

УДК 669.162.2: 622.78: 536.7

А.В. Бородулин, А.Д. Ковалев, А.Л. Чайка, А.А. Москалина,
В.В. Турищев

**ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА
БЕЗОБЖИГОВЫХ ОКАТЫШЕЙ, ЧУГУНА И
УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ
МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ**

Аннотация. Показано, что для обоснования и внедрения технологии рационального использования энергетических и сырьевых ресурсов при производстве металла целесообразно использовать эксергетический метод анализа. Представлен эксергетический анализ энергосберегающих технологий производства безобжиговых окатышей и чугуна, уменьшения энергоемкости металлопродукции.

Великий математик и гражданин нашего Отечества Н.Н. Моисеев утверждал следующее: «Информация, так же как и энергетика, является основой человеческой деятельности и развития общества. Недостаток информации делает человека слепым, не дает ему возможности правильно использовать свою силу, и это не может быть компенсировано никаким наращиванием мощности!». Эти проблемы уже давно являются животрепещущими в металлургии Украины [1].

С 50-х годов выделился в самостоятельное направление специальный раздел, связанный с понятием «эксергии». Эксергетический анализ расширил наши информационные возможности и позволил выявить связи термодинамических характеристик объектов исследования с технико-экономическими, экологическими и иными показателями производства.

Научные основы эксергетического анализа заложены в конце XIX века трудами У. Гиббса, Ж. Гюи, Р. Клаузиуса, А. Стодолы, использующие первый и второй законы термодинамики, но до 30-х годов практически не применялся для анализа промышленных процессов. Большую роль в разработке и применении эксергетического анализа сыграли работы А.И. Андрющенко, Я. Шаргута [2], Г.Бэра [3], В.М. Бродянского [4],

© Бородулин А.В., Ковалев А.Д., Чайка А.Л., Москалина А.А., Турищев В.В., 2015

И. Л. Лейтеса, Е.И. Янговский в металлургии – В.С. и Т.Б. Степановых [5], А.В. Бородулина [6], Э.Э. Меркера [7] и других.

В Японии процедура расчета по этому методу была установлена в JIS японскими индустриальными стандартами в 1980 г. [8].

Основополагающая идея эксергетического метода анализа заключается во введении наряду с фундаментальным понятием энергии, дополнительного показателя – эксергии, учитывающего тот факт, что энергия, в зависимости от внешних условий, может иметь разную ценность для практического использования («качество» энергии). Среди разнообразных видов эксергии, в инженерных расчетах, чаще других используют физическую и химическую эксергию вещества [4-9]. Физическая эксергия состоит из двух составляющих – изотермической, учитывающей давление, и изобарной, являющейся следствием отличия температуры вещества от состояния окружающей среды. Химическая эксергия включает в себя две составляющие – реакцию, связанную с химическими реакциями, и концентрационную, определяемую концентрацией данного вещества в смеси (растворе) [4-9].

1. Эксергетический анализ безобжиговых окатышей

Заметное внимание специалистов в последнее время фокусируется на безобжиговом методе окускования. Продукты окускования – безобжиговые окатыши используются в доменных печах Украины, Японии, Кореи, и в процессе прямого получения железа [10-12].

Производственный процесс получения безобжиговых окатышей включает железосодержащие материалы (концентраты, пыли и шламы доменного и сталеплавильного производств), твердое топливо (угли, коксик и другие фракцией – 0,071 мм), связующее вещество – портландцемент (8-12% к расходу шихты).

Преимуществом технологии производства безобжиговых окатышей является то, что в ней не применяется тепловая обработка продуктами сгорания, например, природного газа. При их производстве не выделяются NO_x , SO_x , и другие газы. Сокращаются и выбросы CO_2 в атмосферу. По металлургическим свойствам они обладают достаточной прочностью в холодном состоянии и при восстановлении при тепловой обработке, восстанавливаются с высокой скоростью в связи с присутствием в них 10-20 % углерода твердого топлива [13].

Для сравнения безобжиговых технологий с технологиями окускования (таких как производство агломерата, обожженных окаты-

шей, металлизированных продуктов) с точки зрения оценки термодинамического совершенства и экологических показателей производства традиционная количественная оценка тепловой энергии, осуществляемая на основании первого закона термодинамики (тепловой баланс), не достаточна.

В табл. 1, 2 приведены фундаментальные уравнения для описания эксергии для установившейся системы [14]. Атмосферные условия выбираются как стандартные и определяются следующим образом: $P_0=1 \text{ атм}$; $T_0=298,15 \text{ К}$; состав воздуха: 75,60% N_2 ; 20,34% O_2 ; 3,12% H_2O ; 0,03% CO_2 ; 0,91% Ar .

При расчете движения эксергии, проверяются массовые балансы технологических данных. Химическая, термическая, давления и смешанная эксергия рассчитываются индивидуально и затем суммируются для того, чтобы получить общие затраты эксергии для рассматриваемой системы. Величины стандартной эксергии твердого и газообразного вещества известны и приведены в табл. 3, 4.

Таблица 1

Уравнения эксергии

| | |
|---|-------------|
| $\varepsilon = \sum n_i \varepsilon_i^0$ | химическая |
| $(\sum n_i C_{pi})\{ T - T_0 - T_0 \ln(T/T_0) \}$ | термическая |
| $(\sum n_i)R T_0 \ln\{ \sum(P_i/P_0) \}$ | давления |
| $R T_0 \sum[n_i \ln\{ n_i/(\sum n_i) \}]$ | смешанная |

Таблица 2

Уравнение Ранга для расчета эксергии топлива

| | |
|---------|-------------------------------|
| Газ | $\varepsilon = 0,950 H_h$ |
| Жидкое | $\varepsilon = 0,975 H_h$ |
| Твердое | $\varepsilon = H_i + r\omega$ |

Таблица 3

Стандартная эксергия газов ε^0 , кДж/моль

| Химический состав, % | N_2 | O_2 | H_2O | CO_2 | H_2 | CO | CH_4 |
|----------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ε^0 , кДж/моль | 0,71 | 3,93 | 8,63 | 20,14 | 235,39 | 275,55 | 830,74 |

Стандартная эксергия твердых веществ ε^0 , кДж/моль

| Твердое | | | | | | | | | |
|----------------------------|------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|
| Химический состав, % | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MnO | CaO | C | Fe ₂ O ₃ | Fe ₃ O ₄ | FeO | Fe |
| ε^0 , кДж/моль | 0,00 | 0,00 | 100,36 | 110,41 | 410,83 | 0,00 | 96,97 | 118,74 | 368,41 |

Эксергетический баланс технологии производства безобжиговых окатышей можно представить в виде выражения:

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

Здесь $E_{x \text{ пр}}$, $E_{x \text{ расх}}$, $E_{x \text{ пот}}$ – соответственно эксергия прихода, расхода и эксергетические потери, кДж/т;

Схема эксергетического баланса приведена на рис.1 и имеет вид:

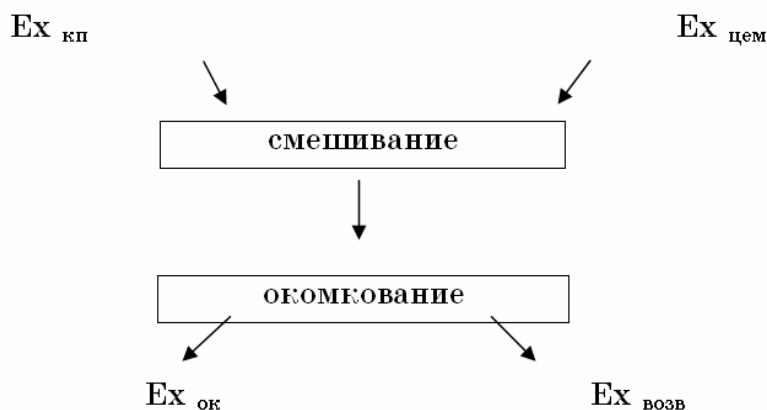


Рисунок 1 - Схема эксергетического баланса технологии производства безобжиговых окатышей

Здесь $E_{x \text{ кп}}$ – смесь, $E_{x \text{ це́м}}$ – цемент, $E_{x \text{ кокс}}$ – кокс, $E_{x \text{ ок}}$ – окатыши, $E_{x \text{ возв}}$ – возврат.

При наличии в эксергетической системе теплоты, независимо от источника её выделения, возникают и эксергетические потери ($\Delta E_{x \text{ пот}}$). В этом одно из важнейших преимуществ эксергетического баланса от энергетического.

Эксергетический баланс на 1 тонну безобжиговых окатышей запишем в виде:

$$E_{x \text{ кп хим.}} + E_{x \text{ кп ф}} + E_{x \text{ це́м.хим.}} + E_{x \text{ це́м.ф.}} = E_{x \text{ окат.хим.}} + E_{x \text{ окат.ф.}} + \Delta E_{x \text{ пот}}, \quad (2)$$

где $E_{x_{\text{кп.хим}}}$, $E_{x_{\text{цем.хим}}}$, $E_{x_{\text{окат.хим}}}$ – химическая эксергия колошниковой пыли; цемента; безобжиговых окатышей соответственно; $E_{x_{\text{кп.ф}}}$, $E_{x_{\text{окат.ф}}}$ – физическая эксергия колошниковой пыли и безобжиговых окатышей соответственно; $\Delta E_{x_{\text{пот.}}}$ – эксергетические потери.

Таблица 5

Расходы, химический состав сырьевых материалов и окатышей

| Материал | Расход, кг/т | Fe _{общ} | FeO | Fe ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | MgO | Al ₂ O ₃ | SO ₃ | C | K ₂ O+ Na ₂ O |
|-------------------|-----------------|-------------------|-------|--------------------------------|-------|------------------|------|--------------------------------|-----------------|-------|--|
| Колошниковая ПЫЛЬ | 900 | 43,79 | 14,3 | 46,67 | 11,00 | 14,5 | - | 3,10 | - | 11,8 | - |
| Портланд-цемент | 100 | 2,05 | - | 2,93 | 59,89 | 25,09 | 2,91 | 5,46 | 0,11 | - | 0,88 |
| Окатыши | 1000 | 39,62 | 12,87 | 42,29 | 15,89 | 15,56 | 0,29 | 0,55 | 0,11 | 10,62 | - |

Колошниковую пыль представляем как механическую смесь агломерата и кокса, выносимых и улавливаемых газоочистными сооружениями. Химическая эксергия колошниковой пыли рассчитывается как сумма химических эксергий агломерата и кокса.

Уравнение эксергии колошниковой пыли будет иметь вид:

$$E_{x_{\text{п}}} = E_{x_{\text{кп.х}}} + E_{x_{\text{аг.х}}} \quad \text{кДж}, \quad (3)$$

Здесь $E_{x_{\text{п}}}$ – эксергия колошниковой пыли; $E_{x_{\text{кп.х}}}$, $E_{x_{\text{аг.х}}}$ – химическая эксергия кокса и агломерата, находящихся в колошниковой пыли соответственно

$$E_{x_{\text{кп.х}}} = m_{\text{кп}} * e_{\text{пк}} \quad \text{кДж}, \quad (4)$$

где $m_{\text{кп}}$ – масса кокса, находящегося в колошниковой пыли, кг; $e_{\text{пк}} = 31588$ – удельная химическая эксергия кокса, кДж/кг.

Содержание углерода в сырьевых материалах (колошниковая пыль) составляет 11,80 %, из которых 86 % приходится на содержание в коксе.

$$m_{\text{кп}} = 11,80 / 0,86 = 13,72 \%$$

Тогда содержание кокса в 900 кг сухой колошниковой пыли составит:

$$m_{\text{кп}} = 900 * 13,72 \% = 123,48 \text{ кг.}$$

Химическую эксергию кокса определяем по формуле Я. Шаргута [1].

$$E_{\text{с.х.}} = mc [Q_{\text{нс}} + rn * \omega) * (1,0437 + 0,1896 * H/C + 0,0617 O/C + 0,0428 N/C) + (en_s - \omega d_s) * S] \quad \text{кДж}, \quad (5)$$

Здесь $Q_{\text{нс}}$ - низшая теплота сгорания кокса, *кДж/кг*; rn - энтальпия испарения воды, *кДж/кг*; H - отношение весовых долей соответствующих элементов; en_s - удельная химическая эксергия серы, *кДж/кг*; ωd_s - удельная теплота сгорания серы, *кДж/кг*; ω , S - весовые соотношения влаги и серы в топливе.

Теплота сгорания кокса $Q_{\text{нс}}$ определяется по формуле Д.И. Менделеева:

$$Q_{\text{нс}} = 339 * C^p + 1025 * H^p + 108,5(O^p - S^p) - 25 W^p \quad \text{кДж/кг} \quad (6)$$

где C^p , H^p , O^p , S^p - процентные содержания компонентов в топливе; W^p - содержание водяных паров.

$$Q_{\text{нс}} = 339 * 86 + 1025 * 0,49 + 108,5(0,7 - 1,9) - 25 * 2,08 = 29126 \text{ кДж/кг};$$

Значения en_s , ωd_s , rn - взяты из работы Г. Бэра [2].

$$E_{\text{с.х.}} = mc [(Q_{\text{нс}} + rn * \omega) * (1,0437 + 0,1896 * H/C + 0,0617 O/C + 0,0428 N/C) + (en_s - \omega d_s) * S] = 123,48 [(29126 + 0,08 * 2442) * (1,0437 + 0,1896 * 0,5 / 0,86 + 0,0617 * 0,7 / 0,86 + 0,0428 * 1,4 / 0,86) + 9710 * 0,19] = 4629285 \text{ кДж.}$$

Химическая эксергия агломерата определяется по формуле Я. Шаргута [1].

$$E_{\text{а}} = m_a * e_{\text{а}} = m_a (\sum q_i t_{bi} + \Delta e_{\text{х м}}) \quad \text{кДж} \quad (7)$$

Значения коэффициентов t_{bi} в формуле Я. Шаргута [2] для агломерата приведены в таблице 6:

Таблица 6

Значение коэффициентов t_{bi}

| Химический состав | FeO | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | $\Delta e_{\text{х м}}$ |
|-----------------------|------|--------------------------------|-----|-----|------------------|--------------------------------|-------------------------|
| t_{bi} , <i>кДж</i> | 1514 | 128 | 791 | 867 | 159 | 2841 | 33 |

Содержание агломерата в колошниковой пыли, входящей в состав безобжиговых окатышей рассчитывается как разница между

расходуемой колошниковой пылью и содержащимся в ней коксом
 $900-123,48 = 776,52 \text{ кг}$

$$E_{x_{\text{апп}}} = 776,52 * (0,1202*1514+0,6564*128+0,1004*791+0,0038*867-0,0928*159 + 0,0144*28,41-33) = 776,52*301,39 = 234035,36 \text{ кДж}$$

Химическая эксергия колошниковой пыли, как компонента безобжиговых окатышей:

$$E_{x_{\text{п}}} = E_{x_{\text{кп х}}} + E_{x_{\text{ап х}}} = 4629285+234035 = 4863320 \text{ кДж}$$

Физическая эксергия колошниковой пыли рассчитывается по формуле:

$$E_{x_{\text{кп ф}}} = m_{\text{кп}} (C_{\text{ркп}} / T_0^{T_{\text{пл}}} (T_{\text{п}} - T_0) - T_0 C_{\text{ркп}} / T_0^{T_{\text{пл}}} \ln(T_{\text{кп}} / T_0)), \text{ кДж} \quad (8)$$

где $m_{\text{кп}}$ – масса колошниковой пыли, кг;

$C_{\text{ркп}} / T_0^{T_{\text{пл}}}$ – удельная теплоемкость колошниковой пыли, кДж/кг.

$$E_{x_{\text{кп ф}}} = 900 [0,83(358-298) - 298*0,83* \ln 358/298] = 3987 \text{ кДж}$$

Эксергетический анализ при производстве цемента

Безобжиговые окатыши в качестве связующего вещества содержат 8-12% цемента. Принято, что на расчетную *тонну* окатышей приходится 100 кг цемента. Процесс производства цемента включает стадии дробления известняка, получения клинкера в процессе обжига при 1450 °С, измельчения клинкера.

Для получения клинкера необходимы большие затраты энергии в сравнении с процессами дробления. Клинкер, представляющий собой продукт обжига смеси известняка и глины, производят во вращающихся печах. Производительность вращающейся печи – 3700 т/сутки. В таблице 7 приведены затраты полезной эксергии на производство клинкера [7].

Кроме обжига клинкера необходимо учитывать затраты на дробление и измельчение известняка и клинкера. Эксергия дробления и измельчения принимаются для 80% материала крупностью менее 100 мкм. Затраты для дробления известняка и клинкера равны соответственно 42 кДж/кг и 64 кДж/кг. Выдержка безобжиговых окатышей на открытом складе для набора их прочности требует малой затраты энергии за счет использования солнечной энергии, поэтому ее не учитываем в общих затратах. Следовательно, общие затраты эксергии для производства цемента составляют 1882 кДж/кг.

Эксергетический баланс на 1 тонну безобжиговых железорудных окатышей составит $4863320 + 3987 + 188200 = 5055507$ кДж

Таблица 7

Затраты эксергии при производстве клинкера

| Направление | Компоненты | Эксергия, кДж/кг |
|-------------------------|----------------------|---------------------|
| Приход | Уголь | 3471 |
| | Газ | 1 |
| | Исходные материалы | 8 |
| | Пыль | 1 |
| Итого | | 3481 |
| Расход | Клинкер | 1311 |
| | Газ вращающейся печи | 287 |
| | Охлаждающий газ | 126 |
| | Пыль | 1 |
| | Итого | |
| Затраты эксергии | | 1776 |
| Эффективность, % | | 49 |

2. Эксергетический анализ выплавки чугуна с использованием пылеугольного топлива

Эксергетический баланс доменной печи базируется на материальном и тепловом балансах и позволяет определить меру термодинамического совершенства производства чугуна в домне и в сравнении с альтернативными способами получения чугуна, разрабатывать пути уменьшения энергоемкости металлопродукции и загрязнения окружающей среды [5, 9].

В общем виде эксергетический баланс доменной печи имеет вид [9]:

$$E_{x_{\text{прих}}} = E_{x_{\text{расх}}} + \Delta E_{x_{\text{пот}}}$$

где $E_{x_{\text{прих}}}$ – общее количество подведенной эксергии, МДж/т чугуна; $E_{x_{\text{расх}}}$ – общее количество расходуемой эксергии, МДж/т чугуна; $\Delta E_{x_{\text{пот}}}$ – потери эксергии, МДж/т чугуна.

Общее количество подведенной эксергии определяется:

$$E_{x_{\text{прих}}} = E_{x_{\text{дуть ф}}} + E_{x_{\text{ПГ ф}}} + E_{x_{\text{ПГ х}}} + E_{x_{\text{к х}}} + E_{x_{\text{жр х}}} + E_{x_{\text{ПУТ х}}}$$

где $E_{x_{\text{дуть ф}}}$ и $E_{x_{\text{ПГ ф}}}$ – физическая эксергия дутья и природного газа; $E_{x_{\text{ПГ х}}}$, $E_{x_{\text{к х}}}$, $E_{x_{\text{жр х}}}$, $E_{x_{\text{ПУТ х}}}$ – химические эксергии кокса, железорудных материалов, природного газа и пылеугольного топлива.

Общее количество расходуемой эксергии определяется:

$$E_{x_{расх}} = E_{x_{чуг ф}} + E_{x_{чуг х}} + E_{x_{шл ф}} + E_{x_{шл х}} + E_{x_{к.г. ф}} + E_{x_{к.г. х}}$$

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

Отношение расходуемой эксергии в доменной печи к общему количеству подведенной эксергии позволяет оценить термодинамическое совершенство доменного процесса [9].

Результаты расчета, выполненные эксергетическим методом [9], показателей работы ДП №1 ПАО «АМК», объемом 3000 м^3 , с ПУТ и природным газом в 2011 году приведены в таблице 8 [15]. Они использовались при разработке технологии применения ПУТ.

Таблица 8

Эксергетический анализ показателей работы домны
объемом 3000 м^3

| Показатели | фактические | | | | прогноз | |
|--|-------------|------|------|------|---------|------|
| | I | II | | | III | |
| Периоды | | | | | | |
| Производительность, т/час | 224 | 222 | 250 | 253 | 269 | 271 |
| Тепловая мощность домны, МВт | 620 | 631 | 688 | 706 | 706 | 753 |
| Тепловые потери, МВт | 19 | 20,3 | 19,7 | 26 | 26 | 26 |
| Температура дутья, °С | 1111 | 1119 | 1162 | 1101 | 1300 | 1150 |
| Содержание кислорода в дутье, % | 25,0 | 26,4 | 27,5 | 27,2 | 27,2 | 29,0 |
| Расходы энергетических ресурсов на 1 т чугуна: | | | | | | |
| сухого кокса, кг | 459 | 437 | 416 | 396 | 345 | 358 |
| природного газа, м^3 | 84 | 69 | 37 | 3 | 0 | 0 |
| пылеугольного топлива, кг | 0 | 50 | 105 | 154 | 200 | 200 |
| условного топлива, кг | 559 | 576 | 577 | 572 | 570 | 584 |
| дутья, м^3 | 1121 | 1093 | 1013 | 1040 | 970 | 966 |
| кислорода, м^3 | 55 | 72 | 81 | 80 | 77 | 98 |
| Выход шлака, кг/т чуг. | 394 | 428 | 434 | 396 | 396 | 396 |
| Степень использования CO , % | 45,4 | 44,4 | 44,1 | 44,7 | 44,7 | 44,7 |
| Степень прямого восста- | 32,0 | 35,2 | 41,8 | 46,4 | 50,1 | 47,4 |

| | | | | | | |
|---|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| новления железа <i>rd</i> по Павлову, % | | | | | | |
| Выход колошникового газа, кг у.т./т чугуна | 206 | 210 | 199 | 190 | 182 | 188 |
| Приход эксергии | | | | | | |
| Физические эксергии, МДж/т чугуна дутья | 1127 | 1110 | 1083 | 1032 | 1200 | 1013 |
| Химические эксергии, МДж/т чугуна: | | | | | | |
| кокса | 13132 | 12505 | 11900 | 11330 | 9867 | 10245 |
| железоруд. материала | 877 | 900 | 894 | 862 | 862 | 862 |
| природного газа | 3072 | 2524 | 1341 | 125 | 0 | 0 |
| пылеугольного топлива | 0 | 1659 | 3451 | 5063 | 6578 | 6577 |
| Расход эксергии | | | | | | |
| Эксергия чугуна*, МДж/т чугуна. | 787/ 7992 | 787/ 7992 | 787/ 7980 | 787/ 7988 | 787/ 7988 | 787/ 7988 |
| Эксергия шлака*, МДж/т чугуна. | 917/ 245 | 996/ 266 | 1010/ 269 | 921/ 246 | 921/ 246 | 921/ 246 |
| Эксергия колошникового газа*, МДж/т чугуна. | 1104/ 5598 | 1064/ 5689 | 954/ 5366 | 953/ 5070 | 893/ 4879 | 890/ 5021 |
| Потери эксергии, МДж/т чугуна | 1592 | 1906 | 2304 | 2448 | 3015 | 2860 |

* - в числителе – физическая эксергия, в знаменателе – химическая.

3. Полный энергетический баланс металлургического комбината

Проблемы и перспективы развития методов энергетического баланса в управлении энергоемкостью металлопродукции давно заслуживают исключительного внимания. Выделены технические, организационные, экономические, экологические аспекты проблемы и отмечены пути их решения [5, 6, 16 - 24]. В качестве примера приведены в таблице 9 энергоэкологические показатели отдельных производств металлургического комбината полного цикла, предложенные в работах [16-18]. Это позволяет оценить и потери энергии по: техническим причинам, связанным с необратимостью технологического процесса, управленческими и получили

определенную поддержку инженерно – технической общественности [25 - 26].

Макроанализ влияния энергетической и сырьевой базы, потребления вторичных энергоресурсов на коэффициент полезного использования (КПИ) энергии и эксергии показывает, что увеличение использования металлолома, углей и угольных концентратов, кокса, доменного и коксового газа, электроэнергии однозначно повышает КПИ, а использование полуфабрикатов уменьшают КПИ энергии и эксергии. Коэффициент полезного использования энергии растет с ростом объемов производства металлопродукции и количества переработанных отходов. Переработка продуктов коксохимического производства в углеводородное топливо понижает КПИ, а использование в качестве топлива в пределах ЗСМК повышает КПИ энергии и эксергии.

Таблица 9

Энергоэкологическая характеристика металлургических производств

| Производство (цех) | W, кВт·ч | M, кВт·ч | V, кВт·ч | Z, кВт·ч | η , % | $\acute{\epsilon}$, % | n %, | l , % |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------------------|--------|---------|
| углеобогатительная фабрика | 77 | 21523 | 17880 | 2933 | 82,7 | 69,2 | 1,208 | 0,16 |
| коксовые батареи | 1248 | 15095 | 14990 | 1077 | 91,2 | 84,7 | 1,10 | 0,07 |
| аглофабрика | 1280 | 362 | 292 | 333 | 17,8 | -2,5 | 5,62 | 1,14 |
| доменный цех | 7598 | 523 | 5637 | 1107 | 69,3 | 55,8 | 1,44 | 0,20 |
| мартеВновский цех | 1002 | 1434 | 1420 | 279 | 58,3 | 46,8 | 1,72 | 0,20 |
| конвертерный цех | | 2088 | 1943 | 343 | 80,5 | 0,66 | 1,24 | 0,18 |
| цех горячего проката | 1269 | 2414 | 2289 | 191 | 62,6 | 57,0 | 1,61 | 0,08 |
| ТЭЦ – ПВС | 4062 | 0 | 1120 | 204 | 27,6 | 22,6 | 3,63 | 0,18 |

Здесь W – суммарное потребление эксергии, M – суммарное потребление материальных ресурсов, V – эксергия готовой продукции, Z – эксергия суммарных выбросов в окружающую среду.

Наиболее характерными критериями взаимодействия производства с ресурсами окружающей среды являются показатели экологичности продукции l и ресурсоемкости процесса n и коэффициент экологичности объекта $\acute{\epsilon}$:

$l = \sum Z / V$ – характеризует величину вредных воздействий на окружающую среду в расчете на единицу полезной продукции V ;

$n = (\sum M + \sum W) / V$ – показывает расход энергии, воды, воздуха, земельных и иных природных ресурсов на единицу полезной продукции;

$\dot{\epsilon} = (V - \sum Z) / (\sum M + \sum W) = (1 - l) / n$ – характеризует отношение чистого полезного эффекта к израсходованным природным ресурсам.

Нестабильность поставок энергетических и материальных ресурсов, их качество, конъюнктурные соотношения, экологические ограничения и иные факторы определяют состав, параметры работы энерготехнологических агрегатов и энергоемкость металлопродукции. В нестабильных, конъюнктурно – кризисных условиях 1994 и 1995 гг. эффективность использования энергии, по сравнению с 1988, 1990 и 2003 годами, снизилась в среднем на 35%, а коэффициент полезного использования (КПИ) энергии – на 21%.

Заключение

Исследования показывают, что основной причиной высоких энергетических затрат в современной металлургии является не отсутствие научно - технических мероприятий, а трудности в управлении, отсутствие достоверной информации, нечеткое определение приоритетов и эффективно работающего механизма управления в критической социально-экономической обстановке. Он практически не отличаются от тех факторов, которые отмечены в ранних исследованиях многочисленных авторов и нуждаются в системных реализациях по принятию практических действий, а немногочисленному декларативному обсуждению [1]. За энерго демонстрирующий регион можно определить Днепродзержигский и Верхнеднэпровский регионы. Целесообразно использовать и опыт разработки и реализации плана ГОЭЛРО и опыт выхода из энергетического кризиса капиталистических стран в 70-80 годах. Целесообразно в высшей школе подготавливать системных аналитиков, которые могут анализировать и решать комплексные проблемы, лежащие на стыке различных областей знаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об информационном обеспечении энергетической безопасности Украины / Бородулин А.В, Вишневецкий Б.Н., Степанов В.С., Чумаков Л.Д. // Тр. межд. конференции. «Экология и теплотехника-1996», Днепропетровск, 1996, с.169 (дополнит. доклады и тезисы), с.3-8.

2. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия . Пер. с польского Д. . Стржижовского и Ю. Батурина. Ред В. Бродянского. Изд. перераб. и доп. М.: Энергия, 1968. -279 с.
3. Бэр Г. Техническая термодинамика. – М.: Мир, 1977. – 518 с.
4. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. Под редакцией Бродянского В.М. – М.: Энергоиздат, 1988. – 288 с.
5. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Эффективность использования энергии: Новосибирск. ВО «Наука». 1994. 257 с.
6. Бородулин А.В. / Эксергетический анализ производства чугуна и стали // Бородулин А.В., Горбунов А.Д., Романенко В.И., Суцев С.П. – Домна в энергетическом измерении. – Днепродзержинск: 2006 ДГТУ, 2-е изд, перераб. и доп., с.400 – 433. Имеется в РГБ, г. Москва.
7. Меркер Э.Э. Энергосбережение в промышленности и эксергетический анализ технологических процессов: учебное пособие/. - Старый Оскол: ТНТ, 2014. - 316 с.
8. Общие правила для оценки энергии. Метод полезной энергии, JIS Z9204 Japanese Industrial Standards Committee, (1980).
9. 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.
10. Доменная плавка с использованием высокоосновных самовосстанавливающихся окатышей на портландцементной связке / Д. А. Ковалев, Н. Д. Ванюкова, Б. П. Крикунов и др. // Труды конгресса с международным участием «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» – Екатеринбург: УрО РАН, 2014 – с. 175-179.
11. Снижение потребления углерода в промышленной доменной печи №2 (5775 м3) Oita Works при использовании углеродсодержащих композитных железорудных материалов. / Н. Yokogama, К. Higuchi, Т. Ito и др. // Iron and Steel Institute of Japan International – v.52(2012), №11. – P.p. 2000-2006.
12. Sang Hanson and Young Jae Kit. // Trial operation of carbon composite iron are pellet at foundry furnace. – METEC In Steel Con. 2011 – Dusseldorf 27 June – 1 July 2011. – p.p. 1-4.
13. Эффективность применения гранулированного углеродсодержащего железоблюса в доменной плавке. / Д.А. Ковалев, Б.П. Крикунов, А.А. Ванюков и др. // ОАО «Черметинформация» – Бюллетень «Черная металлургия» – 2012– №7 – С.49-54.
14. Tmohiro Akiyama, Reijiro Takahashi and Jun-ichiro Yagi. Exergy Evaluation on the Pellets Production and Direct Reduction Processes

- for the Fired and Nonfired Pellets. // ISIJ International, Vol.29 (1989). – Pp.447-454.
15. Чайка А.Л., Сохацкий А.А., Москалина А.А. Эксергетический анализ доменной плавки с использованием пылеугольного топлива / Изв. Вузов, Черная металлургия, 2014, №4, с.8-10.
16. Бородулин А.В. Научные основы рационального использования энергетических ресурсов в доменном производств – Диссертация доктора технических наук в форме научного доклада: 05.16.02./ Екатеринбург УПИ - УГУ, 1994. – 46 с.
17. Применение методов термодинамического анализа к разработке природоохранной концепции в горно-металлургическом регионе / А.В. Бородулин, И.Г. Костыльков, В.С. Степанов и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1992 – №1. – с. 74-76.
18. О научном обеспечении энергосберегающей и природоохранной деятельности в горно-металлургических регионах / Кустов Б.А., А.В. Бородулин, В.С. Степанов и др. // – Сталь. 1992, №12, с. 75-81.
19. Перспективы и проблемы использования бурых углей в металлургии / А.В. Бородулин, Б.Н. Вишневский, Л.Д. Чумаков и др. Уголь Украины. 1996, №9, с.34 – 38.
20. Проблемы и политика энергосбережения на Западно-Сибирском комбинате / Р.С. Айзатулов, А.В. Бородулин, В.С. Степанов и др. // – Сталь. 1997. № 8, с.90 – 97.
21. Stepanov V. S. Analisis of effeciency of industrial processes. Hendeliberg/ Springer – Veclag/ 1992, 220 p.
22. Степанов В.С., Степанова Т.Б. О методах расчета кумулятивных затрат энергии и эксергии (на примерах производства стали) // *Промышленная теплотехника. – 1990, №6. С. 45 -71.
23. Бородулин А.В. Энергетические и экологические аспекты функционирования черной металлургии в условиях экономического кризиса. Новые огнеупоры. 2010. №2, с. 56 – 61.
24. Полный энергетический баланс металлургического предприятия и его приложения / А.В. Бородулин, А.В. Воронцев, М.В. Темлянцев и др. с. 351 – 364. // Сб. научных трудов к 85-летию Уралгипроммеза. «Новые проекты и технологии в металлургии» Отв. ред. В.М. Шариков. Екатеринбург: 2006, – 636 с.
25. Грес Л.П. Высокоэффективный нагрев доменного дутья. Днепропетровск: «Пороги», 2008, 491 с.
26. Никифоров Г.В., Заславец Б.И. Энергосбережение на металлургических предприятиях - Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 283 с.