

С. А. Карпенко, А. А. Науменко  
Концерн «СоюзЭнерго»  
Л. П. Грес /д. т. н./, В. П. Иващенко /д. т. н./,  
М. Ю. Иванов  
Национальная металлургическая академия  
Украины

В. И. Набока /к. т. н./, А. П. Фоменко,  
С. Е. Сафонов  
ОАО «Запорожсталь»

## Изменения параметров доменного газа и продуктов его сжигания на ОАО «Запорожсталь» после внедрения технологии вдувания в доменные печи ПУТ

Приведены результаты исследований влияния количества вдуваемого ПУТ на параметры доменного газа и продуктов его сгорания. Показано, что при замене природного газа (90–105 м<sup>3</sup>/т), вдуваемого в доменную печь, на ПУТ (150–163 кг/т) удельный выход доменного газа и его теплота сгорания, соответственно, снижаются на 27 и 8 %. Особенностью технологии доменной плавки на ОАО «Запорожсталь» является использование горячего агломерата. При этом при вдувании ПУТ значительно снижается расход холодного кокса по отношению к горячему агломерату, что привело к увеличению температуры колошникового газа с 200–250 до 350–400 °С и влажности чистого доменного газа с 75 до 204 г/м<sup>3</sup>. Это способствовало еще большему снижению теплоты его сгорания, а также температуры горения, что требует повышения доли природного газа для обогащения доменного или же увеличения температур подогрева компонентов горения. (Ил. 7. Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.).

**Ключевые слова:** ПУТ, воздухонагреватели, колошниковый газ, влажность газа, температура дутья, теплообменники.

The survey results regarding the impact of Coal Injection quantity on the parameters of blast furnace gas and the products of combustion are shown. It is demonstrated that the specific yield of the blast-furnace gas and its heating value is reduced to 27 and 8 % correspondingly upon the replacement of natural gas (90–105 m<sup>3</sup>/t) injected into the blast furnace with the Coal Injection (150–163 kg/t). The unique feature of the blast-furnace smelting at the Open Joint Stock Company “Zaporozhstal” is the usage of hot sinter. By this while Coal Injection the cold coke consumption substantially goes down against hot sinter resulted in rise of the top gas temperature from 200–250 to 350–400 °C and the humidity of clean top gas from 75 to 204 g/m<sup>3</sup>. It facilitated the prominent reduction of heating value and also flame temperature that requires the increase of the natural gas proportion to enrich blast-furnace gas or the raise of the preheat temperature of combustion products.

**Key words:** coal injection, cowper blast heaters, top gas, gas humidity, air-blast temperature, heat exchanger uni.

### Введение

В последние годы в качестве заменителя кокса в доменных печах начали использовать ПУТ. Причем его удельный расход на предприятиях зарубежных фирм достигал 240–260 кг/т, в Китае – 300–320 кг/т [1; 2], а в нашей стране – 150–165 кг/т из-за плохого качества шихтовых материалов.

На доменных печах ОАО «Запорожсталь» имеется значительный опыт применения как природного газа, так и ПУТ. Поэтому в качестве сравнения рассмотрены изменения параметров доменного газа при вдувании в печь ПУТ и природного газа.

### Результаты исследований

В качестве исходных данных исследований использовали технические отчеты доменного цеха (ДП-2) за периоды, когда применяли только природный газ (11 мес. 2010 г.) и только ПУТ

(29 мес. 2012–2014 гг.). Обработка данных производилась с применением удельных величин (кг/т, м<sup>3</sup>/т), что дает возможность использовать эти результаты исследований для других доменных печей. Исследования показали, что при использовании только природного газа в количестве 90–105 м<sup>3</sup>/т среднее значение выхода доменного газа составляло 1938 м<sup>3</sup>/т, а только ПУТ (150–163 кг/т) – 1415 м<sup>3</sup>/т. За эти же периоды средние значения теплоты сгорания сухого доменного газа, соответственно, составляли 3890 и 3580 кДж/м<sup>3</sup>. Таким образом, при замене природного газа на ПУТ и произошедшем при этом улучшении условий работы доменных печей удельный выход доменного газа и его теплота сгорания, соответственно, уменьшились на 27 и 8 %.

Доменный газ используют не только в воздухонагревателях, но и нагревательных и терми-

ческих печах, а также в котлах ТЭЦ-ПВС. Поэтому необходимо учитывать эти изменения параметров доменного газа как при эксплуатации этих агрегатов, так и в топливном балансе предприятий, особенно при планировании использования ПУТ.

При увеличении удельного расхода природного газа удельный выход доменного газа и его теплота сгорания возрастали (рис. 1, 2). Так, при росте расхода природного газа с 90 до 110 м<sup>3</sup>/т выход газа и его теплота сгорания, соответственно, увеличивались на 10,8 и 11,5 %. При повышении расхода ПУТ значения этих показателей, соответственно, уменьшились на 21 и 1,7 % (рис. 3, 4).

Исследования влияния влажности доменного газа на параметры его сжигания

Особенностью технологии доменной плавки на ОАО «Запорожсталь» является использование горячего агломерата. При вдувании ПУТ в доменную печь значительно снизился расход холодного кокса по отношению к горячему агломерату, что привело к увеличению температуры колошникового газа с 200–250 до 350–400 °С. В связи с этим из-за недостаточного количества воды, используемой для очистки этого газа, возросла температура очищенного доменного газа с 40–45 до 55–60 °С. Этим температурам соответствуют средние значения влажности доменного газа – 75 и 190 г/м<sup>3</sup>.

Для исследований в качестве базового состава выбран вариант доменного газа, наиболее часто встречающегося при использовании 155–160 кг/т ПУТ в доменной печи (табл. 1).

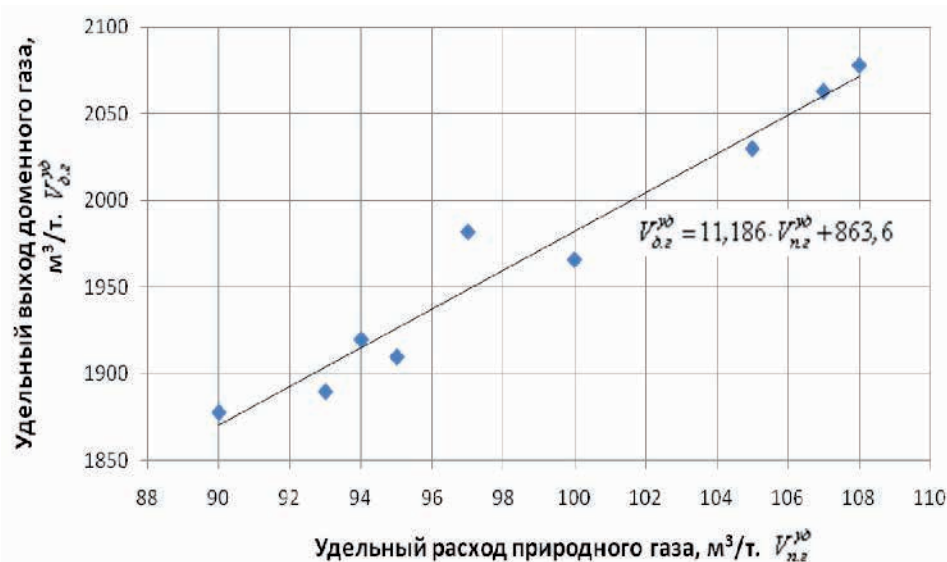


Рис. 1. Зависимость удельного выхода доменного газа от удельного расхода природного газа

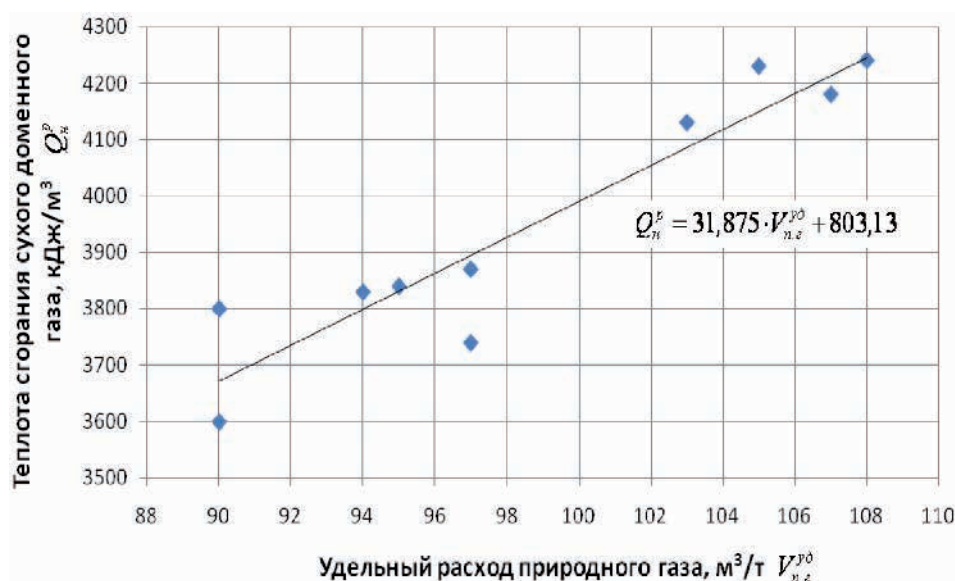


Рис. 2. Зависимость теплоты сгорания сухого доменного газа от удельного расхода природного газа на ДП-2

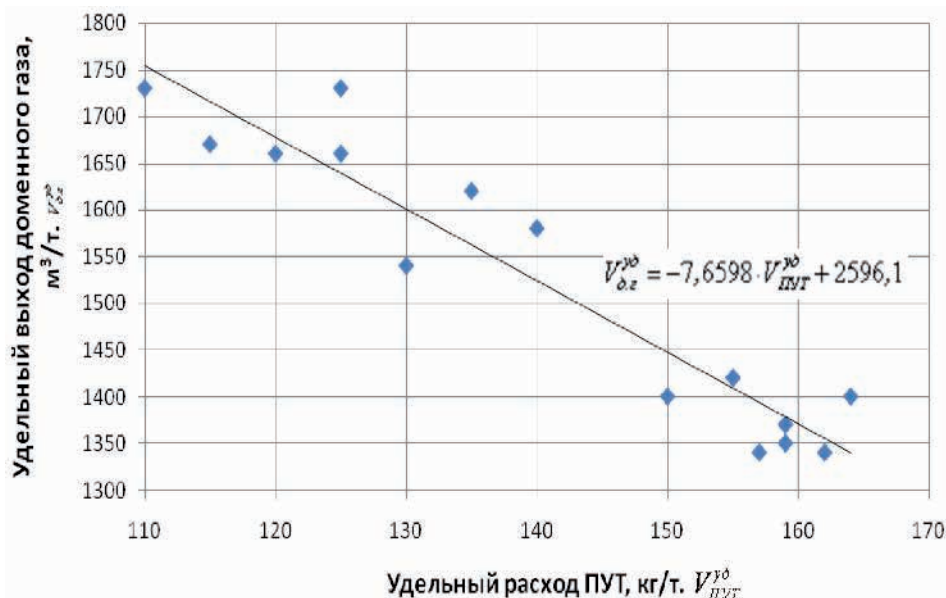


Рис. 3. Зависимость удельного выхода доменного газа от удельного расхода ПУТ без использования природного газа

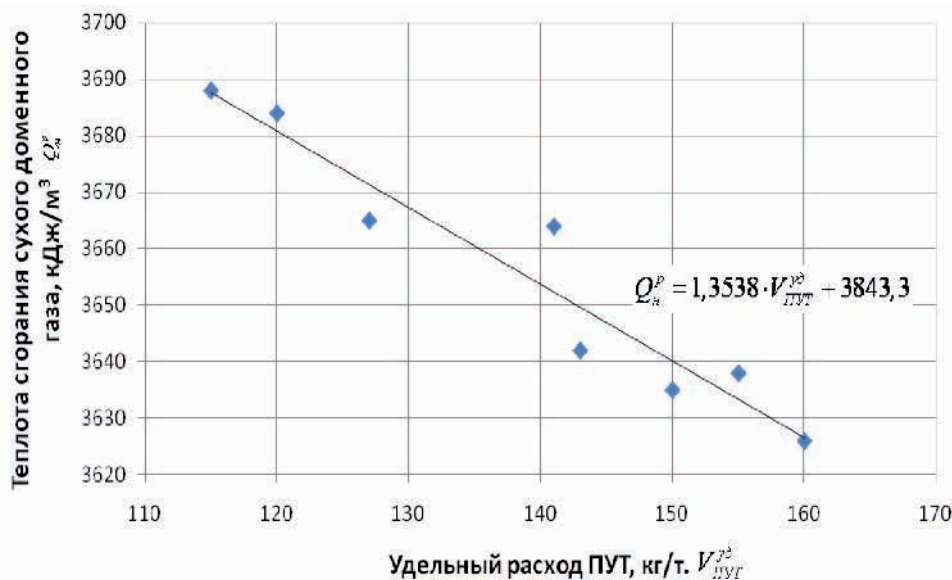


Рис. 4. Зависимость теплоты сгорания сухого доменного газа от удельного расхода ПУТ без использования природного газа

Таблица 1  
Состав сухого доменного газа, %

CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Σ	Q <sub>н</sub> <sup>p</sup> , кДж/м <sup>3</sup>
19,90	24,90	4,10	51,10	100	3623

Расчитаны изменения состава влажного доменного газа и его теплоты сгорания в зависимости от его влажности (температуры) (табл. 2).  
Результаты расчетов представлены на рис. 5. Видно, что при увеличении влажности доменного газа количество паров H<sub>2</sub>O возрастает в 8,8 раз

Изменения состава и теплоты сгорания доменного газа от его влажности

Таблица 2

Влажность, г/м <sup>3</sup>	Температура, °C	Состав, %					Q <sub>н</sub> <sup>p</sup> , кДж/м <sup>3</sup>
		CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	
18,9/20		19,44	24,33	4,00	49,92	2,30	3539
65,3/40		18,41	23,03	3,79	47,26	7,15	3351
115,8/50		17,39	21,76	3,58	44,66	12,60	3166
204,7/60		15,86	19,85	3,27	40,73	20,30	2888

(с 2,30 до 20,30 %), что приводит к снижению на 25,5 % теплоты сгорания (с 3623 до 2888 кДж/м<sup>3</sup> для сухого газа). При этом исключается из системы очистки доменного цеха около 150 м<sup>3</sup>/ч паров воды (37,7 м<sup>3</sup>/ч на ДП-2). В связи с этим в системе газоочистки необходимо компенсировать эти потери добавлением соответствующего количества «свежей» воды.

При сжигании доменного газа количество паров H<sub>2</sub>O, образующихся в результате химических реакций и внесенных доменным газом и воздухом горения, увеличивается в 2,1 раза (при влажности 65,3 г/м<sup>3</sup> и температуре 40 °С, соответственно, 204,7 г/м<sup>3</sup> и 60 °С). При этом коэффициенты теплоотдачи излучением в насадке воздухонагревателей и межтрубном пространстве теплообменников увеличатся незначительно. В первом случае из-за низких значений средней

эффективной длины луча ( $\ell_{эф} = 0,9d = 0,027$  м для каналов с Ø 40 мм). В трубчатых теплообменниках общее значение коэффициента теплоотдачи излучением имеет малое значение, так как температура дымовых газов не превышает 260–280 °С, а средняя эффективная длина луча:

$$\begin{aligned} \ell_{эф} &= 1,08d_n \cdot \left( \frac{S_1 \cdot S_2}{d_n^2} - 0,785 \right) = \\ &= 1,08 \cdot 0,04 \text{ м} \cdot \left( \frac{0,07 \cdot 0,04}{0,04^2} - 0,785 \right) = 0,042 \text{ м} \end{aligned}$$

Снижение теплоты сгорания доменного газа за счет роста его влажности приводит к уменьшению температуры горения газа и температуры дутья (рис. 6). Поэтому при сжигании в воздухонагревателях чистого доменного газа

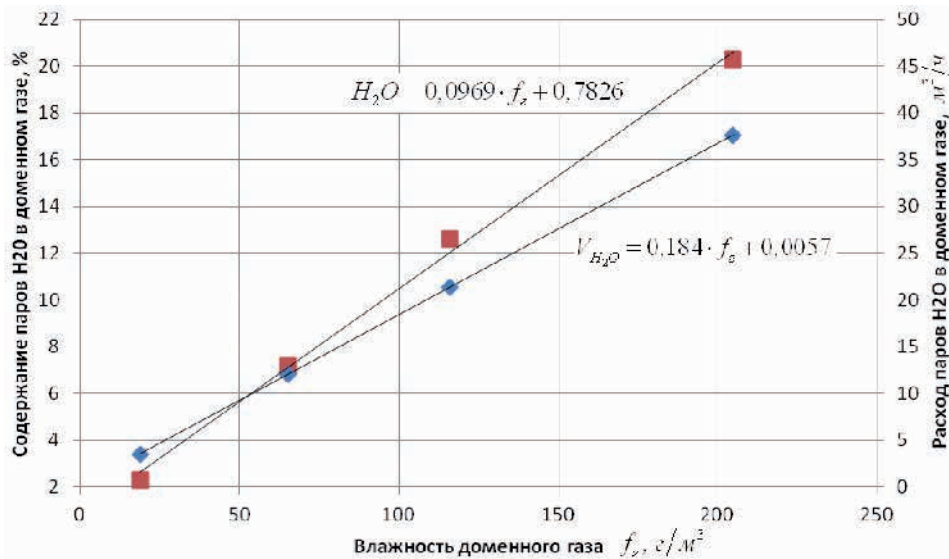


Рис. 5. Зависимость содержания паров H<sub>2</sub>O в продуктах сгорания и их количества в доменном газе от его влажности

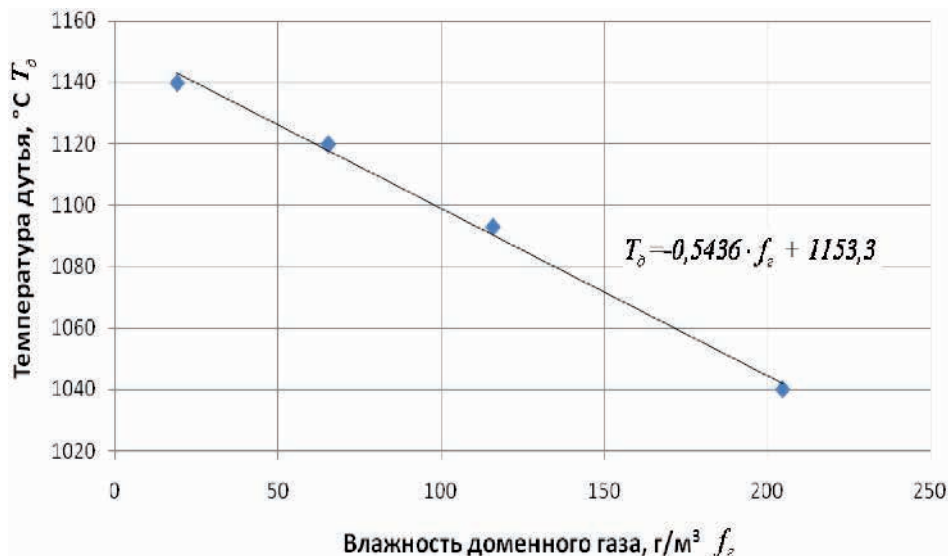


Рис. 6. Зависимость температуры дутья от влажности доменного газа при температуре воздуха 15 °С и доменного газа 20–60 °С



## ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

температура дутья зимой (при влажности газа  $65,3 \text{ г/м}^3$ ) будет на  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  больше, чем летом (соответственно,  $1120$  и  $1140 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Для повышения температуры горения доменного газа обычно его обогащают природным газом или же подогревают компоненты горения [3]. Для обеспечения температуры дутья  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  (ДП-2) при влажности доменного газа  $204,7 \text{ г/м}^3$  (летом) необходимо дополнительно сжигать  $16,56 \text{ млн м}^3/\text{год}$  природного газа или же подогревать доменный газ и воздух горения до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 7).

при замене природного газа, вдуваемого в печь, на ПУТ и произошедшем при этом улучшении условий работы доменных печей удельный выход доменного газа и его теплота сгорания, соответственно, снижаются на  $27$  и  $8 \%$ . Поэтому необходимо это учитывать как при эксплуатации тепловых агрегатов, использующих доменный газ, так и в топливном балансе предприятий, особенно при планировании использования ПУТ.

2. Особенностью технологии доменной плавки на ОАО «Запорожсталь» является использо-

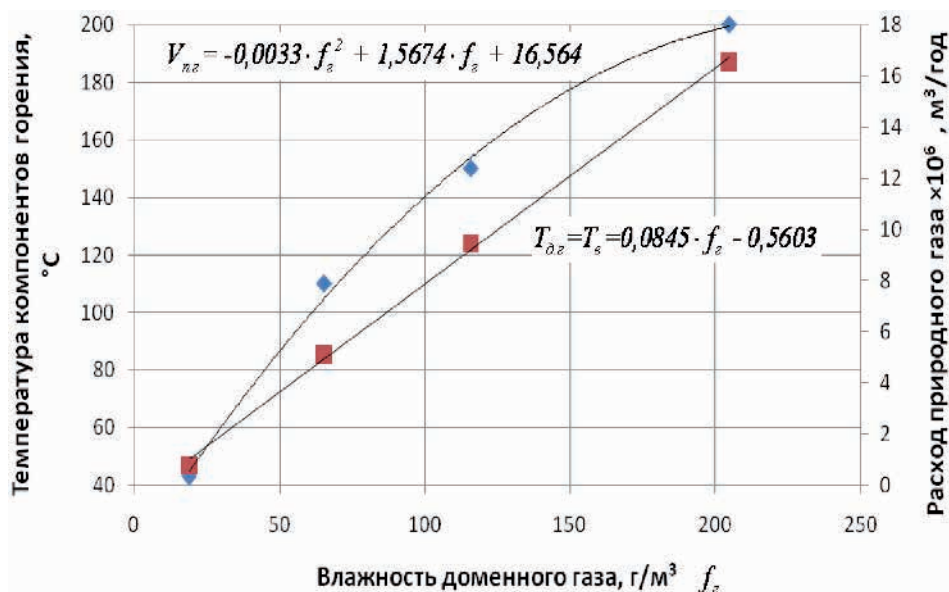


Рис. 7. Зависимость необходимых температур подогрева компонентов горения или расхода природного газа для обогащения доменного газа для поддержания температуры дутья  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  от влажности доменного газа

Таким образом, сезонная температура (зима – лето) двойственно влияет на необходимую температуру нагрева доменного дутья. Летом, когда температура доменного газа и его влажность, соответственно,  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $204,7 \text{ г/м}^3$ , теплота сгорания доменного газа для условий ДП-2 снижается до  $2890 \text{ кДж/м}^3$ . Для обеспечения температуры дутья  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  необходимо эту химическую теплоту компенсировать физической теплотой подогрева доменного газа и вентиляторного воздуха до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , что не всегда осуществимо. Зимой, когда температура оборотной воды, поступающей на газоочистку, снижается, температура чистого доменного газа и его влажность уменьшаются, соответственно, до  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $75 \text{ г/м}^3$ . Это приводит к увеличению теплоты сгорания газа до  $3350 \text{ кДж/м}^3$ . В этом случае необходимо нагревать компоненты горения уже до  $115 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Выводы

1. Длительный опыт эксплуатации доменных печей ОАО «Запорожсталь» показал, что

вание горячего агломерата. При вдувании ПУТ в доменную печь значительно снизился расход холодного кокса (до  $365\text{--}375 \text{ кг/т}$ ) по отношению к горячему агломерату, что привело к увеличению температуры колошникового газа с  $200\text{--}250$  до  $350\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$ . В связи с этим возросла температура очищенного доменного газа с  $45$  до  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , что соответствует его влажности  $75$  и  $204 \text{ г/м}^3$ . Это вызвало дополнительное снижение теплоты сгорания газа на  $16 \%$  (с  $3350$  до  $2888 \text{ кДж/м}^3$ ). Необходимо решать вопросы охлаждения и отсева агломерата и улучшения охлаждения доменного газа в системе его очистки.

3. При существующей «мокрой» системе очистки доменного газа сезонная температура (зима – лето) двойственно влияет на необходимую температуру нагрева дутья. Летом, когда влажность газа достигает  $204,7 \text{ г/м}^3$ , соответственно, снижается до  $2890 \text{ кДж/м}^3$  и теплота его сгорания. Для обеспечения температуры дутья  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  необходимо снижение тепловой способности доменного газа компен-

сировать подогревом компонентов горения (до 200 °С), что не всегда осуществимо. Зимой, когда температура оборотной воды снижается, увеличивается теплота сгорания доменного газа до 3350 кДж/м<sup>3</sup>, и компоненты горения необходимо уже нагревать до 115 °С. Следует отметить, что на предприятиях, где в системе очистки доменного газа используют градирни (ПАО «АрселорМиттал», Кривой Рог и ПАО «Алчевский металлургический комбинат»), влажность доменного газа не превышает 35 г/м<sup>3</sup>.

#### **Библиографический список**

1. Плискановский С. Г. Оборудование и эксплуатация доменных печей: учебник /

С. Г. Плискановский, В. В. Полтавец. – Д.: Пороги, 2004.

2. Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – 397 с.

3. Теплообменники доменных печей: монография / Л. П. Грес, С. А. Карпенко, А. Е. Миленина; под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Л. П. Греса. – Д.: Пороги, 2012. – 491 с.

*Поступила 02.09.2015*

