



УДК 669./162.2:662.6/9:536.7

В.И. БОЛЬШАКОВ, докт. техн. наук, академик, директор,**А.Л. ЧАЙКА**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник,**А.А. СОХАЦКИЙ**, канд. техн. наук, научный сотрудник, **А.А. МОСКАЛИНА**, ведущий инженер

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАНУ (ИЧМ им. З.И. Некрасова НАНУ), г. Днепропетровск

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Дана эксергетическая оценка эффективности доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ). Показано, что эксергетический метод исследования позволяет определить степень совершенства материально-энергетического баланса доменного производства, а также направления минимизации необратимых потерь в окружающую среду энергии и отходов производства при освоении ПУТ. Установлено, что при работе доменных печей с ПУТ показатель экологоемкости процесса улучшается в среднем на 4 %. Вместе с тем на столько же ухудшаются показатели ресурсоемкости и экологичности процесса, а потери эксергии увеличиваются в среднем на 40–55 %.

Ключевые слова: доменная печь, эксергетический метод, пылеугольное топливо, экологические показатели, термодинамическое совершенство.

В связи с освоением в доменном производстве Украины пылеугольного топлива (ПУТ) [1–3] целесообразным является разработка новых методов исследования эффективности доменной плавки, в т.ч. с использованием понятия эксергии [4–7].

Широко применяемый на практике энергетический баланс любого процесса учитывает потребление энергии всех видов. Однако он составляется только на основе первого закона термодинамики (закона сохранения энергии). Для углубленного исследования энергопотребления необходимо применять и другие законы термодинамики, в связи с чем создан эксергетический метод термодинамического анализа, учитывающий все виды энергии, участвующие в технологическом процессе, необратимо превращающиеся в теплоту и рассматриваемые во взаимодействии с окружающей средой [4, 5, 8, 9].

Начало развития эксергетического метода расчета эффективности потребления энергетических ресурсов было положено в конце XIX века в трудах У. Гиббса, Ж. Гюи, Р. Клаузиуса, А. Стодоль и др. [9–11]. Со второй половины XX столетия этот метод начали активно использовать в различных областях (в т.ч. в металлургии) при анализе, оптимизации и синтезе сложных технических систем [6, 7, 10, 11].

Эксергетический баланс доменной печи (ДП) базируется на материальном и тепловом балансах. Он дополняет их и позволяет определить степень термодинамического совершенства производства чугуна в ДП, а его

применение совместно с альтернативными способами получения чугуна дает возможность разрабатывать пути уменьшения энергоемкости металлопродукции и загрязнения окружающей среды. С помощью эксергетического метода исследования можно также количественно охарактеризовать полноту использования энергоресурсов в доменном производстве и оценить их пригодность.

Среди разнообразных видов эксергии в теплотехнологических расчетах чаще других используют химическую и физическую эксергию вещества. Физическая эксергия имеет две составляющие – изотермическую, учитывающую давление, и изобарную, являющуюся следствием разности температур вещества и окружающей среды [4]. Химическая эксергия также включает в себя две составляющие – реакционную, связанную с химическими реакциями, и концентрационную, определяемую концентрацией данного вещества в смеси (растворе) [12].

Среди внешних потерь эксергии обычно наибольшими являются потери эксергии физической, вызванные высокой температурой продуктов сгорания отходящих газов, поступающих в окружающую среду. Отличие их химического состава от состава атмосферного воздуха является причиной потери химической эксергии. Кроме того, в эксергетическом балансе возникают потери физической эксергии в твердых и жидких продуктах. Эти потери относятся к тем продуктам, для которых высокая температура не является необходимой для продолжения технологических процессов.

Запишем уравнение энергетического баланса в общем виде [4]:

$$E_{\text{прих}} = E_{\text{расх}} + \Delta E_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{прих}}$ – общее количество подведенной эксергии, МДж/т чугуна;

$E_{\text{расх}}$ – общее количество расходуемой эксергии, МДж/т чугуна;

$\Delta E_{\text{пот}}$ – потери эксергии, МДж/т чугуна.

Общее количество подведенной эксергии определяется по формуле

$$E_{\text{прих}} = E_{\text{дуть ф}} + E_{\text{пг ф}} + E_{\text{к. х}} + E_{\text{р. х}} + E_{\text{пг х}} + E_{\text{путь х}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{дуть ф}}$ и $E_{\text{пг ф}}$ – физические эксергии дутья и природного газа;

$E_{\text{к. х}}$, $E_{\text{р. х}}$, $E_{\text{пг х}}$, $E_{\text{путь х}}$ – химические эксергии кокса, железорудных материалов, природного газа и пылеугольного топлива.

Общее количество расходуемой эксергии равно

$$E_{\text{расх}} = E_{\text{чуг ф}} + E_{\text{чуг х}} + E_{\text{шп ф}} + E_{\text{шп х}} + E_{\text{к. г. ф}} + E_{\text{к. г. х}}, \quad (3)$$

где $E_{\text{чуг ф}}$, $E_{\text{шп ф}}$, $E_{\text{к. г. ф}}$ и $E_{\text{чуг х}}$, $E_{\text{шп х}}$, $E_{\text{к. г. х}}$ – соответственно физические и химические эксергии чугуна, шлака и колошниковога газа.

Оценить термодинамическое совершенство доменного процесса позволяют эксергетические КПД [4, 13]:

- КПД1 – термодинамическое совершенство доменного процесса – отношение расходуемой эксергии в доменной печи (эксергия расхода) к общему количеству подведенной эксергии (эксергия прихода) [4]

$$\text{КПД1} = \frac{E_{\text{расх}}}{E_{\text{прих}}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{прих}}$ – общее количество подведенной эксергии, МДж/т чугуна;

$E_{\text{расх}}$ – общее количество расходуемой эксергии, МДж/т чугуна.

- КПД2 – технологический КПД – показывает отношение суммы химической и физической эксергий чугуна к количеству подведенной эксергии

$$\text{КПД2} = \frac{E_{\text{чуг ф}} + E_{\text{чуг х}}}{E_{\text{прих}}}, \quad (5)$$

где $E_{\text{чуг ф}}$ и $E_{\text{чуг х}}$ – соответственно физическая и химическая эксергии чугуна, МДж/т чугуна.

- КПД3 – обобщенный КПД производства чугуна – показывает отношение суммы химической, физической эксергий чугуна и химической эксергии использован-

ного колошниковога газа к количеству подведенной эксергии

$$\text{КПД3} = \frac{E_{\text{чуг ф}} + E_{\text{чуг х}} + \frac{E_{\text{к. г. х}} \cdot \text{ВЭР}}{V_{\text{к. г. у. т.}}}}{E_{\text{прих}}}, \quad (6)$$

где $E_{\text{к. г. х}}$ – химическая эксергия колошниковога газа, МДж/т чугуна;

ВЭР – выход вторичных энергетических ресурсов потребителям, кг условного топлива на тонну чугуна (кг у.т./т чугуна);

$V_{\text{к. г. у. т.}}$ – выход колошниковога газа, кг у.т./т чугуна.

Доменная печь – один из основных источников выбросов в горно-металлургических регионах, поэтому энергетические проблемы напрямую связаны с проблемами экологическими. Для оценки воздействия производства чугуна на окружающую среду также целесообразно применять эксергетический анализ [4, 11, 12] с использованием следующих показателей:

- показатель экологоемкости процесса l ;
- показатель ресурсоемкости процесса n ;
- коэффициент экологичности объекта ε .

Показатель экологоемкости процесса l характеризует суммарную величину вредных воздействий на окружающую среду (ΣZ) в расчете на единицу полезной продукции:

$$l = \frac{\Sigma Z}{V} = \frac{E_{\text{шп ф}} + E_{\text{к. г. ф}}}{E_{\text{чуг ф}} + E_{\text{чуг х}} + E_{\text{к. г. х}} + E_{\text{шп х}}}, \quad (7)$$

где V – объем полезной продукции.

Эта величина представляет собой удельные выбросы всех отходов или отдельных компонентов. Показатель ресурсоемкости процесса (n) определяет расход энергии (ΣW), воды, воздуха, земельных и иных природных ресурсов ($\Sigma П$) на единицу полезной продукции:

$$n = \frac{\Sigma П + \Sigma W}{V} = \frac{E_{\text{прих}}}{E_{\text{чуг ф}} + E_{\text{чуг х}} + E_{\text{к. г. х}} + E_{\text{шп х}}}. \quad (8)$$

Коэффициент экологичности объекта (ε) характеризует отношение чистого полезного эффекта к израсходованным природным ресурсам:

$$\varepsilon = \frac{V - \Sigma Z}{\Sigma П + \Sigma W} = \frac{1 - l}{n} = \frac{(E_{\text{чуг ф}} + E_{\text{чуг х}} + E_{\text{к. г. х}} + E_{\text{шп х}}) - (E_{\text{шп ф}} + E_{\text{к. г. ф}})}{E_{\text{прих}}}. \quad (9)$$

Анализ величин экологических показателей [4, 12] позволяет оценить эффективность технологических процессов и «вредную» работу, совершаемую производством над окружающей средой: чем выше химическая



и физическая эксергия отходов и выбросов, тем больше вред они могут причинить окружающей среде.

Как следует из эксергетического анализа фактических и прогнозных технико-экономических показателей работы ДП № 1 объемом 3000 м³ ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (ПАО «АМК») за 2011 г. [13], сокращение удельного расхода кокса и природного газа привело к ухудшению показателей термодинамического совершенства доменной плавки, ресурсоемкости и экологичности процесса при работе с ПУТ в среднем на 4 %, при этом показатель экологичности процесса улучшился на 4 % (рис. 1).

На ДП № 1 при увеличении расхода ПУТ и уменьшении расхода природного газа усиливалась окружная неравномерность и росла величина температурно-тепловых нагрузок (особенно на заплечики и фурменные приборы) в нижней части печи. Тепловые нагрузки на одну фурму возросли со 130–190 до 160–240 кВт, неравномерность их распределения увеличилась более чем в полтора раза. Средняя величина внешних тепловых потерь составляла: при работе с природным газом – 14 МВт (12–18 МВт, 6 замеров), с ПУТ и природным газом – 20 МВт (15–25 МВт, 6 замеров), только с ПУТ – 23 МВт (18–26 МВт, 4 замера) [1–3].

Эксергетический анализ работы доменной печи с ПУТ показал, что замена природного газа ПУТ наряду с экономией кокса привела к увеличению разности между приходом эксергии и ее расходом, т.е. к увеличению потерь эксергии в среднем на 40–55 %. Уменьшить эту разницу позволяет эффективная организация работы доменной печи с использованием ПУТ, например совместное вдувание с ПУТ небольшого количества природного газа (30 м³/т чугуна) при использовании железорудных материалов и кокса нестабильного состава и качества, увеличение содержания углерода в ПУТ,

уменьшение внешних потерь теплоты, сокращение внутренних потерь эксергии в процессах тепло- и массообмена в рабочем пространстве печи и оптимизация технологического процесса работы ДП.

Анализ экологических показателей работы ДП № 1 ПАО «АМК» показал, что при переходе на технологию работы с ПУТ они изменились следующим образом: экологичность упала с 0,138 до 0,133, ресурсоемкость выросла с 1,247 до 1,307, коэффициент экологичности уменьшился с 0,691 до 0,663.

Сопоставление экологических показателей доменного производства с аналогичными показателями других химико-металлургических и энергетических производств свидетельствует о том, что доменное производство имеет низкую эколого- и ресурсоемкость и высокий коэффициент экологичности (табл. 1) [6].

На основе опытного периода ДП № 1 ПАО «АМК» было проведено аналитическое исследование влияния параметров дутья, расхода ПУТ и природного газа, содержания углерода в ПУТ и коксе, внешних тепловых потерь на эксергетические показатели доменной плавки (табл. 2).

Анализ влияния параметров дутья, расхода ПУТ и природного газа, их соотношения, содержания углерода в ПУТ и коксе, внешних тепловых потерь и степени окисленности железа в шихте на эксергетические показатели доменной плавки неоднозначен. Поэтому комбинация разных величин этих параметров может дать эксергетический эффект – увеличение или замедление уменьшения эксергетического КПД при увеличении вдувания ПУТ в доменную печь (табл. 3). Как показал анализ данных, приведенных в табл. 3, рост других параметров одновременно с увеличением вдувания ПУТ лишь частично замедляет уменьшение термодинамического совершенства доменного процесса.

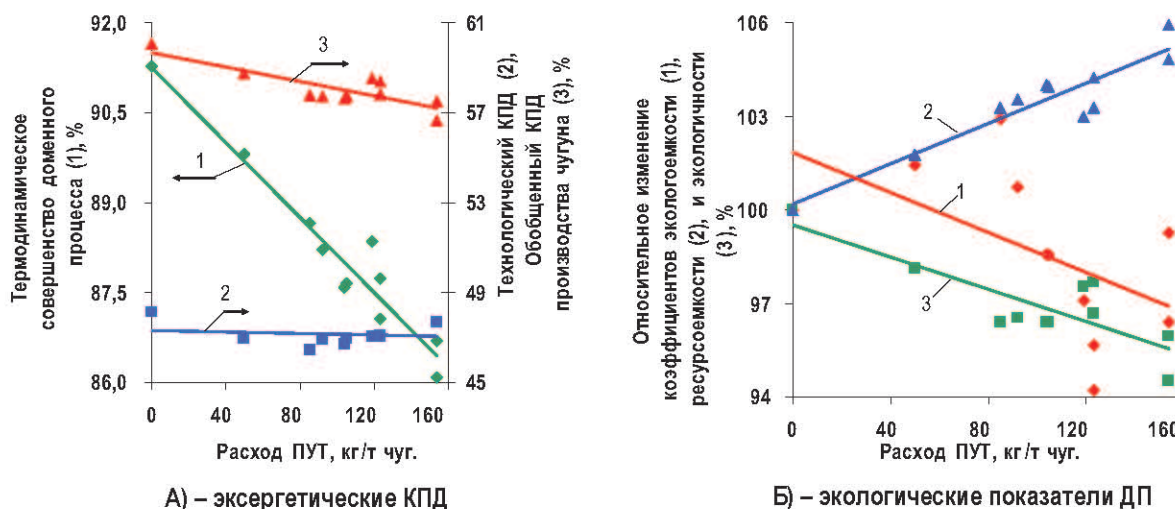


Рисунок 1 – Показатели термодинамического совершенства и взаимодействия производства с окружающей средой

Таблица 1 – Экологические показатели доменной печи и некоторых химико-металлургических и энергетических производств [6]

Производство	Эксергетический КПД	Коэффициент экологичности	Ресурсоемкость	Экологоемкость
Углеобогадательная фабрика	0,827	0,69	1,21	0,16
Коксовая батарея	0,912	0,85	1,10	0,07
Аглофабрика	0,178	-0,03	5,62	1,14
Доменный цех	0,693	0,56	1,44	0,20
Мартеновский цех	0,583	0,47	1,72	0,20
Конвертер	0,805	0,66	1,24	0,18
Цех горячего проката	0,622	0,57	1,61	0,08
Тепловое хозяйство	0,276	0,23	3,63	0,18

Таблица 2 – Влияние параметров дутья, расхода топливных добавок, содержания углерода в ПУТ и коксе, внешних тепловых потерь на эксергетические показатели

№	Факторы	Приход эксергии, %	Расход эксергии, %	Потери эксергии, %	КПД1, %	КПД2, %	КПД3, %	Производительность печи, %	Удельный расход кокса, %	Удельный выход сухого колошника, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Увеличение расхода дутья относительно варианта 250 тыс. м ³									
1а	250–274	+0,14	-0,02	+1,2	-0,1	-0,07	-0,1	+9,4	+0,1	+0,1
1б	250–298	+0,31	-0,02	+2,5	-0,3	-0,15	-0,3	+18,7	+0,3	+0,2
1в	250–316	+0,45	0,00	+3,4	-0,4	-0,22	-0,4	+25,6	+0,4	+0,3
2	Увеличение содержания кислорода в дутье относительно варианта 21 %									
2а	21–26	-0,5	-1,5	+6,1	-0,82	+0,25	+1,41	+22	+0,5	-12
2б	21–31	-0,9	-2,5	+10,8	-1,45	+0,42	+2,54	+44	+0,9	-22
2в	21–36	-1,1	-3,2	+14,0	-1,89	+0,52	+3,38	+65	+1,2	-29
2г	21–41	-1,1	-3,5	+15,9	-2,12	+0,55	+3,94	+86	+1,6	-33
3	Увеличение температуры дутья относительно варианта 0 °С									
3а	0–300	-5	-4	-9	+0,7	+2,1	-8,6	+18	-3	-9
3б	0–600	-9	-8	-17	+1,4	+4,2	-15,0	+36	-6	-17
3в	0–900	-13	-11	-25	+2,1	+6,1	-18,9	+54	-9	-24
3г	0–1200	-16	-14	-31	+2,8	+7,9	-19,7	+73	-11	-31
4	Увеличение совместного вдувания природного газа и пылеугольного топлива относительно варианта 0/155*									
4а	0–30/ 155–125*	+0,4	+2,0	-9,8	+1,4	-0,2	+0,6	-1,0	-0,4	+1,8
4б	0–60/ 155–95*	+0,8	+3,9	-19,7	+2,7	-0,4	+1,4	-2,1	-0,7	+3,6
4в	0–105/ 155–50*	+1,4	+7,0	-34,8	+4,8	-0,6	+2,7	-3,6	-1,4	+6,3
5	Увеличение вдувания только природного газа относительно варианта 0 м ³ /т чугуна									
5а	0–50	3,6	3,5	3,7	-0,01	-1,8	-0,4	-2,7	-8,4	+3,9
5б	0–100	7,1	7,2	5,7	+0,08	-3,5	-0,6	-5,2	-16,7	+7,7
5в	0–150	10,7	11,0	6,4	+0,26	-5,0	-0,7	-7,7	-25,0	+11,5
6	Увеличение вдувания только ПУТ относительно варианта 0 кг/т чугуна									
6а	0–60	+3,4	+0,3	+46,1	-2,8	-1,7	-2,4	-1,1	-9,4	+1,1
6б	0–120	+6,8	+0,7	+91,5	-5,3	-3,3	-4,3	-2,3	-18,7	+2,1
6в	0–210	+12,0	+1,4	+159,8	-8,8	-5,6	-6,4	-4,1	-32,8	+3,4
7	Увеличение содержания углерода в ПУТ относительно варианта 40 %									
7а	40–60	-5	0,3	-23,0	+4,0	+2,1	+2,6	-0,8	-7,4	+0,7
7б	40–80	-9	0,6	-46,4	+8,5	+4,4	+5,6	-1,7	-15,0	+1,3
7в	40–100	-14	1,0	-70,3	+13,6	+7,0	+9,1	-2,5	-22,6	+1,9



Таблица 2 – Продолжение

№	Факторы	Приход эксергии, %	Расход эксергии, %	Потери эксергии, %	КПД1, %	КПД2, %	КПД3, %	Производительность печи, %	Удельный расход кокса, %	Удельный выход сухого колошника газа, %
8	Увеличение содержание углерода в коксе относительно варианта 80 %									
8а	80–84	0,0	+0,06	-0,4	+0,05	0,0	0,0	0,0	-4,8	0
8б	80–88	0,0	+0,11	-0,7	+0,10	0,0	0,0	0,0	-9,1	0
8в	80–94	0,0	+0,19	-1,2	+0,17	0,0	0,0	0,0	-14,9	0
8г	80–100	0,0	+0,26	-1,7	+0,23	0,0	0,0	0,0	-20,0	0
9	Увеличение влажности дутья относительно варианта 0 г/м ³									
9а	0–8	+0,5	+0,7	-0,7	+0,2	-0,3	+0,1	-0,3	+0,7	+0,8
9б	0–16	+1,0	+1,4	-1,4	+0,3	-0,5	+0,3	-0,6	+1,4	+1,7
9в	0–28	+1,8	+2,5	-2,5	+0,6	-0,9	+0,5	-1,1	+2,4	+3,0
10	Увеличение тепловых потерь относительно варианта 14 МВт									
10а	14–16	+0,2	+0,1	+1,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,5	+0,1	+0,3
10б	14–18	+0,4	+0,2	+2,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,9	+0,2	+0,7
10в	14–20	+0,7	+0,3	+3,1	-0,3	-0,3	-0,4	-1,3	+0,4	+1,0
10г	14–24	+1,1	+0,5	+5,2	-0,5	-0,5	-0,7	-2,2	+0,6	+1,8

* – в числителе – расход природного газа, м³/т чугуна, в знаменателе – расход пылеугольного топлива, кг/т чугуна

Таблица 3 – Комбинированное влияние расхода ПУТ на эксергетические показатели доменного процесса

№	Часовой расход ПУТ, т/час	Дополнительный изменяемый параметр	Приход эксергии, МДж/т чугуна	Расход эксергии, МДж/т чугуна	Потери эксергии, МДж/т чугуна	Термодинамическое совершенство доменного процесса, %	Технологический КПД, %	Обобщенный КПД производства чугуна, %	Производительность, %	Удельный расход кокса, %	Удельный выход сухого колошника газа, %
1	Увеличение вдувания только ПУТ относительно варианта 38 т/час (154 кг/т чугуна)										
1а	38–42	154–179	+0,9	+0,1	+5,7	-0,6	-0,4	-0,4	-0,3	-3,4	+0,2
1б	38–46	154–187	+1,7	+0,3	+11,4	-1,3	-0,8	-0,8	-0,7	-6,8	+0,5
1в	38–52	154–212	+3,1	+0,5	+20,0	-2,2	-1,4	-1,3	-1,2	-11,9	+0,8
2	Увеличение вдувания ПУТ и влажности дутья относительно варианта 12 г/м ³										
2а	38–42	12–20	+1,1	+0,5	+5,3	-0,5	-0,5	-0,3	-0,5	-3,1	+0,7
2б	38–46	12–28	+2,5	+1,3	+10,3	-1,0	-1,2	-0,5	-1,1	-5,8	+1,7
2в	38–48	12–32	+3,2	+1,8	+12,8	-1,2	-1,5	-0,6	-1,4	-7,2	+2,3
3	Увеличение вдувания ПУТ вместе с повышением температуры дутья относительно варианта 1100 °С										
3а	38–40	1100–1150	-0,2	-0,4	+1,3	-0,20	+0,1	-0,2	+1,7	-2,1	-1,4
3б	38–42	1100–1200	-0,3	-0,8	+2,6	-0,40	+0,2	-0,3	+3,4	-4,1	-2,7
4	Увеличение вдувания ПУТ и содержания углерода в коксе относительно варианта 87 %										
4а	38–42	87–90	+0,9	+0,2	+5,4	-0,6	-0,4	-0,4	-0,3	-6,6	+0,2
4б	38–46	87–94	+1,7	+0,4	+10,8	-1,2	-0,8	-0,8	-0,7	-13,7	+0,5
4в	38–52	87–100	+3,1	+0,6	+18,9	-2,1	-1,4	-1,3	-1,2	-23,4	+0,8
5	Увеличение вдувания ПУТ и природного газа относительно варианта 3 м ³ /т чугуна										
5а	38–42	3–15	+1,7	+1,0	+6,3	-0,6	-0,8	-0,5	-1,0	-6,1	+1,1
5б	38–46	3–27	+3,4	+2,0	+12,6	-1,2	-1,6	-0,9	-2,0	-12,4	+2,3
5в	38–52	3–45	+6,1	+3,6	+22,1	-2,0	-2,7	-1,6	-3,5	-22,0	+4,1

Сопоставление влияния температуры и концентрации кислорода в дутье на обобщенный КПД производства чугуна (КПД3) показало, что увеличение содержания кислорода в дутье повышает обобщенный КПД

производства чугуна, а увеличение температуры дутья – понижает его. Следовательно, в условиях дефицита вторичных энергоресурсов (доменного газа) и впятеро меньшей стоимости ПУТ по сравнению с природным га-

зом существует возможность увеличения выхода доменного газа потребителям, роста производства и сокращения чистых энергозатрат при получении чугуна за счет

увеличения концентрации кислорода в дутье и уменьшения его температуры без ухудшения теплогазодинамических условий в фурменной зоне (рис. 2).

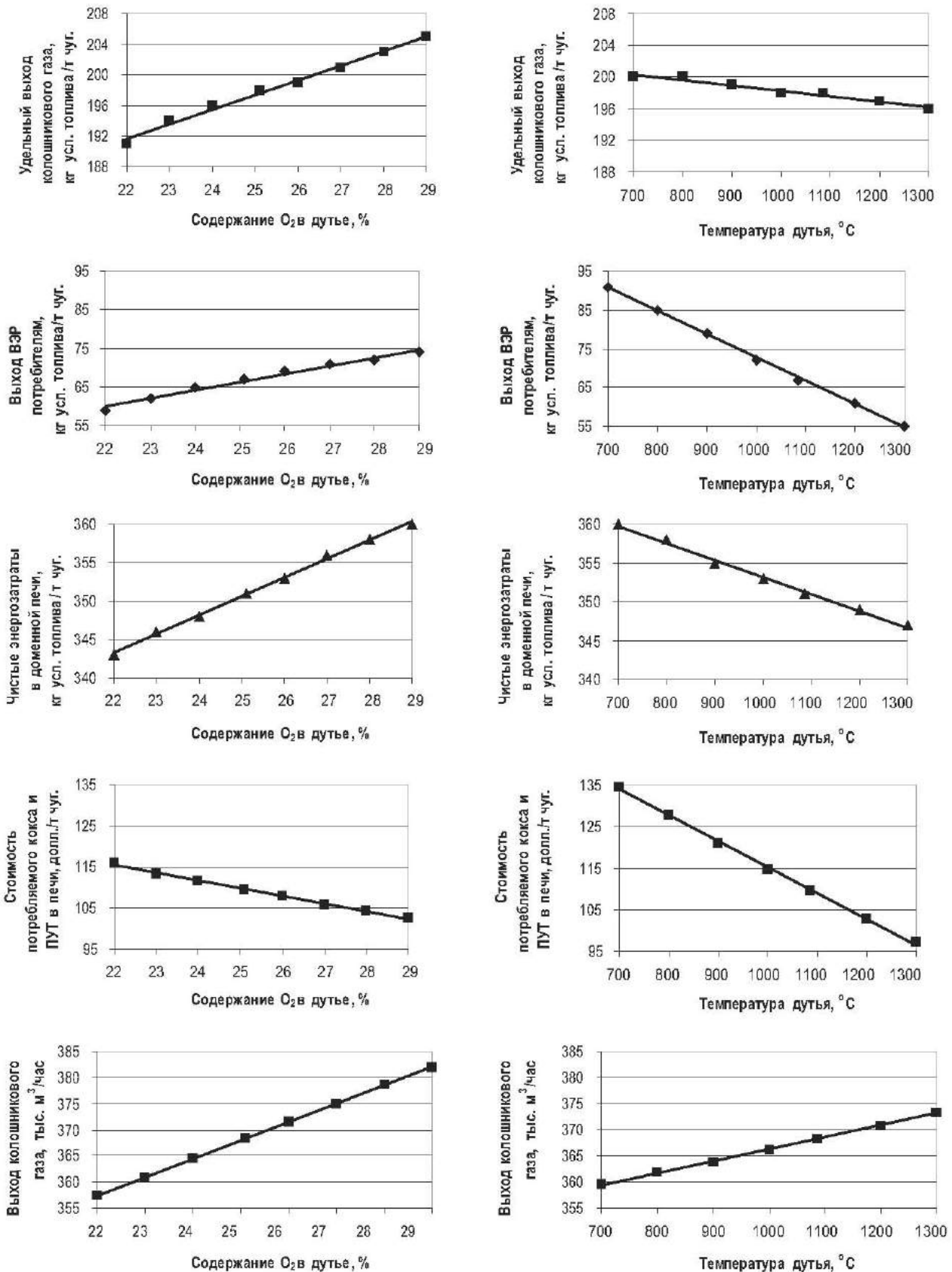


Рисунок 2 – Влияние содержания кислорода в дутье и температуры дутья на энергозатраты в ДП и выход колошникового газа потребителям при поддержании температуры фурменной зоны на постоянном уровне



При поддержании постоянной температуры в фурменной зоне за счет изменения расхода ПУТ увеличение содержания O_2 в дутье на 1 % приводит к увеличению на 3 % производительности печи и теплоты сгорания сухого колошниково-го газа, уменьшению на 3–4 % расхода кокса и на 1 % – степени прямого восстановления (rd); при этом удельный выход колошниково-го газа уменьшается на 2 % (вследствие увеличения производительности), а его часовой выход увеличивается на 1 % (рис. 2).

Повышение температуры дутья на 100 °С при поддержании постоянной температуры в фурменной зоне за счет изменения расхода ПУТ приводит к увеличению производительности в среднем на 2 % и теплоты сгорания сухого колошниково-го газа – на 1 %, уменьшению расхода кокса примерно на 9 % и увеличению rd на 0,1 %; при этом удельный выход колошниково-го газа уменьшается на 1,5 %, а часовой – увеличивается на 0,5 % (рис. 2).

В нестандартных условиях работы печи оптимальным вариантом, позволяющим увеличить производство без повышения тепловой и газодинамической напряженности, является одновременное уменьшение температуры дутья и увеличение содержания O_2 в дутье (на каждые 50 °С снижения температуры дутья необходимо увеличивать содержание O_2 в дутье на 1 %) при поддержании постоянной температуры в фурменной зоне за счет изменения расхода ПУТ. Данный вариант режима работы ДП при прочих равных условиях повышает производительность печи без увеличения удельного расхода кокса и энергозатрат в других переделах за счет уменьшения энергозатрат на нагрев дутья и увеличения теплоты сгорания и часового выхода колошниково-го газа.

Эксергетический баланс, составленный для различных вариантов развития технологии, производственных линий, предприятий, отрасли, региона и страны позволяет отразить позитивные и негативные воздействия жизнедеятельности человеческого общества на производство и окружающую среду, определить потенциал энергосбережения и наметить наиболее эффективные пути решения проблемы с учетом «эффекта первого шага» [9, 10].

Так как энергосбережение и энерготехнологическое комбинирование являются мощнейшим энергетическим резервом, необходимо выполнить полный баланс всех источников энергии с использованием методов эксергетического анализа при различных условиях развития металлургии и экономики Украины в целом [9, 10].

При формировании технологического режима ведения доменной плавки с ПУТ следует учитывать потребности других производств предприятия в доменном газе с целью уменьшения общего потребления природного газа и других энергоносителей.

ВЫВОДЫ

1. Эксергетический анализ позволяет определить степень совершенства материально-энергетического баланса доменного производства, а также направления минимизации необратимых потерь в окружающую среду энергии и отходов производства. Эксергетический баланс является дополнением к тепловому балансу и более точно характеризует общее термодинамическое совершенство процесса или установки при использовании в них энергии разного качества.

2. Эксергетический анализ работы доменной печи с использованием ПУТ показал, что замена природного газа ПУТ наряду с экономией кокса приводит к увеличению разности между приходом и расходом эксергии (потери эксергии выросли в среднем на 40–55 %). Уменьшить эту разницу позволяет эффективная организация работы доменной печи с использованием ПУТ, предусматривающая, в частности, совместное вдувание ПУТ и небольшого количества (около 30 м³/т чугуна) природного газа при использовании железорудных материалов и кокса нестабильного состава и качества, увеличение содержания углерода в ПУТ, уменьшение внешних потерь теплоты, сокращение внутренних потерь эксергии в процессах тепло- и массообмена в рабочем пространстве печи и оптимизации технологического процесса работы доменной печи.

3. Увеличенные и неравномерные по окружности печи тепловые нагрузки на заплечики и горн при вдувании ПУТ, а также преждевременный выход из строя холодильников указывают на необходимость пересмотра традиционных технических решений при разработке конструкций и систем охлаждения новых и ремонтируемых печей, переходящих на технологию работы с ПУТ, и на важность автоматизированного контроля внешних тепловых потерь. Таким образом, для успешного и эффективного применения в Украине технологии доменной плавки с использованием ПУТ необходимо внедрение современных средств контроля и управления радиальным и окружным распределением шихтовых материалов и газового потока.

4. В результате эксергетического анализа экологических показателей при освоении ПУТ установлено, что показатель экологичности процесса, характеризующий величину вредных воздействий на окружающую среду в расчете на единицу полезной продукции, улучшился примерно на 4 %, а показатели ресурсоемкости и экологичности процесса ухудшились на 4 %.

5. Выполнена ранжировка параметров дутья, расхода ПУТ и природного газа, их соотношения, содержания углерода в ПУТ и коксе, внешних тепловых потерь на эксергетические показатели доменной плавки и определены пути увеличения выхода доменного газа при

освоении ПУТ. Установлено, что при работе печи с ПУТ эксергетические показатели ухудшаются по сравнению с работой на природном газе. Для компенсации их уменьшения необходимо выполнять оптимизацию дутьевого режима доменной плавки.

6. Отмечено, что в нестандартных условиях работы печи для увеличения производства без повышения тепловой и газодинамической напряженности необходимо уменьшить температуру дутья и одновременно увеличить содержание O_2 в дутье (оптимальным вариантом является повышение концентрации O_2 в дутье на 1 % на каждые 50 °С снижения температуры дутья) при поддержании постоянной температуры в фурменной зоне за счет изменения расхода ПУТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Освоение работы доменной печи полезным объемом 3000 м³ с применением пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, Т. Г. Шевченко, Р. В. Авдеев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – № 4. – С. 36–40.
2. Тепловая работа доменной печи, полезным объемом 3000 м³, при переходе на технологию применения пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий, Р. В. Авдеев // VI Международный Конгресс по агло-коксо-доменному производству «Проблемы доменного и смежных производств в современных условиях. Технологии использования разных видов топлива и сырья», 20–24 мая 2013 г., г. Ялта. – С. 261–270.
3. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий // *Металл и литье Украины*. – 2013. – № 10. – С. 5–10.
4. Эксергетический анализ работы доменной печи на комбинированном дутье / А. В. Бородулин, О. И. Варивода, А. Ф. Ковтун, Б. М. Хенкин // *Деп. в Черметинформ*. 30.11.89. № 5296–4 М 89. – 46 с. – РЖ *Металлургия*. 1990. ЗВ178 Деп.
5. Rant Z. Exergie – ein neues Wort für «Technische Arbeitsfähigkeit» / Z. Rant // *Forsch. Ing. Wes.* – 1956. – Bd. 22. N 14. – S. 36–37.
6. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, Г. И. Орел. – Кривой Рог : СП «Мир», 2004. – 412 с.
7. Проблемы и политика энергосбережения на Западно-Сибирском металлургическом комбинате / Р. С. Айзатулов, А. В. Бородулин, Н. Е. Рехтин, В. С. Степанов [и др.] // *Сталь*. – 1997. – № 8. – С. 70–77.
8. Сельский Б. И. Оценка эффективности использования сырья и топливно-энергетических ресурсов на ОАО «ЗСМК» на основе эксергетического метода термодинамического анализа / Б. И. Сельский, В. С. Степанов, А. В. Воронцов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2002. – N 2. – С. 59–65.
9. Шаргут Я. Эксегергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М. : Энергия, 1968. – 276 с.
10. Степанов В. С. Эффективность использования энергии / В. С. Степанов, Т. Б. Степанова. – Новосибирск : Наука СО, 1994. – 256 с.
11. Меркер Э. Э. Энергосбережение в промышленности и эксергетический анализ технологических процессов : учебное пособие / Э. Э. Меркер, Г. А. Карпенко, И. М. Тынников. – 4-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол : ТНТ, 2010. – 316 с.
12. Бродянский В. М. Эксегергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек ; под ред. В. М. Бродянского. – М. : Энергоиздат, 1988. – 288 с.
13. Эксегергетический анализ доменной плавки при применении различных видов топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, А. А. Сохацкий, А. А. Москалина // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2012. – Вып. 26. – С. 35–41.

Поступила в редакцию 02.04.2014

Надано эксергетичну оцінку ефективності доменної плавки з вдуванням пилоугольного палива (ПВП). Показано, що эксергетичним методом дослідження можна визначити ступінь досконалості матеріально-енергетичного балансу доменного виробництва, а також напрями мінімізації необоротних втрат у навколишнє середовище енергії та відходів виробництва при освоєнні ПВП. Установлено, що при роботі доменних печей з ПВП показник екологічності процесу покращується в середньому на 4 %. Разом з тим на стільки ж погіршуються показники ресурсоемності та екологічності процесу, а втрати эксергії збільшуються у середньому на 40–55 %.

Exergic estimation of efficiency of blast-furnace melting with injection of pulverized-coal fuel was provided. It is shown that exergic method of investigation allows to define degree of perfection of material-energetic balance of blast-furnace process as well as direction of minimization of irreversible loss of energy and waste at atmosphere during mastering of pulverized-coal fuel. It is defined that environmental capacity of process is bettered on average by 4% during blast furnace operation using pulverized-coal fuel. At the same time resource intensity and ecological compatibility of process become worse by same value, and exergy loss increases on average by 40–55%.