

УДК 620.92:669

*к.т.н. Петров П. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР),
к.э.н. Ульяницкая О. В.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В работе выполнен комплексный анализ технико-экономических показателей использования энергоносителей в металлургическом производстве и обоснована важность замены их дорогостоящих компонентов альтернативными источниками. Представлены энергоэкономические показатели твердых материалов и газов, применяемых в качестве топлива.

Ключевые слова: дорогостоящие компоненты энергоносителей, кокс, альтернативные источники энергоресурсов, пылеугольное топливо, сопутствующие газы.

Высокая энергоемкость металлургической отрасли обусловила активный поиск возможностей снижения потребления высококалорийных, но дорогостоящих энергоносителей практически на всех пределах металлургического производства.

Повышенные энергетические затраты в черной металлургии обусловлены главным образом уровнем потребления и стоимостью природного газа и кокса на одну тонну выплавленного чугуна [1].

Снижение себестоимости основного продукта доменной плавки — приоритетный показатель конечной цены и конкурентоспособности товарной продукции предприятия на рынках металла.

Дороговизна и неминуемая истощенность источников природного газа, нефти, углей способствуют активному исследованию возможностей использования возобновляемого растительного сырья в качестве энергоносителя для нужд промышленных отраслей, в том числе и металлургического производства.

Так, в работах [2–5] акцентируется, что биотопливо, пригодное для замены коксовой мелочи в агломерационном производстве, можно получить из отходов сельского хозяйства, пищевой промышленности, лесозаготовок и деревообработки.

Результаты экспериментального исследования по введению в состав аглошихты лужги подсолнечных семян представлены в

публикации [5]. Как достоинство этого материала авторы отмечают достаточно низкое содержание золы (2,7 %), экологичность, энергетическую способность (16500÷17850 кДж/кг), примерно равную энергоемкости древесины и торфа (табл. 1).

При этом эксперимент показал, что введение лужги в шихту не оказывает существенного влияния на качественные характеристики готового агломерата. Даже в экономически развитых странах ведутся активные поиски оптимальных источников биотоплива для агломерационного процесса [2, 3]. Следует отметить, что упомянутые работы находятся ещё на исследовательском этапе и стабильного промышленного использования пока не получили. Видимо, для крупных металлургических комбинатов биоресурсы как энергоисточники ещё недостаточно эффективны.

Безусловным направлением инновационной технической политики на ближайшую перспективу в металлургической отрасли является повышение эффективности производства высококачественной продукции при значительном ресурсосбережении за счет использования альтернативных тепловых источников. К альтернативным относят побочные (нефтекокс, угольная пыль, биоресурсы), а также сопутствующие металлургическим процессам вещества: коксовый, доменный и конвертерный газы.

Таблица 1

Теплотворная способность некоторых высококалорийных твердых материалов

№	Наименование материала	Теплотворная (энергетическая) способность*	
		ккал/кг	кДж/кг
1	Антрацит	7850÷8350	32804÷34903
2	Графит	7790	32562
3	Каменные угли	5200÷7300	21736÷30514
4	Кокс	5600÷7200	23408÷30096
5	Древесные топливные брикеты	4200÷4400	17560÷18393
6	Торф	3000÷4500	12540÷18810
7	Нефтяной кокс	7900÷8200	33022÷34276
8	Лузга семян подсолнечника	4007÷4850	16750÷17850

*По данным, предоставленным проф. Ульяницким В. Н.

Интересен результат анализа использования нефтяного кокса в составе пылеугольного топлива (ПУТ) для вдувания в доменные печи [6]. Содержание исследований связано с процессом выплавки чугуна в ДП № 4 и № 5 Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК). Исходным сырьем для получения нефтяного кокса являются всевозможные остатки от добычи и переработки нефти: гудроны, полугудроны, крекинг-остатки, смолы пиролиза и др.

Согласно ГОСТ 22898–78, вырабатывают нефтяные коксы восьми марок. Семь из них малосернистые: 0,2÷1,7 % серы, зольность 0,15÷0,6 %, плотность 2,04÷2,08 т/м³, теплотворная способность 7900 ÷ 8200 ккал/кг (табл. 1). Исследования проводились для вариантов использования нефтекокса при пошаговом изменении его содержания в угольно-коксевой смеси от 10 до 100 % (шаг 10 %).

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением доли нефтяного кокса полнота сгорания смеси ПУТ монотонно снижается. При доле нефтяного кокса 50 % в смеси ПУТ возникает вероятность неровного хода доменной печи. Реализация компенсирующих мероприятий (повышения теоретической температуры горения) позволяет получить минимальный расход металлургического кокса при содержании 10÷30 % нефтекокса в смеси ПУТ. Кроме того, реализация мероприятий

по сохранению на нужном уровне серы в чугуне приведет к увеличению расхода металлургического кокса.

Таким образом, введение нефтяного кокса в состав пылеугольного топлива потребует компенсирующих мероприятий, неоднозначно сказывающихся на ходе плавки и состоянии доменной печи.

Однако важнейшим направлением энергоресурсосбережения в технологии выплавки чугуна является практика экономии кокса (наиболее дорогой энергосоставляющей доменной плавки), обусловленная применением дополнительных видов топлива как заменителей части кокса. Наиболее весомым дополнительным источником является пылеугольная составляющая — ПУТ.

Ещё во второй половине XX века активно велись работы над проблемами снижения расхода природного газа и металлургического кокса при одновременном повышении его качества, а также над заменой части кокса ПУТ в структуре теплоносителей доменной плавки.

Сокращение запасов коксующихся углей обусловило исследования по изысканию рационального состава концентрата углей Донбасса для производства кокса и, соответственно, ПУТ. Известно, что основным показателем эффективности использования углей в качестве ПУТ является полнота их сгорания в фурменной зоне доменной печи [7].

Для полного сгорания ПУТ в доменной печи очень важным является выбор углей. Чем выше содержание углерода, тем больше выделяется теплоты и выше коэффициент замещения кокса [8].

Комплексная оценка эффективности вдувания ПУТ позволила установить, что использование антрацитов в доменной плавке по тепловым показателям в 1,7 раза эффективнее тощих и в 2,2 раза эффективнее газовых углей.

Однако использование антрацитов менее эффективно, чем использование тощих углей, прежде всего, из-за высокой заготовительной стоимости топлива.

Аналитическими расчетами определены максимальные значения размеров частиц ПУТ из углей: марки А — 20 мкм, марки Т — 24 мкм, марки Г — 29 мкм, которые сгорают практически полностью в фурменной зоне доменной печи [6]. Из этого следует, что антрацит необходимо подвергать измельчению до более мелких фракций, чем угли менее твердые.

Однако дробление антрацита до столь мелких фракций из-за его высокой твердости сопровождается повышением удельной энергоемкости процесса измельчения и ускоряет изнашивание рабочего инструмента мельницы [9]. Длительность рабо-

чей кампании размалывающих элементов мельниц обусловлена абразивными свойствами обрабатываемого материала и противоизносной стойкостью рабочих поверхностей валков и сегментов помольного стола. Для анализа использовали антрацит, добываемый горными предприятиями Донбасса.

Важной характеристикой прочностных свойств антрацита является его ударная прочность на сбрасывание. Результаты опыта свидетельствуют о различии показателя кусковатости (табл. 2), а значит, и прочности у антрацитов Донбасса.

Наибольшей ударной прочностью, как следует из таблицы 2, обладают угли поставщиков под № 5, 6 и 7. Самая низкая величина прочности у антрацита черного предприятия «София Бродская».

Другой важной механической характеристикой процесса является его прочность на сжатие. Для исследования использовали образцы кубической формы, размером ребра каждого 40, 30, 20 и 15 мм. Испытанию на сжатие [10] подвергали четыре пробы образца каждого размера.

Анализ результатов таблицы 3 свидетельствует об отсутствии определенной закономерности процесса разрушения образцов антрацита.

Таблица 2

Данные кусковатости проб антрацита после испытания их сбрасыванием

№	Поставщик антрацита	Средний диаметр кусков проб, мм			
		до испытаний	после испытаний	Величина уменьшения среднего диаметра после сбрасывания	
				абсолютная, мкм	относительная, %
1	«София Бродская»	50,0	32,0	18	64,0
2	Постниково	50,0	34,4	15,6	68,8
3	ЦОФ «Нагольчанская»	50,0	36,2	13,8	72,4
4	Красный Луч	50,0	37,0	13,0	74,0
5	«Ровенькиантрацит»	50,0	39,2	10,8	78,4
6	Дарьевка	50,0	39,3	10,7	78,6
7	Лобовские Копи	50,0	40,1	9,9	80,2
Средневзвешенные величины			36,88	13,1	73,8

Таблица 3

Значение прочности на сжатие для различных размеров проб антрацита

№ образца	Размер ребра образца, мм	Напряжения, при которых разрушились пробы, МПа					Усредненная величина
		Номер опыта					
		1	2	3	4		
1	40	2,1	0,9	3,6	2,2	2,200	
2	30	2,5	1,5	2,1	1,0	1,775	
3	20	0,9	1,2	0,5	1,3	0,975	
4	15	1,0	1,2	1,1	2,1	1,350	

Разброс показателей прочности на сжатие составил от 0,5 МПа до 3,6 МПа. Если рассматривать усредненные величины напряжений начала разрушения, то с уменьшением размера проб образцов № 1, 2 и 3 показатель усредненной величины заметно снижается соответственно на 2,2, 1,775 и 0,975 МПа. Однако для пробы образца № 4 (размер 15 мм) показатель усредненной величины прочности почти на 39 % выше, чем у образца № 3.

Все 16 опытов на исследованных образцах дали среднеарифметическую величину напряжения начала разрушения антрацита, равную 1,575 МПа. Следует предположить, что эта величина должна с некоторыми допущениями приниматься в расчетах как энергоемкости процесса измельчения антрацитовых углей, так и оценки влияния ее на износные характеристики рабочего инструмента мельниц [9].

Наилучшие показатели достигаются при вдувании в доменную печь угольных смесей, содержащих до 60 % легковоспламеняемого угля (марка Г), остальное — высококалорийные угли марок А, АС, Т. При низком качестве сырья предпочтительное соотношение упомянутых марок углей в ПУТ должно быть соответственно 80:20 % [9]. Однако металлургическое предприятие часто готовит смесь для ПУТ из доступных и недорогих углей. Например, в Филиале № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (ВТС) пылеугольный концентрат состоит из 94,92 % марки КС и 5,08 % марки АС. Кроме того, рекомендуемые в качестве ПУТ смеси и концентраты должны иметь содержание золы не более 10÷12 %, серы — 1,5÷2,0 %, влаж-

ность не должна превышать 10÷12 %, размер (диаметр) вдуваемых в доменную печь частиц ПУТ варьируется в пределах от 30 до 200 мкм [8, 11].

Начало освоения технологии использования ПУТ в доменной плавке на ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (АМК) пришлось на лето 2009 года. Первоначальные показатели были следующие (на ДП 3000 м³): расход ПУТ 130 кг/т чугуна и потребление кокса 480 кг/т чугуна. Природный газ был сведен до минимума.

Проектом инновационного перевооружения комбината предусматривалось за счет использования ПУТ во всех печах доменного цеха получить экономию энергоресурсов в 241,3 тыс. т условного топлива (теплотворная способность 7000 ккал/кг). В натуральных величинах это составляло 607,5 тыс. т кокса и 784,8 млн м³ природного газа. Однако последовавшие в Донбассе события отрицательно сказались на реализации планов предприятия.

В нынешних условиях персонал доменного цеха филиала № 12 ЗАО «ВТС» активно работает над усовершенствованием системы приготовления и использования ПУТ. При этом особое внимание уделяется тем параметрам доменной плавки, которые способствуют повышению энергоэффективности применения пылеугольного топлива. Расход его на тонну выплавленного чугуна составляет 117÷120 кг, а в себестоимости чугуна доля ПУТ не превышает 30 %.

В число важных направлений экономии энергоресурсов в металлургии входит использование газов как сопутствующих

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

продуктов процессов производства кокса, чугуна и стали [12]. Лишь в XXI веке технологию использования этих газов в качестве энергоносителей для выработки электроэнергии внедрили на ПАО «АМК». Предприятие совместно с японской фирмой Sumitomo реализовало проект парогазовой установки по выработке электроэнергии из смеси коксового, доменного и конвертерного газов.

Компонентный состав газов, их средневзвешенная величина в смеси даны в таблице 4.

Парогазовая установка производит электроэнергию путем прямой переработки газовых отходов коксохимического и металлургического производств. Проектная мощность каждого из трёх блоков станции 151,5 МВт. Суммарная мощность установки более 450 МВт, чего с избытком достаточно для покрытия собственной потребности в электроэнергии. Залогом этому должна быть стабильная работа предприятия.

Основные характеристики используемых газов для выработки электроэнергии представлены в таблице 5.

Таблица 4

Средневзвешенные качественные показатели химического состава газов, используемых в филиале № 12 ЗАО «Внешторгсервис»*

№	Наименование компонента газа	Процентное содержание химических компонент			
		доменный	кокосый	конвертерный	средневзвешенная смесь
1	Азот	51,67	3,6	24,2	45,53
2	Водород	3,64	54,8	0,5	6,66
3	Двуокись углерода	17,15	2,7	18,1	16,30
4	Окись углерода	24,85	6,6	57,2	27,15
5	Метан	0,2	24,6	0	1,79
6	Ацетилен	0	3,2	0	0,21
7	Кислород	0,2	0,9	0	0,23

* По данным, предоставленным проф. Ульяницким В. Н.

Таблица 5

Параметры и показатели расхода смешиваемых газов на один энергоблок газотурбинной установки

Наименование параметра	Единица измерения	Газ			
		доменный	кокосый	конвертерный	средневзвешенная смесь
Расход	Нм ³ /час	228500 (макс. 250×10 ³)	18200 (макс. 21×10 ³)	3000	276700
Температура подачи:	°С				
расчетная		30	30	30	30
минимальная		10	10	10	10
максимальная		40	40	40	40
Давление подачи	кПа	8	12	8	
Низшая теплотворная способность	ккал/м ³	750÷790	4050÷4100	1700÷1790	1050÷1090

Из таблицы 5 следует, что показатель теплотворной способности смеси газов $1050 \div 1090$ ккал/м³, а часовой расход на одном энергоблоке 276700 м³ (доменного 240 тыс. м³, коксового 25 тыс. м³ и конвертерного 15 тыс. м³). На производство 1 кВт·ч электроэнергии расходуется 0,263 кг условного топлива, что на 25 % меньше, чем на традиционных тепловых станциях. Кроме экономической выгоды, технология прямой переработки металлургических газов оказывает благотворное влияние на экологическую среду самого предприятия и окружающего пространства.

Основные энергоэкономические характеристики газа для выработки электроэнергии даны в таблице 6.

Анализ показателей таблицы 6 свидетельствует, что по теплотворной способно-

сти доменный газ в 5,2 раза уступает коксовому и в 2,24 раза конвертерному. Примерно в той же пропорции определена отпускная цена 1000 м³ газа для выработки электроэнергии. Теплотворная способность смеси этих же газов (1050 ккал/м³) в 3,9 раз меньше коксового, в 1,66 раза конвертерного, но в 1,35 раза выше доменного.

Обобщая полученные результаты исследований по альтернативным источникам энергоресурсов, следует заключить, что для современной металлургической отрасли пока основными видами топлива являются высококалорийные углеродосодержащие материалы. Решение задачи состоит в том, чтобы значительно снизить их потребление, заменяя более эффективными альтернативными энергоносителями.

Таблица 6

Энергоэкономические показатели газов, используемых на электростанции филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис»

Газ	Выход газа на единицу продукции	Усредненная энергоемкость, ккал/м ³	Цена за 1000 м ³ , руб.	Удельный показатель энергоемкости к природному газу*
Доменный	1890 м ³ /т чугуна	780	153	0,098
Коксовый	470 м ³ /т кокса	4075	800	0,51
Конвертерный	152 м ³ /т стали	1745	343	0,22

*Усредненная энергоемкость природного газа принята 8000 ккал/м³.

Выводы:

1. Анализ результатов потребления металлургическими предприятиями топлива и энергии свидетельствует о необходимости использования пылеугольного топлива с целью частичного отказа от дорогостоящего природного газа и существенного снижения расхода кокса на единицу продукции доменного цеха.

2. Опыт использования ПУТ показал его более высокую эффективность на доменных печах большого размера. Подача пылеугольного топлива более 120 кг на

тонну чугуна для печей малых и средних объемов обусловила повышенный температурный режим плавки, что отрицательно сказывается на системе охлаждения печи.

3. На экономико-экологические показатели металлургических предприятий положительное влияние оказывает использование энергетических возможностей доменного, коксового и конвертерного газов для выработки относительно дешевой электроэнергии на специальной газотурбинной установке.

Библиографический список

1. Мороз, А. Я. Использование энергоносителей в производстве продукции на металлургических и коксохимических предприятиях Донецкой области в 2011 году [Текст] / А. Я. Мороз,

И. Т. Резниченко, С. Н. Тушико // *Металлургические процессы и оборудование*. — Донецк, 2012. — № 1 — С. 12–16.

2. Михайлов, В. Г. Биотопливо в агломерационном процессе [Текст] / В. Г. Михайлов и др. // *Современная металлургия нового тысячелетия* : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. — Липецк : Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2016. — С. 132–137.

3. Mousa, E. A. Iron ore sintering process with biomass utilization [Text] / E. A. Mousa, A. Babich, D. Senk // In : *Proceeding : METEC & 2nd ESTAD*. — Düsseldorf, Germany, 2015.

4. *Alternate Carbon Sources for Sintering of Iron Ore (Acasos)* [Text] / Roland Pietruck [ets.] / — Luxembourg Office of the European Union, 2013. — 71 p.

5. Исследование технологических свойств растительных отходов как альтернативного экологического топлива [Текст] / Л. И. Калашиникова и др. // *Вектор науки ТГУ*. — Тольятти, 2011. — № 4. — С. 32–34.

6. Титов, В. Н. Теоретический анализ применения нефтяного кокса в качестве пылеугольного топлива [Текст] / В. Н. Титов, Л. С. Ивлева // *Современная металлургия нового тысячелетия* : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. — Липецк : Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2016. — С. 258–264.

7. Аносов, В. Г. Исследование процесса горения пылеугольного топлива в фурменной зоне доменной печи [Текст] / В. Г. Аносов, Д. А. Лаптева // *Металлургия*. — Запорожье, 2011. — Вып. 23. — С. 16–31.

8. Калинчак, В. В. Оценка доли выгорания частиц пылеугольного топлива в фурменном очаге [Текст] / В. В. Калинчак, Ю. А. Зинченко, А. С. Черненко, Р. Д. Куземко // *Металл и литье Украины*. — 2013. — № 12. — С. 9–16.

9. Ульяницкий, В. Н. Оценка изношенных характеристик рабочих инструментов валково-тарельчатых мельниц для приготовления пылеугольного топлива [Текст] / В. Н. Ульяницкий, П. А. Петров, О. В. Ульяницкая, С. П. Еронько // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. 13 (56). — С. 129–135.

10. Новохатский, А. М. Проблемы замены кокса альтернативными видами топлива и пути их решения [Текст] : монография / А. М. Новохатский, А. В. Карпов. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 182 с.

11. Расчет и оценка эффективности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива в условиях ПАО «ММК им. Ильича» [Текст] / В. С. Бойко, С. А. Матвиенков, С. Л. Ярошевский, А. В. Кузин, В. В. Климанчук, В. А. Струтинский // *Металл и литье Украины*. — 2012. — № 2–3. — С. 7–11.

12. Ульяницкая, О. В. Анализ использования и экономии энергоносителей на предприятиях металлургического комплекса Украины [Текст] / О. В. Ульяницкая, Н. В. Коваленко // *Вісник Дніпропетровського університету. Сер. : Економіка*. — 2014. — Т. 22. — Вип. 8 (2). — С. 89–94.

© Петров П. А.

© Ульяницкая О. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. ТМиИК ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А.

Статья поступила в редакцию 13.07.2020.

PhD in Engineering Petrov P. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR), PhD in Economics Ulianitskaia O. V. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR)

EFFICIENCY OF USING ALTERNATIVE ENERGY SOURCES IN METALLURGY

The complex analysis was made for technical and economic indices of using energy carriers in metallurgy and the importance of replacing their high-priced elements by alternative sources. There have been given the energy and economic indices of solid materials and gases used as a fuel.

Key words: high-priced elements of energy carriers, coke, alternative sources of energy resources, pulverized fuel, fossil gases.