

Ф.Н.Москалина

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ КОМБИНИРОВАННОГО ДУТЬЯ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Показано, что комбинированное дутье в доменном производстве Украины даже в условиях резкого подорожания природного газа, кислорода и других энергоносителей будет применяться в практике как весомый способ улучшения показателей доменной плавки.

1. Концептуальные основы применения комбинированного дутья в доменной плавке.

В доменном производстве Украины комбинированное дутье применяется уже в течение 50 лет (с 1957 г.). Технологическая концепция его внедрения в экономических условиях бывшего СССР состояла в том, что данный режим рассматривается, как основной способ интенсификации процесса и экономии кокса; при этом особо не акцентировалось внимание на уровень цен кокса или компонентов комбинированного дутья – они были примерно одинаковыми на всей территории СССР. Степень обогащения дутья кислородом на конкретном отдельном предприятии определялась, в основном, существующими или планируемыми возможностями по балансам природного газа и технологического кислорода (далее «кислород»). При внедрении комбинированного дутья везде применялся единый технологический прием – обеспечивалось сохранение теоретической температуры горения путем соблюдения постоянного соотношения между дополнительными расходами природного газа и кислорода, равном $0,65-0,70 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [1].

В существующих рыночных условиях при значительном увеличении стоимостей природного газа, кислорода и кокса, применение добавок к дутью в максимально возможных количествах не соответствует принципу получения рациональной прибыльности функционирования конкретного предприятия, при которой обеспечивается достаточная рентабельность и устойчивость производства. Во многих случаях применение комбинированного дутья высоких параметров приводит к отрицательному экономическому эффекту.

Суть новой концепции заключается в том, что применение природного газа и кислорода ограничивается, исходя из экономических соображений с целью получения вполне определенного, заданного наперед, уровня рентабельности работы данного предприятия, т.е. эффективность комбинированного дутья оптимизируется для достижения целесообразной прибыльности предприятия. Такой уровень экономического эффекта может быть обозначен, как «рациональный эффект комбинированного дутья» (РЭКД). Этот показатель фактически характеризует ту минимально возможную величину эффективности, которая может обеспечивать плани-

руемую рентабельную работу данного предприятия. Исходя из показателя РЭКД, разрабатывается рациональный технологический режим доменных печей, прежде всего, устанавливаются экономически выгодные расходы природного газа и кислорода в доменных печах.

Следует подчеркнуть, что при наличии соответствующих технико-экономических и технологических условий и с учетом стратегического развития предприятия вполне возможно повышение уровня обогащения дутья кислорода сверх значения, определяемого РЭКД, при этом соответственно параметры комбинированного дутья возрастают.

Ниже приведены результаты аналитического исследования определения таких «рациональных» расходов кислорода и природного газа и «рационального эффекта», а также основные закономерности поведения функции экономической эффективности в зависимости от различных технико-экономических факторов.

Необходимо отметить, что, несмотря на наличие многочисленных конкретных данных по эффективности комбинированного дутья, опубликованных при обсуждении результатов различных опытных плавки [2–6], до настоящего времени отсутствуют аналитические разработки, раскрывающие общие закономерности поведения функции эффективности комбинированного дутья в зависимости от условий плавки. Отсутствует даже аналитическое описание такой функции. Данное исследование позволяет получить решения, теоретически объясняющие ряд практических аспектов по улучшению эффективности комбинированного дутья и совершенствованию технологии плавки – например, осветить такие вопросы, как возможно-приемлемый уровень прироста выплавки чугуна на единицу кислорода или целесообразные границы расхода по переделу чугуна, которые в определенных условиях могут проявляться, как лимитирующие факторы.

2. Аналитическое описание функции экономической эффективности комбинированного дутья

Удельная (на 1т чугуна) экономическая эффективность комбинированного дутья представляется в виде двух слагаемых:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_K \text{ грн./т,}$$

где \mathcal{E}_0 и \mathcal{E}_K – соответственно удельные эффективности при применении природного газа на обычном атмосферном дутье и при обогащении его кислородом. Значения \mathcal{E}_0 и \mathcal{E}_K определяются соотношениями:

$$\mathcal{E}_0 = 0,001 \text{ р } (\delta C_K - C_\Gamma) \text{ грн./т;} \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_K = 0,001 \cdot Q^K \left(\delta q C_K - q C_\Gamma - C_{KC} \right) + \frac{\ln Q^K}{1 + n Q^K} \text{ грн./т} \quad (2)$$

Общая величина удельной экономической эффективности выражается суммой $\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_K$, т.е.:

$$\mathcal{E} = 0,001p(\delta C_K - C_\Gamma) + 0,001Q^K(q\delta C_K - qC_\Gamma - C_{KC}) + \frac{f \ln Q^K}{1 + nQ^K} \text{ грн./т} \quad (3)$$

Здесь:

p – расход природного газа при атмосферном дутье, м³/т;

Q^K – расход технологического кислорода, м³/т;

δ – коэффициент замены кокса природным газом, кг/м³;

C_K, C_Γ, C_{KC} – соответственно стоимости кокса, природного газа, технологического кислорода, грн/т, грн/тыс. м³;

f – общезаводские расходы по переделу чугуна, грн/т;

ℓ – условно–постоянная доля расходов по переделу чугуна, доли ед.;

n – прирост производства чугуна на 1 м³ технологического кислорода, расходуемого на 1 т чугуна, доли ед. / м³/т;

q – дополнительный расход природного газа на 1 м³ технологического кислорода, м³/м³.

Уравнение (3) состоит из 3–х слагаемых – два первых отражают влияние факторов, определяющих экономию кокса (δ, p, q), а третье слагаемое характеризует эффект прироста производства чугуна (n, Q^K). Основная часть эффективности \mathcal{E} определяется экономией кокса (70–75%); влияние увеличения производства меньше – оно составляет 25–30% от значения \mathcal{E} . Из всех рассматриваемых факторов превалирующее влияние на эффективность оказывают цены C_K, C_{KC} и C_Γ и коэффициент δ . Следует учесть, что первые 2 слагаемые могут быть как положительными, так и отрицательными – в зависимости от величины коэффициента замены δ и соотношения цен C_K, C_Γ, C_{KC} . Третье слагаемое, отражающее влияние прироста производства являются всегда положительной величиной.

Прирост удельной экономической эффективности $\Delta\mathcal{E}$ на комбинированном дутье по сравнению с исходной величиной \mathcal{E}_O составляет:

$$\Delta\mathcal{E} = \left(\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_O} - 1 \right) \cdot 100, \% \quad (4)$$

Для сопоставления эффективности комбинированного дутья на нескольких доменных печах или различных условиях ведения плавки более целесообразно применять показатель, определяемый за календарный промежуток времени \mathcal{E}^B (год, месяц, сутки), поскольку в этом случае учитывается прирост производства за счет обогащения дутья кислородом.

Можно записать применительно к суточному периоду:

$$\mathcal{E}_O^B = \mathcal{E}_O \cdot \Pi_O \text{ грн./сутки}; \quad (5)$$

$$\mathcal{E}^B = \mathcal{E}\Pi = \mathcal{E}\Pi_O \left(1 + nQ^K \right) \text{ грн./сутки} \quad (6)$$

Здесь:

Π_O, Π – суточное производство соответственно при применении природного

газа на атмосферном и обогащенном кислороде дутье, т/сутки;

$\mathcal{E}_0, \mathcal{E}$ – удельная эффективность соответственно указанным вариантам Π_0 и Π , грн/т;

$\mathcal{E}_0^B, \mathcal{E}^B$ – суточная эффективность применения комбинированного дутья применительно к вариантам Π_0 и Π , грн/сутки.

Прирост эффективности $\Delta\mathcal{E}^B$ в единицу времени (сутки):

$$\Delta\mathcal{E}^B = \frac{\mathcal{E}^B - \mathcal{E}_0^B}{\mathcal{E}_0^B} \cdot 100\%,$$

$$\text{или: } \Delta\mathcal{E}^B = \left[\Delta\mathcal{E}(1 + nQ^R) - 1 \right] \cdot 100, \%$$

Таким образом, при учете эффективности комбинированного дутья в единицу времени ее приращение $\Delta\mathcal{E}^B$ по сравнению с удельным приращением $\Delta\mathcal{E}$ возрастает пропорционально расходу кислорода Q^K и значению коэффициента n .

Следует отметить, что в случае, если $\mathcal{E}^B \leq \mathcal{E}_0^B$ (т.е. когда

$\mathcal{E} \leq \frac{\mathcal{E}_0}{1 + nQ^K}$ грн./т), то экономически целесообразно перевести доменную

печь на обычное дутье с применением только природного газа. Такой вариант может встречаться при очень низких значениях коэффициента n .

Как следует из уравнения (3) удельная экономическая эффективность зависит от 10 переменных – $\delta, p, C_K, C_G, C_{KC}, q, Q^K, f, \ell$ и n , которые в отдельности воздействуют на нее неравнозначно. Поэтому, исходя из технологических и технико-экономических соображений, при анализе было рассмотрено влияние только 6 факторов, как наиболее влиятельных (для анализа было использовано уравнение (3) удельной экономической эффективности):

1) расхода технологического кислорода (Q^K); 2) стоимостей кокса, природного газа и кислорода (C_K, C_G и C_{KC}); 3) коэффициента замены кокса природным газом (δ); 4) прироста производства чугуна на единицу поданного в печь технологического кислорода (n).

При анализе влияния изучаемого фактора на величину эффективности функция \mathcal{E} принимается одномерной и зависящей только от рассматриваемого переменного, все другие факторы принимались в качестве констант. Для более общих случаев (одновременное изменение нескольких переменных) функция \mathcal{E} рассматривалась как многомерная зависимость.

3. Влияние различных факторов на эффективность комбинированного дутья

3.1. Увеличение расхода технологического кислорода

Известно, что общий вид графической зависимости описывается знаком производной отрицательное или положительное ее значение означает соответственно монотонное уменьшение или монотонное возрастание функции с увеличением аргумента; при нулевом значении существует экстремальная точка. Из уравнения (3) находим:

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K} = 0,001(\delta q C_K - q C_\Gamma - C_{KC}) + \frac{f \ln}{(1 + n Q^K)^2} \quad (8)$$

Анализ показывает, что в зависимости от значений остальных показателей производная $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K}$ может принимать различные значения: $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K} < 0$,

$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K} > 0$ и $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K} = 0$. Схемы соответствующих видов графиков $\mathcal{E} = f(Q^K)$ показаны на рис. 1.

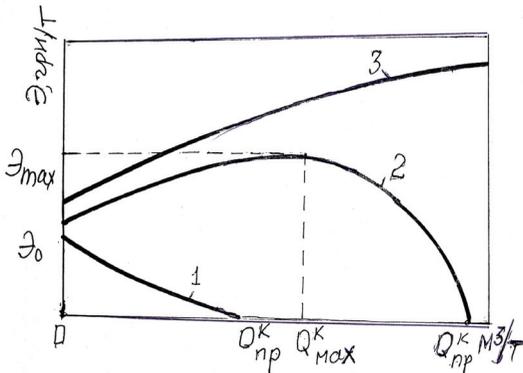


Рис.1. Схема изменения экономической эффективности от расхода технологического кислорода при различных значениях про-

изводной ($\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K} < 0$ — ли-

ния 1, $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K} = 0$ — линия 2 и

$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K} > 0$ — линия 3).

Необходимо отметить, что в случае $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K} = 0$ график имеет вид выпук-

лой кривой с образованием максимума — при определенной величине Q^K_{max} эффективность достигает максимального значения \mathcal{E}_{max} . Для вариантов

$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K} < 0$ и $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^K} = 0$ существуют предельные расходы технологического

кислорода $Q_{\text{пр}}^{\text{K}}$, при которых значение эффективности равно нулю (рис.1).

Наблюдается следующая зависимость – с увеличением коэффициента замены δ значение $Q_{\text{пр}}^{\text{K}}$ возрастает.

Расход кислорода $Q_{\text{max}}^{\text{K}}$, при котором обеспечивается максимальная эффективность \mathcal{E}_{max} (вариант $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^{\text{K}}} = 0$), описывается соотношением:

$$Q_{\text{max}}^{\text{K}} = \frac{\sqrt{f\ell n} - \sqrt{0,001(qC_{\Gamma} + C_{\text{KC}} - \delta qC_{\text{K}})}}{n\sqrt{0,001(qC_{\Gamma} + C_{\text{KC}} - \delta qC_{\text{K}})}} \text{ м}^3/\text{т} \quad (10)$$

Величина $Q_{\text{max}}^{\text{K}}$, как и $Q_{\text{пр}}^{\text{K}}$, увеличивается при возрастании коэффициента δ . Если требуется определить максимальный расход кислорода Q^{K} , при котором обеспечивается наперед заданная эффективность \mathcal{E}_q (при определенных значениях остальных переменных), то в этом случае применяется соотношение:

$$Q_q^{\text{K}} = \frac{[\mathcal{E}_q - 0,001p(\delta C_{\text{K}} - C_{\Gamma})](1 + nQ^{\text{K}})}{0,001(1 + nQ^{\text{K}})(q\delta C_{\text{K}} - qC_{\Gamma} - C_{\text{KC}}) + f\ell n} \text{ м}^3/\text{т} \quad (11)$$

Вычисление координаты точки $Q_{\text{пр}}^{\text{K}}$, соответствующей эффективности комбинированного дутья равной нулю, производится путем решения квадратного уравнения:

$$a(Q_{\text{пр}}^{\text{K}})^2 + \varepsilon Q_{\text{пр}}^{\text{K}} + C = 0, \quad (12)$$

коэффициенты которого равны:

$$a = q\delta C_{\text{K}} - qC_{\Gamma} - C_{\text{KC}};$$

$$\varepsilon = \frac{0,001a + f\ell n + \mathcal{E}_O n}{0,001 n \cdot a};$$

$$C = \frac{\mathcal{E}_O}{0,001 \cdot n \cdot a}.$$

Величиной $Q_{\text{пр}}^{\text{K}}$ является положительное значение корня уравнения (12).

Исходя из уравнений (8), (9) и (12) для каждого конкретного случая может быть построен график функции $\mathcal{E} = fQ^{\text{K}}$.

3.2. Стоимость кокса, природного газа и технологического кислорода

Из уравнения (3) находим частные производные $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial C_K}$, $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial C_\Gamma}$ и

$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial C_{KC}}$, которые характеризуют влияние этих показателей на эффективность

комбинированного дутья. Получены следующие соотношения:

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial C_K} = 0,001 \delta (p + qQ^K); \quad (13)$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial C_\Gamma} = -0,001 \delta (p + qQ^K); \quad (14)$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial C_{KC}} = -0,001 Q^K \quad (15)$$

Уравнения (13), (14) и (15) позволяют заключить – если увеличение цены кокса C_K приводит к повышению эффективности, то аналогичные изменения цен на газ и кислород вызывают снижение показателя \mathcal{E} для комбинированного дутья, т.е. цены природного газа и кислорода действуют противоположно цене кокса.

Обозначим изменения цен следующим образом:

$$\Delta C_K = C_K - C_K^O \text{ грн./т кокса;}$$

$$\Delta C_\Gamma = C_\Gamma - C_\Gamma^O \text{ грн./тыс.м}^3 \text{ газа;}$$

$$\Delta C_{KC} = C_{KC} - C_{KC}^O \text{ грн./тыс.м}^3 \text{ кислорода,}$$

где: C_K^O , C_Γ^O , C_{KC}^O – базовые (исходные) цены на кокс, природный газ и технологический кислород; C_K , C_Γ , C_{KC} – соответственно новые их текущие цены; ΔC_K , ΔC_Γ , ΔC_{KC} – соответствующие приращения новых цен. Тогда изменения эффективности от указанных приращений цен, а именно $\Delta \mathcal{E}_K$, $\Delta \mathcal{E}_\Gamma$ и $\Delta \mathcal{E}_{KC}$ – выражаются уравнениями:

$$\Delta \mathcal{E}_K = 0,001 \Delta C_K \delta (p + qQ^K) \text{ грн./т; } (16)$$

$$\Delta \mathcal{E}_\Gamma = -0,001 \Delta C_\Gamma (p + qQ^K) \text{ грн./т; } (17)$$

$$\Delta \mathcal{E}_{KC} = -0,001 \Delta C_{KC} Q^K \text{ грн./т. } (18)$$

Из уравнений (16), (17) и (18) следует, если стоимости указанных реагентов увеличиваются на одну и ту же величину (допустим на A), то уменьшение эффективности за счет повышения стоимости природного

газа или кислорода превышает прирост Δ за счет увеличения стоимости кокса, поскольку соотношения $\frac{\Delta \Delta_{\Gamma}}{\Delta \Delta_{\text{К}}}$ и $\frac{\Delta \Delta_{\text{КС}}}{\Delta \Delta_{\text{К}}}$ больше единицы:

$$\frac{\Delta \Delta_{\Gamma}}{\Delta \Delta_{\text{К}}} = -\frac{1}{\delta}; \quad \frac{\Delta \Delta_{\text{КС}}}{\Delta \Delta_{\text{К}}} = -\frac{Q^{\text{К}}}{\delta(\rho + qQ^{\text{К}})}$$

Например, при $\delta = 0,8 \text{ кг/м}^3$, $Q^{\text{К}} = 100 \text{ м}^3/\text{т}$, $\rho = 40 \text{ м}^3/\text{т}$ и $q = 0,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ значения указанных соотношений равны соответственно 1,25 ед., 1,39 ед. Таким образом, чтобы скомпенсировать увеличение цены природного газа или кислорода цена кокса должна быть повышена в большей степени по сравнению с удорожанием комбинированного дутья, в нашем примере, соответственно на 25% или на 39%.

При одновременном изменении рассматриваемых цен общее отклонение эффективности Δ от базовой Δ_0 оценивается суммой:

$$\Delta \Delta = \Delta \Delta_{\text{К}} + \Delta \Delta_{\Gamma} + \Delta \Delta_{\text{КС}} \text{ грн./т или:}$$

$$\Delta \Delta = 0,001 \left(\rho + qQ^{\text{К}} \right) \left[\Delta C_{\text{К}} \delta - \Delta C_{\Gamma} - \frac{\Delta C_{\text{КС}} Q^{\text{К}}}{(\rho + qQ^{\text{К}})} \right] \text{ грн./т (19)}$$

Величина $\Delta \Delta$ равна нулю, если второй множитель равен нулю, т.е.:

$$\Delta C_{\text{К}} \delta - \Delta C_{\Gamma} - \frac{\Delta C_{\text{КС}} \cdot Q^{\text{К}}}{(\rho + qQ^{\text{К}})} = 0.$$

В этом случае базовая эффективность комбинированного дутья сохраняется.

В ближайшей перспективе цены на природный газ, кислород и другие энергоносители для доменного производства Украины, несомненно, будут только повышаться и поэтому важно определять предельные значения цен газа и кислорода $C_{\Gamma}^{\text{пр.}}$ и $C_{\text{КС}}^{\text{пр.}}$, при которых эффективность Δ не будет отрицательной (т.е. равной нулю). Получены следующие формулы:

$$C_{\Gamma}^{\text{пр.}} = \delta C_{\text{К}}^{\text{О}} + \frac{f \ln Q^{\text{К}}}{0,001(\rho + qQ^{\text{К}})(1 + nQ^{\text{К}})} - \frac{Q^{\text{К}} C_{\text{КС}}}{\rho + qQ^{\text{К}}} \text{ грн./тыс.м}^3 \text{ (20)}$$

$$C_{\text{КС}}^{\text{пр.}} = \frac{C_{\text{К}}^{\text{О}} \delta}{Q^{\text{К}}} (\rho + qQ^{\text{К}}) + \frac{f \ln}{0,001(1 + nQ^{\text{К}})} - \frac{C_{\Gamma} (\rho + qQ^{\text{К}})}{Q^{\text{К}}} \text{ грн./тыс.м}^3 \text{ (21)}$$

Если задаются цены на природный газ или кислород заранее (обозначаются $C_{\Gamma}^{\text{г}}$ и $C_{\text{КС}}^{\text{г}}$, изменяющихся соответственно в пределах

$C_{\Gamma}^O < C_{\Gamma}^g < C_{\Gamma}^{np.}$ или $C_{KC}^O < C_{KC}^g < C_{KC}^{np.}$ и при этом устанавливается определенное значение ожидаемого экономического эффекта \mathcal{E}_g , то может быть предварительно рассчитана требуемая цена кокса $C_K^{TP.}$, при которой может быть обеспечено заданное условие:

$$C_K^{np.} = \frac{\mathcal{E}_g}{0,001\delta \cdot (\rho + qQ^K)} + \frac{C_{\Gamma}^g}{\delta} + \frac{Q^K \cdot C_{KC}^g}{\delta(\rho + qQ^K)} - \frac{Q^K fln}{0,001\delta(1+nQ^K)(\rho + qQ^K)} \text{ грн./т кокса} \quad (22)$$

При условии, что $\mathcal{E}_g = 0$ требуемая цена кокса $C_K^{TP.min}$ будет минимальной по сравнению с исходной C_K и определяется по уравнению:

$$C_K^{TP.min} = \frac{C_{\Gamma}^g}{\delta} + \frac{Q^K C_{KC}^g}{\delta(\rho + qQ^K)} - \frac{Q^K fln}{0,001 \cdot \delta(1+nQ^K)(\rho + qQ^K)} \text{ грн./т кокса} \quad (23)$$

Рассмотрим более общий случай – одновременное изменение двух переменных – цен на природный газ C_{Γ} и кислород C_{KC} , что является более распространенным явлением в практике. Здесь необходимо отметить, что первичным изменением может быть принята заданная цена газа C_{Γ}^g , тогда как цена C_{KC} – вторичная и зависящая от C_{Γ}^g . Решение этой задачи находится следующим образом – вначале задаются цены C_{Γ}^g , C_{KC}^g и ожидаемая эффективность \mathcal{E}_g , а уже потом определяется текущая цена кислорода C_{KC} при принятых выше условиях.

Такой случай определения C_{KC}^T описывается соотношением:

$$C_{KC}^T = q\delta C_{KC}^g - qC_{\Gamma}^g - \frac{\mathcal{E}_g}{0,001Q^K} + \frac{\rho(\delta C_{KC}^g - C_{\Gamma}^g)}{Q^K} + \frac{fln}{0,001(1+nQ^K)} \text{ грн./тыс.м}^3 \quad (24)$$

Если допустить, что $\mathcal{E}_g = 0$, то получим предельное значение $C_{KC}^{TP.}$, которое будет больше C_{KC}^T и превышение его приводит уже к отрицательной эффективности. Величина $C_{KC}^{TP.}$ определяется уравнением:

$$C_{KC}^{TP.} = q\delta C_{KC}^g - qC_{\Gamma}^g + \frac{\rho(\delta C_{KC}^g - C_{\Gamma}^g)}{Q^K} + \frac{fln}{0,001 \cdot (1+nQ^K)} \text{ грн./тыс.м}^3 \quad (25)$$

Данные соотношения (24) и (25) показывают, что $C_{KC}^{TP.} \geq C_{KC}^T$, а с повышением расхода кислорода Q^K величины C_K^T и $C_K^{TP.}$ – будут уменьшаться.

3.3. Коэффициент замены кокса природным газом

Для вариантов $\frac{\partial \Xi}{\partial Q^K} < 0$ и $\frac{\partial \Xi}{\partial Q^K} = 0$, при которых функция $\Xi = f(Q^K)$

может принимать нулевые значения, существует минимальное значение коэффициента замены кокса δ_{\min} , обеспечивающего условие $\Xi = 0$, которое рассчитывается по уравнениям:

- при применении природного газа на обычном атмосферном дутье:

$$\delta_{\min} = C_{\Gamma} / C_K; \quad (26)$$

- при обогащении дутья кислородом совместно с газом:

$$\delta_{\min} = C_{\Gamma} / C_K + \frac{C_{KC} Q^K}{C_K (\rho + q Q^K)} - \frac{f \ln}{0,001 C_K (\rho + q Q^K) (1 + n Q^K)} \text{ кг/м}^3 \quad (27)$$

Если расход кислорода Q^K является известной величиной, то возможно определить коэффициент δ_{\max} , при котором достигается максимальный экономический эффект:

$$\delta_{\max} = \frac{C_{\Gamma}}{C_K} + \frac{C_{KC}}{q C_K} - \frac{f \ln}{0,001 \cdot q \cdot C_K (1 + n Q^K)} \text{ кг/м}^3 \quad (28)$$

Уравнения (26) и (27) показывают, что величины δ_{\min} и $\delta_{\text{пр}}$ зависят, главным образом, от уровня цен, при этом обогащение дутья кислородом связано с увеличением δ_{\min} пропорционально расходу кислорода Q^K .

Для получения положительного значения эффективности Ξ в конкретных условиях доменной плавки фактический коэффициент замены $\delta_{\text{ф}}$ должен быть больше расчетного значения $\delta_{\min} \cdot (\delta_{\text{ф}} > \delta_{\min})$.

3.4. Прирост производства чугуна на единицу технологического кислорода и стоимость его передела

Кроме экономии кокса, как следует из уравнения (3) эффективность комбинированного дутья возрастает в связи с повышением производительности печи, т.е. от дополнительного прироста чугуна за счет обогащения дутья кислородом (третье слагаемое). Представляет практический интерес рассмотреть влияние факторов прироста производства чугуна и стоимости его передела (показателей n и $f \ell$), но при этом предполагается, что расход природного газа будет применяться в минимальных количествах и в пределе может быть полностью исключен.

При отсутствии природного газа уравнение эффективности обогащенного кислородом дутья имеет вид:

$$\Xi = \frac{f \ln Q^K}{1 + n Q^K} - 0,001 \cdot \ell_{KC} Q^K \text{ грн/т} \quad (29)$$

Для этого варианта эффективность зависит от расхода кислорода Q^K , коэффициента n , цены кислорода C_{KC} и стоимости передела $f\ell$. При $Q^K = const$ и $\Xi = 0$ получаем уравнения, из которых могут быть определены предельные значения величин $n_{пр}$, $C_{KC}^{пр}$ и $(f\ell)_{пр}$; причем эти показатели обеспечат неубыточное производство чугуна (по каждому показателю в отдельности) без применения природного газа.

Соотношения имеют вид:

$$n_{пр} = \frac{0,001 \cdot C_{KC}}{f\ell - 0,001 \cdot C_{KC} \cdot Q^K} \text{ доли ед./ (м}^3/\text{т)} \quad (30)$$

$$C_{KC}^{пр} = \frac{f\ell n}{0,001 \cdot (1 + nQ^K)} \text{ грн./тыс.м}^3 \quad (31)$$

$$(f\ell)_{пр} = \frac{0,001 \cdot \ell_{KC} (1 + nQ^K)}{n} \text{ грн./т чугуна} \quad (32)$$

В случае, когда указанные показатели являются постоянными величинами, то минимальный расход кислорода $Q_{пр}$, обеспечивающий равенство $\Xi = 0$, определяется уравнением:

$$Q_{пр}^K = \frac{f\ell n - 0,001 \cdot C_{KC}}{0,001 \cdot n \cdot C_{KC}}, \text{ м}^3/\text{т} \quad (33)$$

Из уравнения (33) вытекает, что положительное значение $Q_{пр}^K$ может быть в случае неравенства $f\ell n > 0,001 C_{KC}$, что при существующих производственных условиях невыполнимо. Требуемое неравенство может быть получено или в случае резкого увеличения стоимости передела или снижения стоимости кислорода (в обоих случаях – в 4–5 раз), что практически нереально. Примерно такие же соотношения имеют место и для показателей $n_{пр}$ и $C_{KC}^{пр}$ к фактически возможным их величинам. Таким образом, приведенные сведения показывают, что широкое применение обогащенного кислородом дутья без применения природного газа или каких-либо компенсирующих коксосберегающих добавок не имеет перспектив. Такая технология может быть востребована в случаях острой потребности повышения производства чугуна, несмотря на рост его себестоимости. Однако, содержание кислорода в дутье может ограничиваться 23–24%, так как превышение этого уровня вызывает расстройства теплового состояния горна.

3.5. Коэффициент компенсации кислорода природным газом

При высоких ценах энергоносителей экономически приемлемыми являются режимы комбинированного дутья при незначительном повышении

в нем содержания кислорода – до 23–25% (30–50 м³/т) и при этом общий коэффициент компенсации ниже рекомендованной величины (0,35–0,40 м³ против 0,50–0,60 м³/м³ по инструкции). Такой режим плавки может быть применен при условии безубыточного производства, т.е. чтобы эффективность не была отрицательной ($\Xi = 0$). Такой коэффициент компенсации определяется как «минимальный» и его аналитическая формула имеет вид:

$$q_{\min} = \frac{C_{\text{КК}}}{\delta C_{\text{К}} - C_{\text{Г}}} - \frac{f \ln}{0,001(\delta C_{\text{К}} - C_{\text{Г}})(1 + nQ^{\text{К}})} \quad (34)$$

При необходимости получения заданной прибыли ($\Xi_g > 0$) расчетный коэффициент компенсации q_p будет большей величины по сравнению с q_{\min} ($q_p > q_{\min}$), который рассчитывается по формуле:

$$q_{\phi} = \frac{C_{\text{КК}}}{\delta C_{\text{К}} - C_{\text{Г}}} + \frac{\Xi_g}{0,001 \cdot Q^{\text{К}}(\delta C_{\text{К}} - C_{\text{Г}})} - \frac{f \ln}{0,001 \cdot (1 + nQ^{\text{К}})(\delta C_{\text{К}} - C_{\text{Г}})} \quad (35)$$

Таким образом, используя приведенные в разделе 2 соотношения, можно определить параметры комбинированного дутья применительно к различным практическим технологическим задачам, возникающих в конкретных условиях доменной плавки.

4. Фактические значения коэффициентов замены кокса природным газом и приростов производства чугуна

Для проведения текущих и прогнозных расчетов необходимо оперировать реальными значениями коэффициентов δ и n с учетом параметров комбинированного дутья. Такие корреляционные связи были получены путем статистической обработки технико-экономических показателей опытных плавов, проведенных ИЧМ на различных предприятиях при повышении обогащения дутья кислородом – от 24,0–25,0 до 40,0% (от 50 до 250 м³/т) [2–6].

На рис. 3 показаны графические зависимости между удельным расходом технологического кислорода (м³/т чугуна) и содержанием кислорода в дутье по результатам указанных выше опытных плавов данные показывают – по мере повышения концентрации O₂ в дутье расход Q^К, необходимый для увеличения кислорода на 1,0%, сокращается примерно вдвое – от 20 до 10 м³/т чугуна.

Коэффициент замены кокса природным газом в зависимости от содержания O₂ в дутье выражается линейным уравнением (рис. 4):

$$\delta = 1,297 - 0,00173 Q^{\text{К}} \text{ кг/м}^3 \quad (36)$$

Из уравнения (35) следует, что коэффициент δ в среднем снижается на 0,02 кг/м³ (на 2,5%) на каждые поданные в печь дополнительные 10 м³/т технологического кислорода совместно с природным газом, его средняя

величина составляет $1,1 \text{ кг/м}^3$ (при среднем расходе около $Q^K = 100 \text{ м}^3/\text{т}$). Однако, справедливо мнение – в обычных промышленных нестабильных условиях величина δ заметно ниже по сравнению с данными, полученными при отработанных опытных режимах примерно на $0,2\text{--}0,3 \text{ кг/м}^3$ по всему промежутку рассматриваемых расходов Q^K , т.е. при среднем расходе кислорода в количестве $100 \text{ м}^3/\text{т}$ величина δ составляет около $0,85 \text{ кг/м}^3$. Такая величина δ может быть принята в качестве постоянной при средних параметрах комбинированного дутья применительно к выполняемым технологическим расчетам.

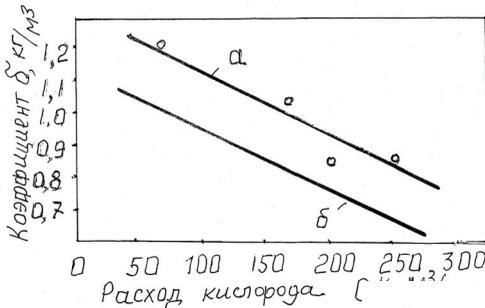
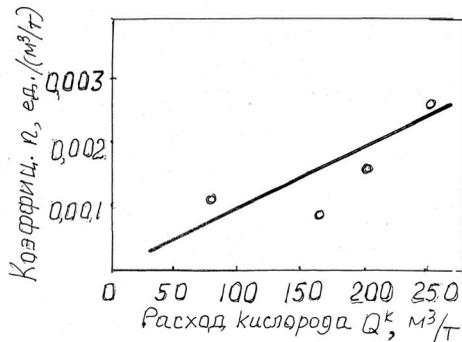


Рис. 3. Зависимость коэффициента замены кокса от расхода технологического кислорода (а – по данным опытных плавок [2-6], б – при обычных производственных условиях).

Рис. 4. Зависимость прироста производства чугуна на единицу расхода технологического кислорода ($1 \text{ м}^3/\text{т}$) от удельного расхода кислорода (по данным опытных плавок [2-6]).



Прирост производства чугуна (показатель n) всегда является положительным фактором, увеличивающим эффективность комбинированного дутья. По данным указанных выше плавок корреляционное уравнение $n=f(Q^K)$ описывается уравнением (рис. 5):

$$n = 0,000011 Q^K + 0,00005 \text{ ед./м}^3/\text{т} \quad (37)$$

Можно заключить, что с повышением расхода кислорода Q^K коэффициент n только возрастает – в среднем на каждые добавочные $\Delta Q^K = 10 \text{ м}^3/\text{т}$ на $0,00011 \text{ ед./м}^3/\text{т}$ и в диапазоне изменения расхода кислорода от 50 до $250 \text{ м}^3/\text{т}$ показатель n существенно увеличивается – от $0,0006$ до $0,0028 \text{ ед./м}^3/\text{т}$, т.е. в $4,7$ раза. Объяснение этому факту заключается в повышении

доли технологического кислорода в общем объеме вдуваемого комбинированного дутья, поступающего в печь по мере обогащения дутья кислородом.

В связи с противоположными изменениями коэффициентов δ и n в рассматриваемом диапазоне расхода кислорода для выполнения научно-практических или прогнозных расчетов без больших погрешностей значения их могут быть приняты постоянными и равными примерно их средним и равными соответственно $0,75-0,80 \text{ кг/м}^3$ и $0,001 \text{ ед. / (м}^3/\text{т)}$.

Выводы

1. Получено аналитическое соотношение для определения экономической эффективности комбинированного дутья, в котором отражены как основные технологические факторы, такие, как расходы технологического кислорода и природного газа коэффициент замены кокса природным газом, так и стоимостные показатели цепи кокса, природного газа и технологического кислорода. Учтены также влияние прироста производства чугуна за счет обогащения дутья кислородом и стоимость его передела.

2. Проведено аналитическое изучение функции эффективности комбинированного дутья и определены основные тенденции ее изменения в существующих и ожидаемых условиях доменной плавки. Установлено, что оценку экономической эффективности комбинированно целесообразно проводить за календарный промежуток времени, что более объективно отражает его хозяйственную ценность по сравнению с удельной эффективностью (на 1 тонну чугуна).

3. При увеличении расхода технологического кислорода график изменения экономической эффективности может быть 3-х видов – монотонно возрастающим, монотонно уменьшающимся и быть в виде выпуклой кривой с достижением максимума при определенном значении расхода кислорода. Указанные виды изменения графика эффективности определяются

знаком частной производной $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Q^k}$ – она соответственно указанным

зависимостям является положительной, отрицательной или имеет нулевое значение. Основными факторами, определяющими вид функциональной зависимости, являются соотношение цен кокса, газа и кислорода.

Применение только обогащенного кислородом дутья без вдувания углеродсодержащих добавок практически является всегда убыточным и такая технология может быть внедрена, как временное мероприятие.

4. Увеличение цены кокса действует положительно на экономическую эффективность, тогда как такое же повышение стоимостей природного газа или технологического кислорода вызывает ее снижение, при этом в большей степени по сравнению с удорожанием кокса – примерно на 25–40%, т.е. для сохранения эффективности цену кокса следует существенно увеличивать по сравнению с приростом цен природного газа или техноло-

гического кислорода. Получены соотношения по определению предельных цен природного газа или кислорода, зависящие, главным образом, от значений цены кокса и коэффициента замены.

5. Минимальная величина коэффициента замены, при котором эффективность становится равной нулю для условия применения газа на обычном дутье определяется соотношением цен «природный газ / кокс». Применение обогащения дутья кислородом вызывает увеличение минимального коэффициента замены.

6. Фактические величины коэффициентов замены кокса природным газом и прироста производства чугуна на единицу поданного в печь технологического кислорода и природного газа изменяются неоднозначно – если в первом случае в пределах увеличения расхода кислорода от 50 до 250 м³/т величина δ уменьшается от 1,05 до 0,70 кг/м³ (примерно на 35%), то во втором случае коэффициент прироста производства возрастает – от 0,0006 до 0,0028 ед. / м³/т, т.е. примерно в 5 раз. Поскольку рассматриваемые параметры меняются с увеличением концентрации кислорода в дутье с противоположными знаками, то для конкретных расчетов допустимо принимать их как постоянные величины и равными соответственно их средним значениям 0,80 кг/м³ и 0,001 ед. / м³/т.

7. Можно с достаточной вероятностью утверждать, что комбинированное дутье в доменном производстве Украины даже в условиях резкого подорожания природного газа, кислорода и других энергоносителей будет применяться в практике как весомый способ улучшения показателей доменной плавки. Основание такого предположения заключается в том, что при вдувании природного газа наряду с развитием процессов, обеспечивающих прямую непосредственную замену углерода кокса углеродом газа, а также развитие в процессе восстановления FeO водородом существующее технологическое преимущество комбинированного дутья проявляется в повышении устойчивости хода печи и ее теплового состояния за счет значительного увеличения содержания водорода в газовой фазе доменной печи и активного веса столба шихты, что особенно актуально при существующих резких колебаниях качества железорудных материалов и кокса.

1. *Типовая* технологическая инструкция по доменному производству. – Днепропетровск. – 1977 г.
2. *Работа* доменной печи завода им. Петровского с применением природного газа. / И.И.Коробов, Н.И.Красавцев, З.И.Некрасов и др. // Опыт применения природного газа в доменном производстве. – М.; Metallurgizdat, 1959. – С.7–26.
3. *Работа* доменных печей завода им. Дзержинского с применением природного газа. / Н.И.Красавцев, З.И.Некрасов, Г.Г.Орешкин и др. // Опыт применения природного газа в доменном производстве. – М.; Metallurgizdat, 1959. – С.27–51.

4. Опытная плавка в доменной печи объемом 2000 м³ при обогащении дутья кислородом до 30,0% / З.И.Некрасов, П.Г.Нетребко, Ф.Н.Москалина и др. // Сталь. – 1971. – № 10. – С.887–894.
5. Опытные плавки в доменной печи объемом 2000 м³ на дутье с концентрацией кислорода до 35% /З.И.Некрасов, С.В.Колпаков, В.Ф.Андреев и др. //Сталь. – 1973. – № 2. – С.97–104.
6. Работа доменной печи объемом 2000 м³ НЛМК при концентрации кислорода в дутье 40% / Ф.Н.Москалина, А.П.Пухов, В.В.Капорулин и др // Сталь. – 1985. – № 8. – С.17–20.

Сведения об авторе:

Москалина Федор Николаевич, *докт.техн.наук, бывший сотрудник Института черной металлургии НАН Украины*