

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ФУРМЕННОЙ ЗОНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

*Запорожская государственная инженерная академия*

Наведено результати аналізу процесу горіння пиловугільного палива (ПВП) за умов горну доменної печі та виконано оцінку ступеня повноти його згорання. Запропоновано заходи щодо підвищення ступеня згорання ПВП та збільшення ефективності ПВП-технології.

Приведены результаты анализа процесса горения пылеугольного топлива (ПУТ) в условиях горна доменной печи и выполнена оценка степени полноты его сгорания. Предложены мероприятия, повышающие степень сгорания ПУТ и увеличение эффективности ПУТ-технологии.

*Введение.* В условиях существенного повышения цен на природный газ вполне очевидна необходимость его замены в промышленности на иные источники теплоты. Поиск новых технических решений также вызван сокращением запасов коксующихся углей, что приводит к ухудшению качества и повышению цен на металлургический кокс.

*Анализ достижений.* Одним из перспективных и эффективных технологических мероприятий при выплавке чугуна является применение пылеугольного топлива (ПУТ). В настоящее время строят и вводят в эксплуатацию установки ПУТ на ОАО «Енакиевский металлургический завод», ОАО «Алчевский металлургический комбинат», ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» и др. [1]. В промышленных условиях доказана возможность вдувания до 250 кг ПУТ на одну тонну чугуна, а также замены им до 30 % кокса без использования природного газа [2].

Бесспорными преимуществами ПУТ являются его минимальное воздействие на температуру горна и выход горновых газов, наличие значительных ресурсов неспекающихся углей, пригодных для приготовления ПУТ, возможность его использования для оперативного управления нагревом горна и качеством чугуна.

*Постановка задачи.* Задачей исследований является изучение процессов горения частиц ПУТ в горне доменной печи, выявление требований, которым должны удовлетворять угли, используемые для приготовления ПУТ и обеспечивающие его максимально эффективное использование.

*Основная часть.* Главным показателем эффективности использования углей является полнота их сгорания. Поэтому основным требованием к ПУТ-технологии служит полная газификация угольных частиц в пределах фурменных зон доменной печи.

Неполнота сгорания ПУТ, особенно при больших расходах, обуславливает снижение коэффициента замены кокса и повышение содержания углерода в продуктах плавки. Кроме того, снижается интенсивность плавки за счет ухудшения газодинамических характеристик слоя шихты и, как следствие, производительность печи. Несгоревшие частицы ПУТ, адсорбируясь на поверхности шлака, резко понижают способность его свободно фильтровать капли чугуна. Чугун, скапливающийся на поверхности такого шлака, при контакте с фурмами вызывает их массовый выход из строя.

Для достижения оптимальных показателей при вдувании ПУТ необходимо улучшать процесс горения частиц пыли с обеспечением максимальной степени ее сжигания.

Горение ПУТ – сложный химико-физический процесс, который зависит как от кинетических характеристик, так и от физических факторов подвода кислорода к поверхности частицы. Возможны два режима сгорания ПУТ:

- кинетический (при низких температурах, когда процесс горения лимитируется химической кинетикой);

- диффузионный (при высоких температурах, когда процесс горения лимитируется диффузией кислорода к поверхности топлива).

Для интенсификации горения мелких частиц в кинетическом режиме необходимо повышение температурного уровня процесса за счет посторонних источников теплоты или повышения концентрации частиц в газе, которые прогревают газ, способствуя процессу воспламенения частиц. Для частиц, сгораемых в диффузионном режиме, необходимо как повышение концентрации кислорода в зоне горения, так и диффузионный обмен внутри и вне частички за счет аэродинамической организации потока.

Практически и экспериментально доказано, что большинство частичек угольной пыли в условиях доменной плавки сгорает в диффузионном режиме [3] ввиду незначительного влияния повышения температуры дутья на степень сгорания ПУТ.

За счет теплоты продуктов сгорания мелкие частицы прогреваются быстрее, происходит выделение летучих веществ, которые, сгорая, частично нагревают смесь. В результате уменьшения поверхности крупных частиц газовая среда нагревается слабее. Период воспламенения и горения таких частиц будет больше, чем для мелких частиц. Стремление к уменьшению размера частиц объясняется желанием увеличить реакционную поверхность ПУТ, которая в значительной мере определяет степень выгорания его в печи. Однако из-за больших скоростей нагрева ( $10^4 \dots 10^5$  К/с) увеличение удельной поверхности частиц происходит также в результате высокотемпературного термического удара при их попадании в канал фурмы.

С уменьшением скорости частиц нагрев газов увеличивается, горение происходит в диффузионной области, но это не приводит к интенсификации процесса. При увеличении расхода кислорода его концентрация на поверхности частицы увеличивается, горение протекает более интенсивно.

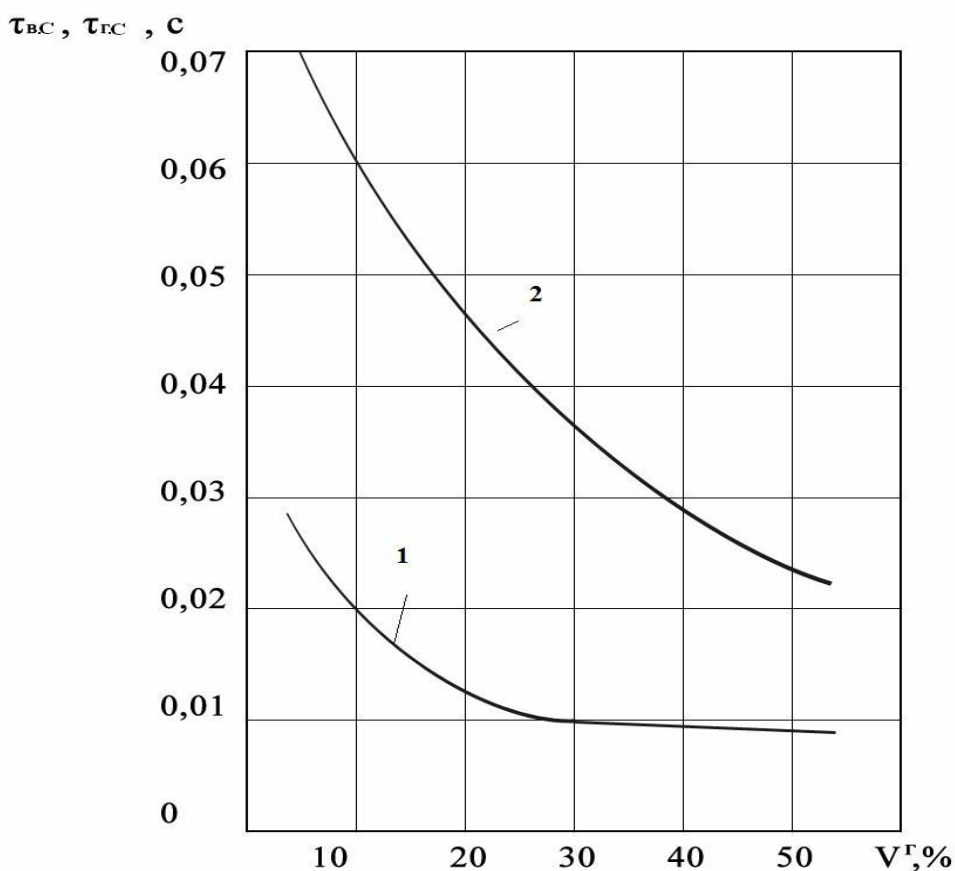
В процессе выгорания антрацитовых частиц можно различить две стадии: воспламенение частицы и ее выгорание. Воспламенение происходит при прогреве частицы до температуры 650 К. В процессе горения при температуре окружающего газового потока 1200...1400 К, что соответствует температуре дутья, температура горящих угольных частиц изменяется от 1400 до 1800 К. При температуре частиц угля выше 1600 К происходит плавление золы топлива, которая в виде капелек жидкого шлака собирается на поверхности частицы и, не смачивая ее, не препятствует диффузии кислорода. Плавление золы на ранних стадиях горения может привести к налипанию частиц пыли на стенки трубок для вдувания ПУТ и их последующего закупоривания [4]. Поэтому для приготовления ПУТ желательно выбирать угли с температурой плавления золы выше температуры дутья.

Процесс выгорания частиц газового угля характеризуется наличием четырех стадий: разогрева частицы до начала горения летучих веществ, выхода и горения летучих веществ, дальнейшего разогрева и воспламенения углерода, выгорания углерода.

Наличие высокого содержания летучих веществ значительно отличает процесс выгорания газовых углей от процесса выгорания антрацитов. Летучие вещества существенно облегчают процесс воспламенения топлива. Частицы пыли, попадая в канал фурмы, прогреваются, выделяют летучие вещества, которые, смешиваясь с окружающими газами, образуют горючую смесь. Данная смесь воспламеняется и приводит к горению

самых частиц. Температура воспламенения углей с высоким содержанием летучих веществ составляет порядка 500 К. Частицы газового угля требуют для прогрева и воспламенения меньшего промежутка времени, чем частицы антрацита.

При нагреве угольных частиц выход летучих веществ имеет взрывной характер с разбрасыванием газовых струй, а также твердых и жидких выбросов. Для газового угля характерно увеличение объема частиц к моменту окончания выхода летучих веществ, так называемое вспучивание. В период выхода летучих веществ угольное вещество внутри частиц переходит в пластическое состояние, повышается сопротивление выходу газообразных продуктов разложения, возрастает давление внутри частиц и наблюдается выделение вязкого вещества из отдельных пор на поверхности частиц. Такие выделения под действием поверхностных сил вновь притягиваются к частицам, ококсовываются и выгорают.



**Рисунок 1** – Зависимость стадий воспламенения (1 –  $\tau_{в.с}$ ) и выгорания (2 –  $\tau_{г.с}$ ) углерода остатка от выхода летучих ( $T_z = 2200$  К;  $O_2 = 21\%$ ;  $d = 70$  мкм)

Продолжительность процесса выделения и воспламенения летучих веществ зависит от их содержания в исходном угле для ПУТ, размера сжигаемых частиц и температуры окружающей газовой среды. Рост содержания летучих веществ и укрупнение частиц увеличивают время процесса дегазации. При повышении температуры окружающей газовой среды длительность выделения и сгорания летучих веществ уменьшается.

По окончании дегазации воспламеняется углерод. Горение углерода является самой длительной стадией, которая лимитирует весь процесс горения (90 % времени горения частицы). С ростом степени метаморфизма углей (уменьшения содержания летучих веществ) время воспламенения и выгорания углерода увеличивается (рис. 1). Это вызвано тем, что, выделяясь, летучие вещества образуют микропоры, и углерод легче окисляется.

Стадии воспламенения и, особенно, выгорания коксового остатка ПУТ требуют максимальной концентрации кислорода.

Для расчета продолжительности стадий горения частиц различных марок угля используют зависимости, имеющие эмпирический характер [5]:

$$\tau_{\dot{a}.\ddot{e}} = 5,3 \cdot 10^{14} \cdot k_{\dot{a}.\ddot{e}} \cdot T_{\dot{a}}^{-4} \cdot \delta^{0,8}; \quad (1)$$

$$\tau_{\ddot{a}.e} = 0,5 \cdot 10^6 \cdot \delta^2; \quad (2)$$

$$\tau_{\dot{a}.\ddot{n}} = 1,12 \cdot 10^{10} \cdot k_{\dot{a}.\ddot{n}} \cdot \frac{\rho_y \cdot \delta^{1,2}}{T_{\dot{a}}^3} \cdot \left( \frac{21}{\hat{I}_2} \right)^{0,15}; \quad (3)$$

$$\tau_{\ddot{a}.\ddot{n}} = 10^3 \cdot k_{\ddot{a}.\ddot{n}} \cdot \frac{100 - \dot{A}_{\dot{a}}^{\ddot{n}}}{100} \cdot \frac{\rho_{\ddot{N}} \cdot \delta^2}{T_{\dot{a}}^{0,9} \cdot \hat{I}_2}; \quad (4)$$

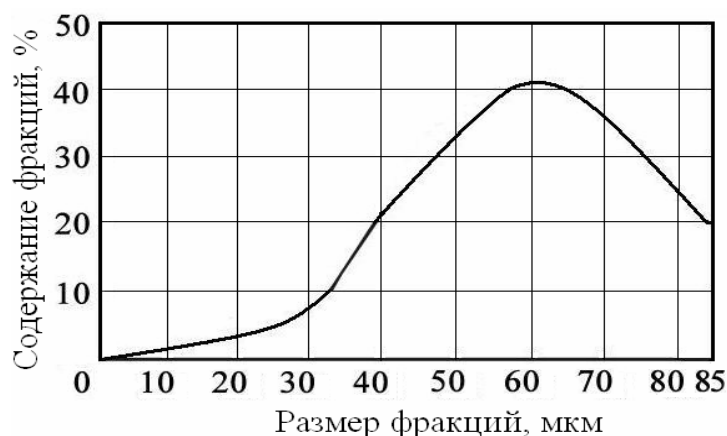
где  $\tau_{\dot{e}.л}, \tau_{\dot{e}.л}, \tau_{\dot{e}.C}, \tau_{\dot{e}.C}$  – время прогрева частиц до воспламенения и выгорания летучих веществ, воспламенения и выгорания углерода соответственно, с;  $k_{\dot{e}.л}, k_{\dot{e}.л}, k_{\dot{e}.C}, k_{\dot{e}.C}$  – опытные коэффициенты, учитывающие особенности горения различных марок углей;  $T_{\dot{e}}$  – температура окружающей газовой среды, К;  $\delta$  – средний начальный диаметр частицы, м;  $\rho_y, \rho_C$  – кажущаяся плотность угля и углеродистого остатка соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\dot{A}_{\dot{a}}^{\ddot{n}}$  – внутренняя зольность углеродистого остатка, %;  $O_2$  – объемная концентрация кислорода, %.

С использованием формул (1)-(4) для марок углей, приведенных в табл. 1, выполнены расчеты максимальной крупности угольных частиц, которые сгорают полностью в доменной печи полезным объемом 1513 м<sup>3</sup> за время прохождения участка фурмы (300 мм) и окислительной зоны (1200 мм) без дополнительного расхода кислорода на сжигание ПУТ.

**Таблица 1** – Состав и свойства углей для приготовления ПУТ

Марка угля	Состав углей, %							$\dot{A}_{\dot{a}}^{\ddot{n}}$ , %	$\rho_y$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_C$ , кг/м <sup>3</sup>	$k_{\dot{e}.л}$	$k_{\dot{e}.л}$	$k_{\dot{e}.C}$	$k_{\dot{e}.C}$
	$C^p$	$H^p$	$O^p$	$N^p$	$S^p$	$W^p$	$A^p$							
А	86,6	2,25	0,85	1,20	1,00	0,50	7,60	8,03	1550	1460	-	-	1,63	1,1
Т	81,0	3,80	1,00	1,30	1,30	0,50	11,1	12,0	1385	1275	-	-	1,24	0,93
Г	70,2	5,20	9,20	2,50	0,30	0,50	12,1	14,7	1265	1041	0,82	1,42	1,03	0,80

Получены следующие значения размеров частиц: для антрацита (А) – 20 мкм; тощего угля (Т) – 24 мкм; газового угля (Г) – 29 мкм. Из этого следует, что антрацит необходимо подвергать дроблению до более мелких фракций, а газовые угли – до более крупных. С другой стороны, для печей большего объема с большей протяженностью окислительной зоны критические размеры угольной пыли должны пропорционально увеличиваться.

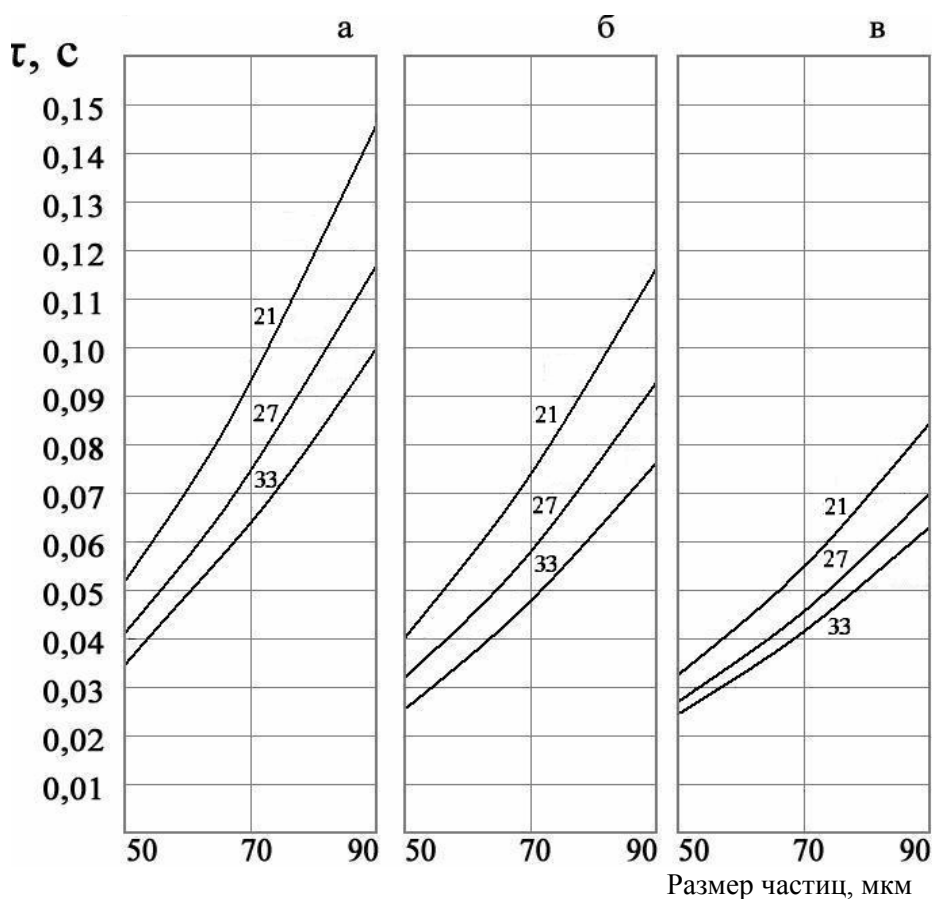


**Рисунок 2** – Гистограмма крупности ПУТ, вдуваемого в горн доменной печи

При вдувании ПУТ оптимальный гранулометрический состав соответствует содержанию фракции  $\leq 75$  мкм – не менее 70 %, остальное –  $< 85$  мкм (рис. 2), что значительно отличается от крупности частиц, полностью сгорающих в фурменной зоне доменной печи. Для полного сжигания угля такой крупности необходимо вместе с ПУТ подавать технический кислород. Обогащение дутья кислородом должно быть тем больше, чем крупнее частицы ПУТ.

Были проведены расчеты времени горения частиц углей марок А, Т и Г различной крупности с содержанием кислорода в газовой среде 21, 27 и 33 % (табл. 2).

По данным табл. 2 построены графики зависимости длительности сгорания частиц ПУТ от их диаметра (рис. 3). Видно, что с увеличением тонины помола углей при повышении содержания кислорода в окружающей газовой среде и повышении выхода летучих веществ угля длительность горения частиц сокращается. При обогащении дутья кислородом до величины 33 % длительность горения частицы ПУТ со средним начальным диаметром 50 мкм составляет (рис. 3): для угля марки А – 0,035 с; угля марки Т – 0,027 с; угля марки Г – 0,025 с. Полученные значения примерно равны времени прохождения частицы угольной пыли участка фурмы и фурменной зоны.



*а - уголь марки А; б - уголь марки Т; в - уголь марки Г  
цифры у кривых - содержание кислорода в дутье;  $T_2 = 2200$  К*

**Рисунок 3** – Зависимость длительности горения частиц углей от их размера:

Ввиду сложности обеспечения полного смешивания угольной пыли с дутьем целесообразно повышение концентрации кислорода в районе движения струи вдуваемого топлива. ПУТ рекомендуется вдувать в струю кислорода из расчета  $0,5 \text{ м}^3$  кислорода на его один килограмм с использованием концентрических форсунок с различной скоростью подачи кислорода и ПУТ, что будет способствовать образованию зоны, обогащенной кислородом перед наконечником форсунки [6].

Частицы, недогоревшие в фурменной зоне, могут газифицироваться за счет взаимодействия с оксидом железа шлака [7]. Возможно, увлечение некоторой части ПУТ циркуляционным потоком в горне доменной печи [8]. В этом случае наиболее крупные несгоревшие частицы угольной пыли будут сгорать полностью в момент прохождения области, обогащенной кислородом, вблизи торца фурмы.

Для полного сжигания ПУТ в доменной печи очень важным является выбор углей для вдувания. Чем выше содержание углерода, тем больше выделяется теплоты и выше коэффициент замещения кокса. В случае вдувания угля с низким содержанием летучих веществ в фурменной зоне сгорает на 10 % меньше угля по сравнению с углем с высоким содержанием летучих веществ [8]. Однако угли с высоким содержанием углерода (марки А и Т) сгорают хуже, чем угли с высоким выходом летучих веществ (рис. 3). Наилучшие показатели достигаются при вдувании в печь угольных смесей, содержащих до 60 % легковоспламеняемого угля (марка Г), остальное – высококалорийные угли (марки А, АС, Т), а при плохом качестве сырья в соотношении 80 : 20. Это обеспечивает высокие теплотворную способность смеси и коэффициент замены кокса, а также снижает температуру воспламенения смеси.

**Таблица 2** – Длительность горения частиц ПУТ

Марка угля	Содерж. O <sub>2</sub> , %	Крупность, мкм	Длительность стадий воспламенения и горения угля, с				Στ <sub>гор.</sub> , с
			τ <sub>в.л</sub>	τ <sub>г.л</sub>	τ <sub>в.С</sub>	τ <sub>г.С</sub>	
А	21	50	-	-	0,017	0,034	0,051
		70	-	-	0,026	0,067	0,093
		90	-	-	0,036	0,111	0,147
	27	50	-	-	0,015	0,026	0,041
		70	-	-	0,023	0,052	0,075
		90	-	-	0,032	0,086	0,118
	33	50	-	-	0,014	0,021	0,035
		70	-	-	0,021	0,043	0,064
		90	-	-	0,029	0,071	0,100
Т	21	50	-	-	0,012	0,028	0,040
		70	-	-	0,018	0,055	0,073
		90	-	-	0,024	0,091	0,115
	27	50	-	-	0,011	0,021	0,032
		70	-	-	0,016	0,043	0,059
		90	-	-	0,021	0,071	0,092
	33	50	-	-	0,009	0,018	0,027
		70	-	-	0,014	0,035	0,049
		90	-	-	0,019	0,058	0,077
Г	21	50	0,007	0,002	0,009	0,014	0,032
		70	0,009	0,003	0,014	0,029	0,055
		90	0,011	0,006	0,019	0,048	0,084
	27	50	0,007	0,002	0,008	0,011	0,028
		70	0,009	0,003	0,012	0,022	0,046
		90	0,011	0,006	0,016	0,037	0,070
	33	50	0,007	0,002	0,007	0,009	0,025
		70	0,009	0,003	0,011	0,018	0,041
		90	0,011	0,006	0,015	0,030	0,062

Для лучшего зажигания частиц пыли в горне доменной печи рекомендуют нагревать ПУТ доменным газом. При этом диоксид углерода, адсорбируясь на поверхности углей, образует углерод-кислородные комплексы, легко отделяемые при нагреве в полости фурмы. Это также будет способствовать внесению дополнительной теплоты в печь [9].

Интересна также динамика выгорания пылеугольного топлива. При введении ПУТ в канал фурмы имеет место быстрое выгорание мелких частиц топлива. Из-за этого крупным частицам, определяющим неполноту сгорания, приходится гореть в атмосфере, обедненной кислородом. Для устранения этого недостатка необходимо подбирать гранулометрический состав вдуваемых углей так, чтобы крупность минимальной и максимальной фракций отличалась незначительно.

*Выводы.*

1. Основным требованием к ПУТ-технологии является полная газификация угольных частиц в пределах фурменных зон доменной печи.

2. Проведенными расчетами определены максимальные значения размеров частиц: для угля марки А – 20 мкм; марки Т – 24 мкм; марки Г – 29 мкм, которые сгорают полностью на доменной печи полезным объемом 1513 м<sup>3</sup> при прохождении участков

фурменной и окислительной зон без дополнительного расхода кислорода. Из этого следует, что угли марки А необходимо дробить до более мелких фракций, а угли марки Г – до более крупных.

3. Установлено, что с увеличением тонины помола углей при повышении содержания кислорода в окружающей газовой среде от 21 до 33 % и повышении выхода летучих веществ угля длительность горения частиц уменьшается.

4. Максимальная эффективность вдувания ПУТ достигается при полной газификации частиц угля в фурменной зоне доменной печи. Поэтому главными требованиями к ПУТ-технологии являются:

- предварительный нагрев ПУТ доменным газом для раннего зажигания;
- работа на максимальной температуре дутья;
- подача ПУТ в струю кислорода с использованием концентрических форсунок, при обогащении дутья кислородом до 33 % из расчета  $0,5 \text{ м}^3 \Sigma \text{O}_2/\text{кг ПУТ}$ ;
- вдувание смесей углей, состоящих из 60 % легковоспламеняемой марки Г, остальное – 40 % высококалорийных марок (А, АС, Т). Первые обеспечивают раннее воспламенение смеси и ее прогрев, вторые – высокие теплотворную способность и коэффициент замены кокса;
- стабильный гранулометрический состав вдуваемого ПУТ с минимальной полидисперсностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы применения пылеугольного топлива в доменных цехах Украины и России / А. А. Минаев, А. Н. Рыженков, Ю. Г. Банников [и др.] // Сталь. – 2008. – № 2. – С. 5-11.
2. Лядский М. В. Экономическая эффективность использования пылеугольного топлива (ПУТ) в доменных цехах металлургических предприятий Украины / М. В. Лядский, З. К. Афанасьева, Т. А. Ивлева // Металл и литье Украины. – 2008. – № 11. – С. 8-9.
3. Фракционный состав пылеугольного топлива для доменных печей / В. Н. Андронов, А. И. Бабич, С. Л. Ярошевский [и др.] // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1988. – № 5. – С. 20-25.
4. Индивидуальная подача технологического кислорода в фурмы доменной печи / А. И. Бабич, В. В. Кочура, В. А. Ноздрачев [и др.] // Сталь. – 1991. – № 12. – С. 12-15.
5. Бабий В. И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В. И. Бабий, Ю. Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 208 с.
6. Лялюк В. П. Коксозамещающие технологии в доменной плавке / В. П. Лялюк, И. Г. Товаровский. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 276 с.
7. Ярошевский С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива / С. Л. Ярошевский. – М.: Металлургия. – 1988. – 176 с.
8. Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – 398 с.
9. Повышение эффективности работы доменной печи при вдувании ПУТ с применением стимуляторов горения / I. Sengupta, A. Kumar, S. Grosh [et al.] // AJSE Steel Tecknology. – 2000. – № 2. – С. 61-62 (Новости черной металлургии за рубежом. – 1999. – № 12. – С. 20-28).

Стаття надійшла до редакції 18.10.2010 р.  
Рецензент, проф. С.А. Воденніков