

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ДУТЬЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ ПРИ ВДУВАНИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТОПЛИВА. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВДУВАНИЯ В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Аннотация

Рассмотрены проблемы энергоэффективности в доменной плавке при использовании природного газа. Представлены результаты анализа работы доменных печей по влиянию расхода природного газа на производительность, расход кокса и удельные энергетические затраты.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергетические затраты, доменная печь, производительность, природный газ, технический кислород.

Abstract

The study describes the problems of energy efficiency in ironmaking when using natural gas. Presents the results of the analysis of the blast furnace to natural gas consumption influence on performance, coke consumption and specific energy consumption.

Key words: energy efficiency, energy costs, blast furnace, capacity, natural gas, technical oxygen.

Совершенствование технологии доменной плавки, как в настоящее время, так и в дальнейшем, направлено на увеличение интенсивности работы печи и снижение удельного расхода энергоресурсов на выплавку чугуна. Все эти вопросы непосредственно связаны с заменой дефицитного кокса другими видами топлива. Актуальность проблемы усугубляется повышением дефицита топлива из-за сокращения его добычи. Определенные коррективы на использование дополнительного топлива оказывает рост цены на углеводородные топлива. Так по данным работы [1], в связи с повышением цен на нефтепродукты, основные металлургические фирмы Японии почти полностью прекратили вдувание мазута в доменные печи.

Проблемы при вдувании природного газа существуют и в отечественном доменном производстве. Анализом итогов работы трех доменных печей за 18 месячный период работы печей установлена экстремальная связь между затратами природного газа и кокса при постоянном расходе технологического кислорода. По данным работ [2, 3] оптимум расхода ПГ смещается в сторону его увеличения лишь с повышением подачи кислорода в дутье. Результаты исследований показали, что с уменьшением отношения ПГ/ТК с 1,73 до 0,83 эффективность использования газового топлива повысилась, что подтверждается возрастанием содержания в колошниковом газе CO_2 и относительно высоким коэффициентом замены кокса (K_z) равным $1,05 \text{ кг/м}^3$ ПГ. Как показали расчеты, значение ПГ/ТК, обеспечивающее минимальный расход кокса, изменяется в зависимости от величины подачи в печь природного газа (рисунок 2).

По данным работ [2, 4] превышение оптимальной величины ПГ/ТК резко снижает производительность печи и повышает расход кокса. Величина оптимального расхода природного газа различна для разных печей и для каждой печи должна не только определяться

индивидуально, но и периодически корректироваться. Однако, даже при коэффициенте замены равном единице, в тепловом отношении замена кокса природным газом не может быть эквивалентна, поскольку химическая теплота, внесенная в печь одним кубическим метром ПГ в 1,15...1,2 раза больше химической теплоты одного килограмма, выведенного из плавки кокса.

С увеличением расхода дополнительного топлива обеспечить его хорошее перемешивание с дутьем и полное сгорание у фурм становится труднее. Поэтому для каждого режима доменной плавки существует оптимальный расход ДТ, превышение которого вызывает увеличение расхода кокса и снижение производительности доменной печи [2–4]. Для обеспечения рационального режима плавки повышение подачи природного газа необходимо повышать расход кислорода. Результаты исследований и обработка данных работы доменной печи № 7 ММК представлены на рис.2.

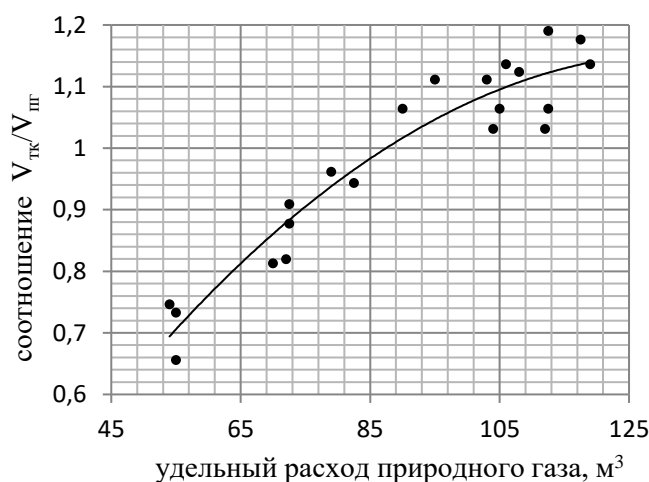


Рис. 2. Влияние расхода природного газа на соотношение $V_{ТК}/V_{ПГ}$

Снижение удельного расхода кокса при вдувании дополнительного топлива дает представление об эффективности мероприятия лишь с экономической точки зрения, поскольку цена 1000 кг кокса превышает цену 1000 м³ ПГ. Оценка этого мероприятия с позиций энергетической эффективности показывает, что вдувание углеводородов в доменную печь однозначно увеличивает удельные энергозатраты. Это, в первую очередь, объясняется тем, что количество химической теплоты, вносимое с газовым топливом всегда больше, чем химическая теплота выводимого из плавки кокса. К топливной разнице добавляются еще и энергетические затраты на производство технологического кислорода

Энергетическую эффективность тех или иных мероприятий (методов интенсификации) трудно оценить лишь долей выведенного из плавки дорогостоящего кокса или величиной указанных показателей. По содержащейся в них информации эти показатели могут быть использованы для сравнительной оценки печей различного объема и работающих в различных условиях. Удельные же затраты могут существенно различаться и при одинаковых значениях основных показателей плавки. В связи с этим возникает необходимость оценки влияния технологических мероприятий на показатели доменной плавки и, в первую очередь, при использовании комбинированного дутья, поскольку его параметры в основном определяют производительность печи и величину топливо-энергетических затрат. Используемая оценка эффективности вдуваемого дополнительного топлива по коэффициенту замены кокса существенно зависит от длительности исследуемого периода работы печи, устойчивости ее хода, а также других характеристик, не связанных с параметрами комбинированного дутья.

Достаточно точную оценку энергозатрат на производство продукции предлагают авторы работы [5]. По определению авторов, предлагаемая оценка представляет собой технологическое топливное число (ТТЧ) конечной продукции и является показателем полной ее энергоемкости. В ТТЧ авторы включают затраты всех видов энергии в данном и во всех предшествующих пределах технологического процесса, пересчитанные на необходимое для

их получения топливо за вычетом тепловых, топливных, материальных и других вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Для расчета ТТЧ требуются, по крайней мере, данные по 18–20 пунктам, учитывающим полные энергозатраты по всем переделам, начиная с добычи сырьевых ресурсов. Естественно, что практическое применение предлагаемого метода для оценки влияния различных технологических мероприятий на энергетику доменной плавки довольно сложно. В то же время оценка влияния технологических мероприятий на показатели доменной плавки необходима и, в первую очередь, при использовании комбинированного дутья, поскольку его параметры устанавливают лишь с целью увеличения производительности печи и сокращения расхода кокса.

Анализ потребления энергоресурсов доменным цехом ММК показал, что среднегодовое энергопотребление доменного цеха составляет примерно 5,23 Гкал/т чугуна [6].

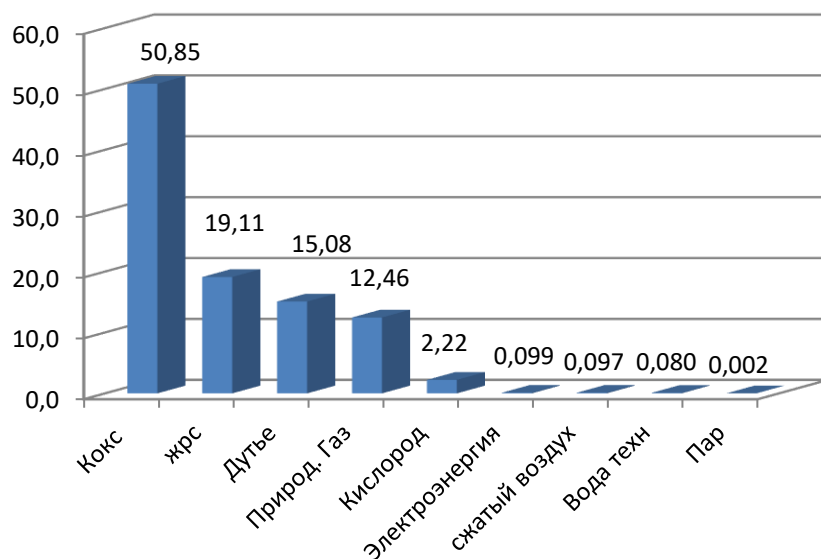


Рис. 3. Доля энергоресурса в общем потреблении

Однако удельные энергозатраты на производство чугуна с учётом затрат всех видов энергии и во всех предшествующих переделах технологических циклов, пересчитанные на необходимое для их получения топливо значительно выше и составляют 6,5 Гкал/т чугуна. Наибольшую долю в энергопотреблении занимает кокс – (50,9 %). На втором месте – железорудное сырьё (ЖРС) – (19,1 %). Далее следуют дутье – (15,1 %), природный газ – (12,46 %), кислород и прочие энергоресурсы, потребляемые доменным цехом. Доля прочих энергоресурсов, потребляемых доменным цехом (пар, электроэнергия, техническая вода, теплофикационная вода, сжатый воздух, азот и пожарно-питьевая вода) не превышает 2 %. Кроме того, объёмы потребления прочих энергоресурсов не имеют жесткой зависимости от производства и практически неизменны. Таким образом, долю прочих энергоресурсов можно считать условно постоянными. Доля каждого энергоресурса, потребляемого доменным цехом в общее энергопотребление, представлена на рис. 3.

Таким образом, в общем виде удельные суммарные энергетические затраты $E_{\text{усэ}}$, выраженные в кг условного топлива (кг у. т.), можно разделить на две составляющие: E_{var} – энергозатраты существенно зависящие от изменений параметров комбинированного дутья; E_{const} – энергозатраты, мало изменяющиеся или остающиеся практически постоянными длительный период времени, т.е.

$$E_{\text{усэ}} = E_{\text{var}} + E_{\text{const}}, \quad (1)$$

Переменные удельные энергозатраты E_{var} можно представить, как сумму энергозатрат с вводимыми в доменную печь коксом ($E_{\text{к}}$), дутьем ($E_{\text{д}}$), дополнительным топливом ($E_{\text{дм}}$) и технологическим кислородом ($E_{\text{мк}}$):

$$E_{var}=E_{\kappa}+E_{\partial}+E_{\partial m}+E_{mk} \quad (2)$$

Энергозатраты с коксом включают химическую теплоту горения кокса и энергетические затраты, необходимые для его производства (электроэнергия, газовое топливо для отопления коксовых печей, пар, техническая вода). В энергозатратах с дополнительным топливом следует учитывать химическую теплоту топлива, определяемую химическим составом и фазовым его состоянием, а также затраты на его компремирование до давления подачи в печь (газовое топливо), энергетические затраты на подогрев (мазут и газ), или на подготовку и вдувание пылеугольного топлива. Энергия горячего дутья по величине вносимой теплоты является второй по значимости статьей теплового баланса плавки после химической теплоты вводимого в печь кокса и топливной добавки. Энергозатраты на его производство включают физическую теплоту нагретого воздуха и энергию, затрачиваемую на компремирование дутья. Затраты с технологическим кислородом, используемым для обогащения дутья, определяются расходами электроэнергии, воды и пара для его получения.

Вторая составляющая удельных суммарных энергозатрат – E_{const} учитывает затраты на производство используемых в доменной печи энергоносителей: воды для охлаждения печи, пара для увлажнения дутья и заполнения межконусного пространства загрузочного устройства, электроэнергии для привода механизмов и оборудования печи, а также энергозатраты на производство железнорудного сырья:

$$E_{const}=E_{жрс}+E_{\partial}+E_{св}+E_{мс}+E_n \quad (3)$$

Все необходимые для расчета E_{var} и E_{const} данные содержатся в калькуляциях себестоимости производства чугуна и соответствующих энергоносителей.

Величина $E_{жрс}$ зависит от глубины обогащения железной руды и способа окучивания ее (агломерат, окатыши) и применяемых флюсов, но в любом случае они относительно постоянны во времени и не зависят от значений параметров комбинированного дутья.

В общем виде формулу для определения суммарных удельных энергозатрат на производство чугуна и соответствующих энергоносителей можно представить в следующем виде:

$$E_{уцз}=(K_o e_{\kappa}+Q_{\kappa} K_o/29.3)+G_{mk} e_{mk}+(V_o e_{\partial}+V_o I_{\partial}/\eta_{\partial n})+(G_{\partial n} Q_{\partial m}/29.3+G_{\partial n} I_{\partial m}/\eta_{\partial n}+e_{\partial m} G_{\partial m})+E_{const}, \quad (4)$$

где Q_{κ} – низшая теплота сгорания кокса; $I_{\partial m}$ – теплосодержание дополнительного топлива; $\eta_{\partial n}$ – коэффициент полезного действия газоподогревателя; K_o – удельный расход кокса (из расчета технологических показателей доменной плавки при изменении расхода дополнительного топлива); $G_{\partial m}$ – удельный расход дополнительного топлива; V_o – удельный расход дутья; I_{∂} – теплосодержание дутья; $\eta_{\partial n}$ – коэффициент полезного действия воздухоподогревателя; G_{mk} – удельный расход кислорода; $e_{\partial m}$, e_{∂} , e_{mk} , e_{κ} , – удельные энергозатраты на компремирование (подогрев) дополнительного топлива, дутья и производство кислорода, кокса. Методика, с помощью которой оценивалась эффективность вдувания дополнительного топлива, заключается в определении удельных энергозатрат в первую очередь реагирующие на изменение параметров комбинированного дутья. Рассмотренная методика была заложена в основу программы расчета энергетических затрат на выплавку тонны чугуна. Для расчетного определения показателей доменной плавки использовался метод А.Н. Рамма [8]. Пример расчетов энергетических затрат на производство тонны чугуна приведен в таблице 1.

Таблица 1

Энергетические затраты на производство 1 т чугуна

Энергоносители		Затраты на производство теплоносителей, кг условного топлива/ед. измерения												Расход теплоносителя (ед. измерения) на т чугуна	Затраты на ед. теплоносителя кг у. т.
		Электроэнергия	Пар	Вода техн.	Газ коксовый (природный)	бентонит	известняк	коксовая мелочь	известь, т	концентрат	руда	сжатый воздух	Сумма		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16	17
	Руда	0,35											0,35	0,08	0,03
	Агломерат	10,31		0,10	7,83		0,02	52,39	6,53	17,82	0,16		95,17	1,01	96,50
	Окатыши	23,45		0,23	45,70	0,03	0,01			66,00		0,21	135,6	0,59	80,23
	флюсы	0,35											0,35	0,04	0,01
Ч	Кокс кг у. т./т чугуна:														
	Хим. теплота	...	...	...	...									457,40	468,33
	Энергозатраты	0,15	3,77	0,01	0,57								4,50	0,46	2,06
У	Кислород, кг у. т./м ³ О ₂	0,06	0,11	0,00	...								0,17	119,10	20,50
	Дутье, кг у. т./м ³ дутья:														0,00
	подогрев	...	...	...	...								0,08	1457,00	112,19
Г	компримир.	0,000037	0,01	0,00	...								0,02	1457,00	27,30
	Природ. газ, кг у. т./м ³ ПГ												0,00		0,00
	Хим. теплота	...	...	...	...								...	95,30	108,64
У	Физ. теплота	...	...	...	...								...	95,30	4,40
	Компримир.	...	...	...	...								0,02	95,30	2,21
	Вода техн. кг у. т./м ³ Н ₂ О	0,032	0,00	...	...								0,03	21,70	0,74
Н	Пар, кг усл. топл.	...	...	...	...								...	0,02	0,02
	Электроэнергия, квт*ч	...	...	...	...								...	7,50	0,92
	сжатый воздух, м ³	0,040											0,04	22,60	0,90
	ИТОГО, кг усл. топлива	34,74	3,90	0,35	54,10	0,03	0,03	52,39	6,53	83,82	0,16	0,21		...	924,97

На рисунке 4 представлены изменения энергозатрат при вдувании природного газа от 0 до 160 м³/т чугуна и одновременно возрастающим содержанием кислорода в дутье от 21 до 29 %.

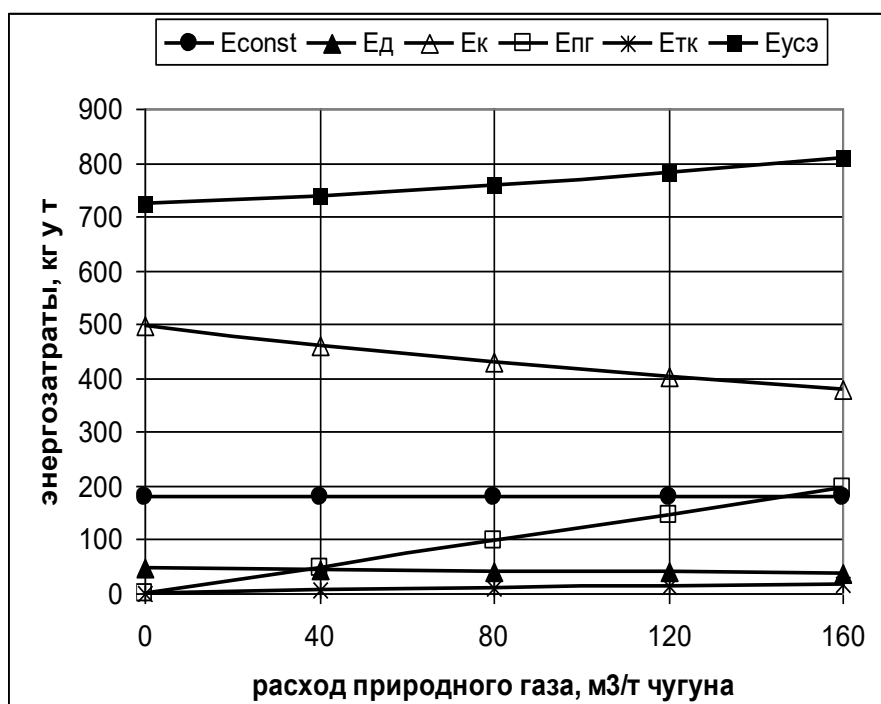


Рис. 4. Зависимость энергозатрат от изменения расхода природного газа

Теоретические расчеты, проведенные по указанной методике, подтверждаются расчетами результатов работы доменного цеха, обработанных за пятилетний период (рисунок 5).

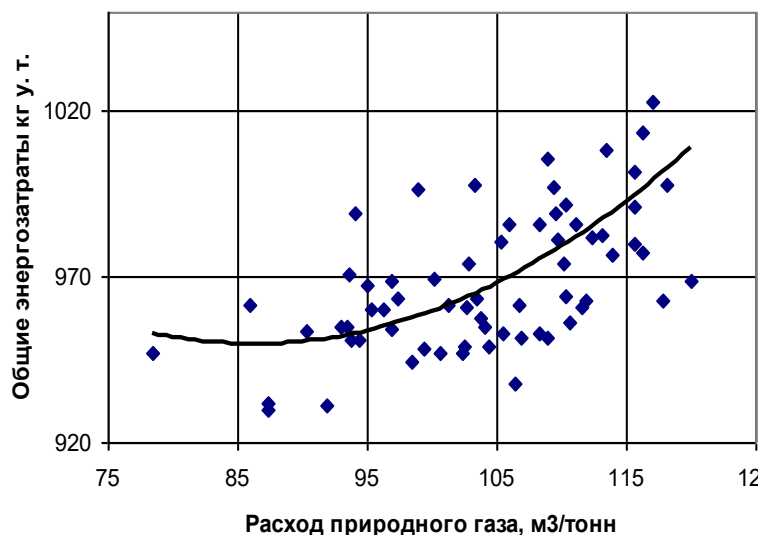


Рис. 5. Зависимость величины энергозатрат от расхода природного газа (при средней температуре дутья $t_d = 1156^\circ\text{C}$)

Статистической обработкой показателей работы доменных печей установлено, что рост $E_{\text{сум}}$ вызывает повышение расхода природного газа (ПГ), при этом при расходе ПГ свыше 95 м³/т чугуна каждый кубический метр его увеличивает $E_{\text{сум}}$ на 1,5...2,0 кг у.т.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что при повышении степени обогащения дутья затраты с коксом и нагретым дутьем ($E_k + E_d$) снижаются, а энергозатраты, связанные с дополнительным топливом и технологическим кислородом ($E_{\text{дт}} + E_{\text{тк}}$), увеличиваются. Как показали расчеты, снижение первых составляющих происходит медленнее, чем последних,

поэтому суммарные энергозатраты Еуsз увеличиваются, несмотря на снижение удельного расхода кокса.

Список использованных источников

1. Кутнер С.М. Доменное производство Японии. Черная металлургия. Бюлл. ин-та "Черметинформация", 1982, №3.
2. Яковлев Ю.В., Марсуверский Б.А., Бабарыкин Н.Н., Сеничкин Б.К. [и др.]. Исследование доменной плавки при использовании окатышей и комбинированного дутья. Производство чугуна. Межвузовский сборник. Свердловск, изд. УПИ им. С. М. Кирова, 1982.
3. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Сеничкин Б.К., Логунова О.С. Снижение удельного количества кокса при оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь. Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: сборник докладов международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 533 с.
4. Парсункин Б.Н., Сеничкин Б.К., Андреев С.М., Рябчиков М.Ю. Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье. Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. №4. С. 69–73.
5. Рациональное использование топливно – энергетических ресурсов / Егоричев А.П., Лисиенко В.Г., Розин С.Е. [и др.]. – М.: Металлургия, 1990.
6. Васильева Т.М., Сеничкин Б.К. Оценка влияния различных факторов на расход кокса в доменной плавке методом статистического анализа. Материалы 6-й Всерос. науч.-техн. конф «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России». Магнитогорск. МГТУ. 2005.
7. Сеничкин Б.К., Ваганов А.И., Матюшенко Г.А. Определение удельных энергетических затрат при выплавке чугуна с использованием дополнительного топлива // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 6. С. 5–7.
8. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.

УДК 669.187.2.036:621.365.22

Ячиков И.М.¹, Портнова И.В.¹, Быстров М.В.²

¹ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

² ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина», г. Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ИСПАРИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Аннотация

Снижение удельного расхода графитированных электродов при выплавке стали в дуговых печах является актуальной задачей, так как статья их расхода составляет весомую часть затрат при определении себестоимости готовой продукции. В работе было проведено компьютерное моделирование угара графитированных электродов для дуговых печей трехфазного и постоянного токов. Кратко рассмотрена математическая модель теплового состояния графитированного электрода и его термического разрушения при его нахождении в печи под током. Проведена проверка адекватности моделирования путем сравнения полученных результатов с известными литературными данными по работе промышленных печей. Выявлена эффективность использования испарительного охлаждения графитированных электродов. В частности, установлено, что для дуговых печей вместимостью 80–200 т, работающих на постоянном и трехфазном переменном токах,