

**А.Л.Чайка, В.И.Большаков, А.А.Сохацкий, А.А.Москалина,  
В.Ю.Шостак**

**АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПУТ  
В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ**

*Институт черной металлургии НАН Украины*

Целью работы является эксергетическая оценка эффективности доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ). Показано, что эксергетический метод исследования позволяет определить меру совершенства материально-энергетического баланса доменного производства и направления минимизации необратимых потерь в окружающую среду энергии. Установлено, что при освоении ПУТ показатель экологичности процесса улучшается в среднем на ~4%. При этом показатели ресурсоемкости и экологичности процесса ухудшаются на ~4%, потери эксергии увеличиваются в среднем на ~40÷55%. Эксергетические показатели доменной плавки необходимо учитывать при разработке направления совершенствования работы доменных печей с ПУТ.

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

**Введение.** В связи с освоением в доменном производстве Украины пылеугольного топлива (ПУТ) [1, 2, 3] целесообразным является расширение методов исследования эффективности доменной плавки, в том числе с использованием понятия эксергии [4-7].

Широко применяемый на практике энергетический баланс любого процесса, учитывающий потребление энергии всех видов, составляется на основе первого закона термодинамики (закона сохранения энергии). Для углубления анализа энергоиспользования необходимо привлечение других законов термодинамики, в связи, с чем использовано понятие «эксергия» и основан эксергетический метод термодинамического анализа, учитывающей все виды энергий, участвующих 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 трудами У. Гиббса, Ж. Гюи, Р. Клаузиуса, А. Стодоль и других [9, 10, 11]. Со второй половины XX столетия этот метод стал активно использоваться в различных областях при анализе, оптимизации и синтезе сложных технических систем, в том числе и в металлургии [6, 7, 10, 11].

**Метод исследования.** Эксергетический баланс доменной печи базируется на материальном и тепловом балансах, он дополняет их и позволяет определить меру термодинамического совершенства производства чугуна в доменной печи и совместно с альтернативными

способами получения чугуна, разрабатывать пути уменьшения энергоемкости металлопродукции и загрязнения окружающей среды. Использование эксергетического метода исследования позволяет количественно охарактеризовать полноту использования энергоресурсов в доменном производстве и оценить их пригодность.

В реальных, всегда необратимых процессах подведенная энергия не теряется, снижается лишь ее пригодность к совершению работы из-за потерь эксергии. Таким образом, определение потерь эксергии в различных звеньях любого технологического процесса позволяет выявить и количественно оценить причины низкого уровня энергоиспользования, получить информацию о возможностях увеличения КПД данного процесса [8]. Различия между понятиями “энергия” и “эксергия” приведены в табл.1 [12].

Таблица 1. Сопоставление особенностей энергии и эксергии

| Энергия W  | Эксергия E   |
|--|--|
| Зависит только от параметров вещества или потока энергии и не зависит от параметров окружающей среды                             | Зависит от параметров как системы, так и окружающей среды  |
| Всегда имеет значение, отличное от нуля (равна в соответствии с уравнением Эйнштейна $mc^2$ )*                                   | Может иметь значение равное нулю (в нулевом состоянии при полном равновесии с окружающей средой)                             |
| Подчиняется закону сохранения в любых процессах, и уничтожаться не может   | Подчиняется закону сохранения при обратимых процессах; в реальных, необратимых процессах частично или полностью уничтожается |
| Превратимость одних видов в другие ограничена по условиям второго начала термодинамики для всех процессов, в том числе обратимых | Превратимость одних составляющих в другие не ограничена для обратимых процессов по условиям второго начала термодинамики     |

\* На практике при решении термодинамических задач, не связанных с ядерными реакциями, рассматривают только часть внутренней энергии вещества, отсчитывая ее от некоторого условного уровня.

Среди разнообразных видов эксергии в теплотехнологических расчетах чаще других используют химическую и физическую эксергию вещества (рис.1). Физическая эксергия состоит из двух составляющих – изотермической, учитывающей давление, и изобарной, являющейся следствием отличия температуры вещества от состояния 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].

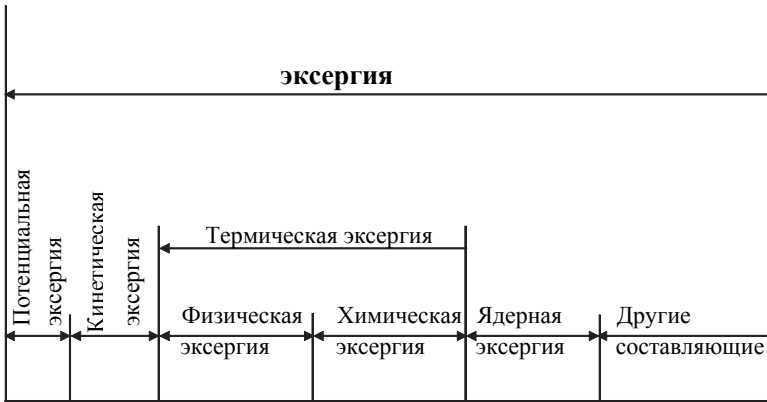


Рис.1. Составляющие эксергии потока вещества

Тепловой и эксергетический балансы не отрицают, а только дополняют друг друга: если в процессе или установке используется и получается энергия разного качества, то их термодинамическое совершенство более правильно характеризует эксергетический баланс [8]. В отдельных случаях, когда исследуется объект, к которому подводится и в котором получается безэнтروпийная энергия, значения энергетического и эксергетического КПД могут совпадать [10].

Среди внешних потерь эксергии обычно наибольшими являются потери эксергии физической, вызванные высокой температурой продуктов сгорания уходящих газов, поступающих в окружающую среду. Отличие химического состава продуктов сгорания уходящих газов 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.

Сравнивая потери энергии в энергетическом балансе и потери эксергии в эксергетическом балансе промышленной печи, можно сделать следующие выводы [9]:

1. Проявление потерь посредством эксергетического баланса делает их более заметными, чем в энергетическом балансе. Большинство причин, уменьшающих совершенство процесса, более трудно выявляется в энергетическом балансе.

2. Наиболее важные потери эксергии не имеют аналогов в энергетическом балансе. К ним можно отнести, например, потери эксергии, вызванные необратимостью химических реакций и теплообмена в нагревательной камере печи.

3. Некоторые потери, несмотря на совпадение названий, имеют неодинаковое техническое значение.

Так, например, в соответствии с эксергетической интерпретацией отдача тепла в окружающую среду само по себе не является потерей. Потеря эксергии, вызванная этим явлением, возникает только вследствие его необратимости, т. е. конечной разности температур между камерой, отдающей тепло, и окружающей средой. Эта разность технических значений очень заметно проявляется при рассмотрении потерь, вызванных водяным охлаждением. Эксергетический баланс показывает большие потери, вызванные необратимостью теплообмена между охлаждаемой средой и охлаждающей водой. В то же время сам отбор тепла охлаждающей водой и отдача его окружающей среде являются причиной очень малой потери эксергии, поскольку средняя температура охлаждающей воды незначительно отличается от температуры окружающей среды.

4. Наибольшее совпадение технических значений потерь, выявляющихся в обоих балансах, проявляется при анализе потерь, вызванных отдачей в окружающую среду неполностью использованных уходящих газов. Однако в этом случае обозначаются количественные различия. Так, например, относительные потери, связанные с высокой температурой продуктов сгорания, уходящих в окружающую среду, в эксергетическом балансе значительно меньше, чем в энергетическом.

Следует обратить внимание на то, что энергетический баланс не дает возможности различать качество энергии теряемых продуктов сгорания в зависимости от уровня их температуры.

Внешняя потеря химической эксергии значительно отличается от внешней потери химической энергии. Энергетический баланс обнаруживает потери химической энергии только в случае, когда продукты сгорания или другие газы содержат горючие компоненты. Дополнительная химическая эксергия проявляется даже в том случае, когда уходящие газы никаких горючих компонентов не содержат [9].

**Эксергетический баланс доменной печи.** В общем виде эксергетический баланс доменной печи имеет вид [4]:

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

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

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

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

Общее количество подведенной эксергии определяется:

$$Ex_{\text{прих}} = Ex_{\text{дут ф}} + Ex_{\text{пг ф}} + Ex_{\text{к х}} + Ex_{\text{р х}} + Ex_{\text{пг х}} + Ex_{\text{пуг х}} \quad (2)$$

где  $Ex_{\text{дут ф}}$  и  $Ex_{\text{пг ф}}$  – физическая эксергия дутья и природного газа;

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

Общее количество расходуемой эксергии определяется:

$$Ex_{\text{расх}} = Ex_{\text{чуг ф}} + Ex_{\text{чуг х}} + Ex_{\text{шл ф}} + Ex_{\text{шл х}} + Ex_{\text{к.г. ф}} + Ex_{\text{к.г. х}} \quad (3)$$

где  $E_{\text{чуг. ф}}$ ,  $E_{\text{шл. ф}}$ ,  $E_{\text{к.г. ф}}$  – физические эксергии чугуна, шлака и колошниковога газа;

$E_{\text{чуг. х}}$ ,  $E_{\text{шл. х}}$ ,  $E_{\text{к.г. х}}$  – 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  $E_{\text{чуг. ф}}$  – физическая эксергия чугуна, МДж/т чугуна;

$E_{\text{чуг. х}}$  – химическая эксергия чугуна, МДж/т чугуна.

КПД3 – обобщенный КПД производства чугуна – показывает отношение суммы химической, физической эксергий чугуна с химической эксергией использованного колошниковога газа к количеству подведенной эксергии:

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

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

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

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

Доменная печь (ДП) является и источником выбросов в горно-металлургических регионах, а энергетические проблемы напрямую связаны с проблемами экологическими. Для оценки воздействия производства чугуна на окружающую среду также целесообразно использовать эксергетический анализ [4, 11, 12], для чего применяют следующие показатели:

- показатель экологичности процесса  $l$ ;
- показатель ресурсоемкости процесса  $n$ ;
- коэффициент экологичности объекта  $\varepsilon$ .

Показатель экологичности процесса  $l$  характеризует величину вредных воздействий на окружающую среду ( $\sum Z$ ) в расчете на единицу полезной продукции ( $V$ )

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

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

$$n = \frac{\Sigma\Pi + \Sigma W}{V} = \frac{Ex_{\text{прих}}}{Ex_{\text{чуг.ф.}} + Ex_{\text{чуг.х.}} + Ex_{\text{к.г.х.}} + Ex_{\text{шл.х.}}} \quad (8)$$

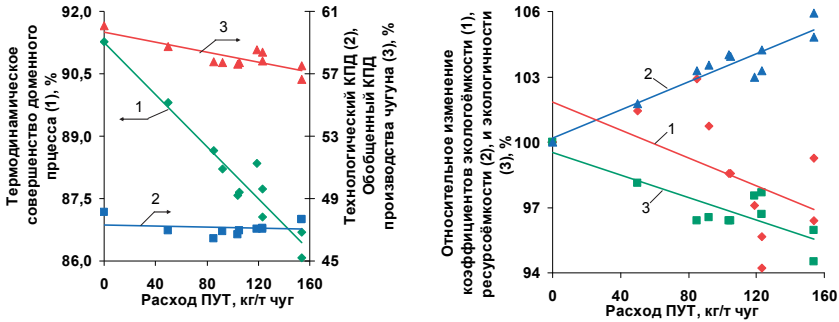
Коэффициент экологичности объекта ( $\varepsilon$ ) характеризует отношение чистого полезного эффекта к израсходованным природным ресурсам

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

Оценка эффективности технологических процессов по величинам экологических показателей [4, 12] позволяет оценить и «вредную» работу, совершаемую производством над окружающей средой: чем выше химическая и физическая эксергия отходов и выбросов, тем большую работу над окружающей средой они могут совершать.

**Изложение основных результатов исследований.** Эксергетический анализ фактических и прогнозных технико-экономических показателей работы ДП №1 ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (ПАО «АМК») объемом 3000 м<sup>3</sup> по данным ее работы за 2011 г. [13] показал, что наряду с сокращением удельного расхода кокса и природного газа показатели термодинамического совершенства доменной плавки, ресурсоемкости и экологичности процесса при работе с ПУТ ухудшились в среднем на 4 %, а показатель экологичности процесса улучшился на 4% (рис.2).

Эксергетический анализ работы доменной печи с ПУТ показал, что замена природного газа ПУТ наряду с экономией кокса привела к увеличению разности прихода эксергии к ее расходу, т.е. 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 порядка 30 м<sup>3</sup>/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 оптимизации технологического процесса работы доменной печи.



А) – эксергетические КПД

Б) – экологические показатели ДП

Рис.2 Показатели термодинамического совершенства и взаимодействия производства с окружающей средой

Анализ экологических показателей работы доменной печи № 1 ПАО «АМК» показал, что при переходе на технологию работы с ПУТ они изменились следующим образом: экологоемкость – с 0,138 до 0,133, ресурсоемкость – с 1,247 до 1,307, коэффициент экологичности – с 0,691 до 0,663).

Сопоставление экологических показателей доменного производства с другими химико-металлургическими и энергетическими производствами показало, что доменное производство имеет низкие показатели экологоемкости и ресурсоемкости и высокий коэффициент экологичности (табл.2) [6].

Таблица 2. Экологические показатели доменной печи и некоторых химико-металлургических и энергетических производств [6]

| Цех                        | эксергетический КПД | коэффициент экологичности | ресурсоемкость | экологоемкость |
|----------------------------|---------------------|---------------------------|----------------|----------------|
| Углеобогащительная 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           |
| Горячего проката           | 0,622               | 0,57                      | 1,61           | 0,08           |
| Тепловое хозяйство         | 0,276               | 0,23                      | 3,63           | 0,18           |

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.3).

Таблица 3. Влияние параметров дутья, расхода топливных добавок, содержания углерода в ПУТ и коксе, внешних тепловых потерь на эксергетические показатели доменного процесса

| №  | Факторы   | Приход эксергии, % | Расход эксергии, % | Потери эксергии, % | КПД1, % | КПД2, % | КПД3, % | Производительность, % | 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 <sup>3</sup>   |                    |                    |                    |         |         |         |                       |                          |                                    |
| 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 вдувания природного газа и пылеугольного топлива совместно относительно варианта 0/155*, м <sup>3</sup> /т чугуна, кг/т чугуна |                    |                    |                    |         |         |         |                       |                          |                                    |
| 4а | 0÷30/*<br>155÷125   | +0,4               | +2,0               | -9,8               | +1,4    | -0,2    | +0,6    | -1,0                  | -0,4                     | +1,8                               |
| 4б | 0÷60/*<br>155÷95  | +0,8               | +3,9               | -19,7              | +2,7    | -0,4    | +1,4    | -2,1                  | -0,7                     | +3,6                               |
| 4в | 0÷105/*<br>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 <sup>3</sup> /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                               |



| 1  | 2  | 3    | 4     | 5     | 6     | 7    | 8    | 9    | 10    | 11   |
|--|--|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|
| 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 |
| 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 <sup>3</sup> |      |       |       |       |      |      |      |       |      |
| 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, м <sup>3</sup> /т чугуна, в знаменателе – расход пылеугольного топлива, кг/т чугуна. |  |      |       |       |       |      |      |      |       |      |

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 этих параметров может дать эксергетический эффект (увеличение или замедление уменьшения эксергетического КПД при увеличении вдувания ПУТ в доменную печь) (табл.4). Анализ данных, приведенных в табл. 4 показал, что увеличение других параметров при совместном увеличении вдувания ПУТ лишь частично «замедляет» уменьшение термодинамического совершенства доменного процесса. Сопоставление влияния температуры и концентрации кислорода в дутье на обобщенный КПД производства чугуна (КПДЗ который показывает отношение суммы химической, физической эксергии чугуна с химической эксергией использованного колошникового газа к количеству подведенной эксергии) показало, что увеличение содержания кислорода в дутье увеличивает обобщенный КПД производства чугуна, а увеличение температуры дутья напротив уменьшает. Следовательно, в условиях дефицита доменного газа, меньшей в пять раз стоимости ПУТ по сравнению с природным газом, существует возможность увеличения выхода вторичных энергоресурсов (доменный газ) потребителям, увеличения производства и уменьшения чистых энергозатрат в производстве чугуна за счет увеличения концентрации кислорода в дутье и уменьшения его температуры, не ухудшая тепло-газодинамические условия в фурменной зоне (рис.3).

Таблица 4. Комбинированное влияние расхода ПУТ на энергетические показатели доменного процесса

| №  | Часовой расход ПУТ, т/час  | Дополнительный изменяемый параметр | Приход эксергии, МДж/т чугу | Расход эксергии, МДж/т чугу | Потери эксергии, МДж/т чугу | Термодинамическое совершенство доменного процесса, % | Технологический КПД, % | Обобщенный КПД производства чугуна, % | Производительность, % | Удельный расход кокса, % | Удельный выход сухого колошникового газа, % |
|----|--|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|------------------------|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------|---|
| 1  | Увеличение вдувание только ПУТ, относительно варианта 38 т/час (154 кг/т чугу)                           |                                    |                             |                             |                             |  |                        |                                       |                       |                          |   |
| 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 вместе с увеличением влаги в дутье, относительно варианта 12 г/ м <sup>3</sup>   |                                    |                             |                             |                             |  |                        |                                       |                       |                          |   |
| 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 увеличением 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 вместе с увеличением 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 вместе с увеличением вдувания ПГ, относительно варианта 3 м <sup>3</sup> /т чугу |                                    |                             |                             |                             |  |                        |                                       |                       |                          |   |
| 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  |

При поддержании постоянной температуры в фурменной зоне за счет изменения расхода ПУТ увеличение содержания O<sub>2</sub> в дутье на 1% приводит к увеличению на 3% производительности печи и теплоты сгорания сухого колошникового газа; уменьшению расхода кокса на ~3-4% и степени прямого восстановления (rd) на 1%; и, несмотря на уменьшение

удельного выхода колошникового газа на 2% (за счет увеличения производительности), его часовой выход увеличивается на 1% (рис.3).

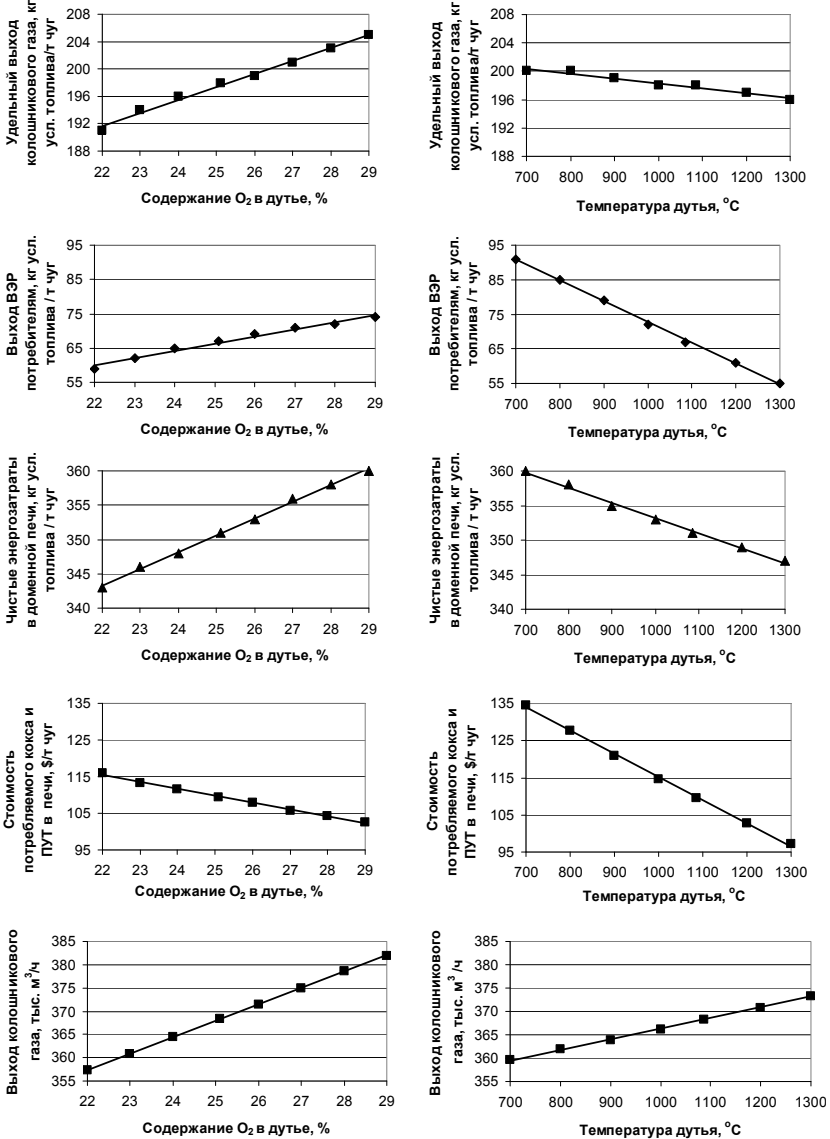


Рис.3. Влияние содержания кислорода в дутье и температуры дутья на энергозатраты в ДП и их выход потребителям при поддержании температуры фурменной зоны на постоянном уровне

Увеличение температуры дутья на 100°С при поддержании постоянной температуры в фурменной зоне за счет изменения расхода ПУТ приводит к увеличению производительности на ~2% и теплоты сгорания сухого колошникового газа на ~1%; уменьшению расхода кокса на ~9% и увеличению степени прямого восстановления (rd) на 0,1%; уменьшение удельный выход колошникового газа уменьшился на 1,5%, а часовой увеличился на 0,5% (рис.3).

В нестандартных условиях работы печи компромиссным и оптимальным вариантом позволяющим увеличить производство не допуская увеличения тепловой и газодинамической напряженности, является совместное уменьшение температуры дутья и увеличение содержания O<sub>2</sub> в дутье (на каждые 50°С увеличения температуры дутья необходимо увеличивать содержания O<sub>2</sub> в дутье на 1%) при поддержании постоянной температуры в фурменной зоне за счет изменения расхода ПУТ. Данный вариант режима работы печи, при прочих равных условиях, увеличивает 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 колошникового газа.

Эксергетический баланс, составленный для различных вариантов развития технологии, производственных линий, предприятия, отрасли, региона и государства в целом позволяет отразить позитивное и негативное воздействие жизнедеятельности человеческого общества на производство и окружающую среду, определить потенциал и резерв энергосбережения и наметить наиболее эффективные пути решения проблемы с учетом «эффекта первого шага» [9, 10].

Рассматривая энергосбережение и энерго - технологическое комбинирование как мощнейший альтернативный источник энергии, необходимо выполнить полный баланс всех энергоресурсов с использованием методов эксергетического анализа при различных вариантах развития металлургии и экономики Украины в целом [9, 10].

**Заключение.** Эксергетический анализ позволяет определить меру совершенства материально-энергетического баланса доменного производства и направления минимизации необратимых потерь в окружающую среду энергии и отходов производства. Эксергетический баланс не отрицает, а только дополняет тепловой баланс: если в процессе или в установке используется энергия разного качества, то их общее термодинамическое совершенство более правильно характеризует эксергетический баланс.

Эксергетический анализ работы доменной печи с ПУТ показал, что замена природного газа ПУТ наряду с экономией кокса привела к увеличению разности прихода эксергии к ее расходу, т.е. увеличению потерь эксергии в среднем на ~40÷55%. Уменьшить эту разницу позволяет эффективная организация работы доменной печи. Например,

совместное вдувание ПУТ и небольшого количества природного газа (порядка  $30 \text{ м}^3/\text{т}$  чугуна), увеличение содержания углерода в ПУТ, уменьшение внешних потерь теплоты, сокращение внутренних потерь эксергии в процессах тепло- и массообмена в рабочем пространства печи и оптимизации технологического процесса работы доменной печи.

Увеличенные и неравномерные по окружности печи тепловые нагрузки на заплеки и горн при вдувании ПУТ, преждевременный выход из строя холодильников указывают на необходимость пересмотра традиционных технических решений при разработке конструкций и систем охлаждения новых и реконструируемых печей, переходящих на технологию работы с ПУТ, и важность автоматизированного контроля внешних тепловых потерь.

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.

Эксергетический анализ экологических показателей при освоении ПУТ показал, что показатель экологоёмкости процесса, характеризующий величину вредных воздействий на окружающую среду в расчете на единицу полезной продукции, улучшился на  $\sim 4\%$ , а показатели ресурсоемкости и экологичности процесса, которые определяют расход энергии, воды, воздуха, земельных и иных природных ресурсов на единицу полезной продукции и отношение чистого полезного эффекта к израсходованным природным ресурсам соответственно ухудшились на  $\sim 4\%$ .

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 вторичных энергоресурсов при освоении ПУТ в условиях дефицита доменного газа.

Установлено, что при работе с ПУТ эксергетические показатели ухудшаются по сравнению с работой на природном газе. Для замедления уменьшения эксергетических показателей необходимо выполнять оптимизацию дутьевого режима доменной плавки.

В нестандартных условиях работы печи компромиссным и оптимальным вариантом позволяющим увеличить производство не допуская увеличения тепловой и газодинамической напряженности, является совместное уменьшение температуры дутья и увеличение содержания  $\text{O}_2$  в дутье (на каждые  $50^\circ\text{C}$  увеличения температуры дутья необходимо увеличивать содержания  $\text{O}_2$  в дутье на 1%) при поддержании постоянной температуры в фурменной зоне за счет изменения расхода ПУТ.

При формировании технологического режима ведения доменной плавки с ПУТ необходимо учитывать энергетические потребности других

производств предприятия в доменном газе (по количеству и теплоте сгорания) с целью уменьшения общего потребления природного газа и других энергоносителей.

1. *Освоение работы доменной печи полезным объемом 3000 м<sup>3</sup> с применением пылеугольного топлива* / В.И.Большаков, А.Л.Чайка, В.В.Лебедев, Т.Г.Шевченко, Р.В.Авдеев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – №4. – С. 36-40.
2. *Тепловая работа доменной печи, полезным объемом 3000 м<sup>3</sup>, при переходе на технологию применения пылеугольного топлива* / В.И.Большаков, А.Л.Чайка, В.В.Лебедев, А.А.Сохацкий, Р.В.Авдеев // VI Международный Конгресс по агло-кокс-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.Лебедев, А.А.Сохацкий // *Металл и литей 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.* – РЖМеталлургия. – 1990. – 3В178 Деп.
5. *Rant Z. Exergie – ein neues Wort für “Technische Arbeitsfähigkeit”.* // *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., Степанов В.С., Воронцов А.В.* Оценка эффективности использования сырья и топливно-энергетических ресурсов на ОАО «ЗСМК» на основе эксергетического метода термодинамического анализа. // *Изв.вузов. Черная металлургия*. – 2002. – N 2. – С.59-65.
9. *Шаргут Я., Петела Р.* Эксергия /– М.: Энергия, 1968. – 276 с.
10. *Степанов В.С., Степанова Т.Б.* Эффективность использования энергии. – Новосибирск: Наука СО, 1994. – 256 с.
11. *Меркер Э.Э., Карпенко Г.А., Тынников И.М.* Энергосбережение в промышленности и эксергетический анализ технологических процессов. Учебное пособие. 4-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол. ТНТ, 2010. – 316 с.
12. *Бродянский В. М., Фратиер В., Михалек К.* Эксергетический метод и его приложения. / Под ред. В. М.Бродянского. – М.: Энергоиздат, 1988. – 288 с.
13. *Эксергетический 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.

*Статья рекомендована к печати докт.техн.наук И.Г.Муравьевой*

*О.Л.Чайка, В.І.Большаков, О.А.Сохацький, А.О.Москаліна, В.Ю.Шостак*

**Аналіз енергоефективності застосування ПВП у доменному виробництві з використанням ексергетичного методу дослідження**

Метою роботи є ексергетична оцінка ефективності доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива (ПВП). Показано, що ексергетичний метод дослідження дає змогу визначити міру досконалості матеріально-енергетичного балансу доменного виробництва та напрямки мінімізації незворотних втрат у навколишнє середовище енергії і відходів виробництва при освоєнні ПВП. Встановлено, що при освоєнні ПВП показник екологічності процесу покращується у середньому на ~4%, а показники ресурсоемності та екологічності процесу погіршуються на ~4%, втрати ексергії збільшуються в середньому на ~40÷55%. Ексергетичні показники доменної плавки необхідно враховувати при розробці напрямів удосконалення роботи доменних печей з використанням ПВП.

**Ключові слова:** доменна піч, ексергетичний метод, пиловугільне паливо, екологічні показники, термодинамічна досконалість

*A.L.Chayka, V.I.Bolshakov, A.A.Sokhatsky, A.A.Moskalina, V.Y.Shostak*

**Analysis of energy application of PCI blast furnace production using the exergetic method of research**

The aim of work is exergy estimation of efficiency blast melting with injection pulverized coal injection (PCI). It is shown that the exergy method of study allow determine the degree of perfection of the material and energy balance of the blast furnace production and directions of minimizing irreversible losses to the environment energy and waste production during the development of the PCI. It was established that during the development of PCI ecology capacity indicator improved by an average of ~4%, and resource consumption and environmental process deteriorate by about 4%, the loss of exergy increase average by about 40÷55%. Exergy indices of blast-furnace must be considered when developing directions of perfection of work of blast furnaces with the PCI.

**Keywords:** blast furnace, exergy method, pulverized coal injection, environmental performance, thermodynamic perfection