. – 2011. – № 12. – С. 26–349.

Lyalyuk V. P., Tarakanov A. K., Kassim D. A. *Upravlenie gazodinamicheskim rezhimom raboty domennoj pechi na osnove raschjotnogo kontrolja obobshhajushhih pokazatelej dut'evogo rezhima plavki* [Management of the blast furnace gas-dynamic operation mode due to the calculation control of general indicators of blast smelting mode]. *Chernaja metallurgija*, 2011, no. 12, pp. 26-349.

10. Определение теоретической температуры горения при вдувании в горн доменной печи природного газа и пылеугольного топлива / Д. А. Кассим, В. П. Лялюк, А. К. Тараканов и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – № 2. – С. 38–43.

Kassim D. A., Lyalyuk V. P., Tarakanov A. K. *Opredelenie teoreticheskoj temperatury gorenija pri vduvanii v gorn domennoj pechi prirodnogo gaza*

*i pyleugol'nogo topliva* [Determination of the theoretical combustion temperature by blowing into the hearth of the blast furnace of natural gas and pulverized coal]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*, 2016, no. 2, pp. 38-43.

***Purpose.*** *More efficient use of pulverized coal injection in blast furnace based on the assessment and management of the size of the burning zone before the furnace tuyeres and distribution of the gas flow along the radius of the hearth.*

***Methodology.*** *The methods of calculating the total power of hearth gas flow with pulverized coal injection (PCI) are developed, which allow to control how the average value of this complex index, and its meaning to the tuyeres of a blast furnace.*

***Findings.*** *Operational calculated control of values of the total energy of the hearth gas flow by the blast furnace tuyeres with pulverized coal injection will improve gas-dynamic conditions blast furnace smelting, and consequently its effectiveness.*

***Originality.*** *The methods of calculating the total flow energy of the hearth gas with used together of PCI and natural gas are proposed.*

***Practical value.*** *Developed methodical approaches can be used in blast-furnace smelting ACS for controlling gas flow distribution along the radius of the blast furnace.*

***Key words:*** *blast-furnace smelting, injection of pulverized coal, flow of furnace hearth gas, theoretical combustion temperature, total gas flow power.*

***Рекомендована к публикации***
***д. т. н. А. К. Таракановым***

***Поступила 29.12.2016***

УДК 669.162.266 Наука

**В. В. Бочка /д. т. н./, А. В. Двоеглазова, А. В. Сова, Р. С. Бочка, К. В. Шмат**

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днипро, Украина
e-mail: alicejust53@gmail.com

# Выбор рациональных параметров процесса спекания комплексного флюса

**V. V. Bochka /Dr. Sci. (Tech.)/, A. V. Dvoiehlazova, A. V. Sova, R. S. Bochka, K. V. Shmat**

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine,
e-mail: alicejust53@gmail.com

# Elaboration of the reasonable technological parameters of the complex flux production

***Цель.*** *Для разработки технологии получения комплексного флюса высокого качества необходимо определить основные технологические показатели данной технологии.*

***Методика.*** *Эксперименты по определению основных параметров спекания комплексного флюса проводили с использованием метода центрально-композиционного ротабельного планирования второго порядка.*

***Результаты.*** *При проведении исследований параметров технологии получения комплексного флюса было получено уравнение регрессии, из которого расчётным путём определили значения факторов, обеспечивающих наибольшую величину удельной производительности установки. Эти значения соответствуют следующим цифрам: содержание концентрата в смеси – 100 %; содержание смеси в шихте – 15–25,0 %; содержание углерода в шихте – 8,0–9,0 %; влажность шихты – 5,0 %. Показатель расчётной удельной производительности при использовании этих факторов составляет 0,63 т/м$^2$·час.*

***Научная новизна.*** *Разработана модель, описывающая взаимосвязь производительности с основными технологическими факторами.*

***Практическая значимость****. Результаты данной статьи можно использовать при разработке технологических параметров получения комплексного флюса. (Ил. 1. Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.).*

***Ключевые слова****: комплексный флюс, параметры, процессы, спекание.*

**© В. В. Бочка /д. т. н./, А. В. Двоеглазова, А. В. Сова, Р. С. Бочка, К. В. Шмат, 2017 г.**