

нением различной природы топливных добавок дутью позволяет научное направление – системная надежность доменного производства.

### Библиографический список

1. Вдувание пылеугольного топлива в горн доменной печи / В. И. Логинов, Г. Г. Орешкин, И. Г. Половченко и др. // Сталь. – 1956. – № 8. – С. 675-682.
2. Применение в Украине технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива / В. И. Большаков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровськ.: ГЧМ НАН України. – 2011. – Вып. 23. – С. 30-36.
3. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, С. П. Сущев. – Днепродзержинск: ДГДУ, 2006. – 542 с.
4. Future Sources of Energy For Ironman king / W. C. Sieghardt, H. E. Harris, C. S. Finnelly // Blast Furnace and Steel Plant. 09. 1967. – P. 809-815.
5. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украи-

ны / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь и др. // Металл и литье Украины. – 2013. – № 10. – С. 5-10.

6. Тепловая работа и перспективные конструкции шахты и металлоприемника доменной печи при применении пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. В. Бородулин, А. Л. Чайка и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2014. – № 3. – С. 106-1107.

7. Эксергетический анализ энергоэффективности применения пылеугольного топлива в доменном производстве / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, А. А. Сохацкий, А. А. Москалина // Экология и промышленность. – 2014. – № 2. – С. 87-94.

8. Системная надежность доменного производства, опыт и перспективы освоения технологии доменной плавки с использованием пылеугольного топлива на Украине / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, Б. В. Корнилов, А. Г. Шевелев // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2014. – Вып. 28. – С. 16-31.

**Поступила 16.02.2015**



УДК 669.169

Наука

Тараканов А. К. /д. т. н./, Бочка В. В. /д. т. н./,  
Костомаров А. С.  
НМетаУ

Кариков С. А.  
ПАО «МК «АЗОВСТАЛЬ»

## Оптимизация параметров дутьевого режима доменной плавки

*Приведено теоретическое и практическое обоснование методики оптимизации дутьевого режима доменной плавки на основе комплексного расчетного анализа значений теоретической температуры горения топлива, объема фурменного газа и полной механической мощности фурменного газа. Ил. 4. Библиогр.: 3 назв.*

**Ключевые слова:** доменная технология, дутьевой режим, оптимизация параметров дутья

*Theoretical and practical grounding of optimization of the blast-furnace blast regime on the base of complex analysis of the theoretical fuel combustion temperature, volume rate of tuyere gas formation and tuyere gas complete mechanical power – is adduced.*

**Keywords:** blast-furnace technology, blast regime, optimization of the blast parameters

Выбор оптимальных технологических режимов доменной плавки требует согласованной оптимизации параметров загрузки и дутья. Критериями оптимизации при этом обычно являются производительность доменной печи и удельный расход кокса.

При взаимосвязанном подборе оптимальных режимов загрузки и дутья чаще всего ведущим фактором оптимизации выступает распределение материалов на колошнике. Именно оно, в первую очередь, определяет, с одной стороны, степень использования газа и, следовательно,

## ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

удельный расход кокса, а с другой стороны, – газопроницаемость столба шихты и, следовательно, возможность интенсификации плавки дутьем [1]. В этом случае используют обычно одну из двух целевых установок: либо минимальный расход кокса при обеспечении плановой производительности доменной печи, либо – максимальная производительность печи при расходе кокса не выше заданного.

При оптимизации параметров дутья чаще всего удается улучшать оба показателя технологической эффективности доменной плавки, но при этом приходится учитывать многообразное влияние процессов в фурменных очагах на работу доменной печи. Параметры фурменного газа определяют не только распределение газового потока вдоль радиуса печи, но также температурно-тепловой уровень плавки и газодинамику доменного процесса. Поэтому для обеспечения лучших технико-экономических показателей работы доменной печи необходимо поддерживать на оптимальном уровне значения комплекса обобщающих показателей дутьевого режима плавки.

Наши исследования показали [2], что необходимым и достаточным набором показателей дутьевого режима доменной плавки для целей оптимизации параметров дутья являются:

- теоретическая температура горения топлива в фурменных очагах;
- объем образующегося за минуту фурменного газа;
- полная механическая энергия (мощность) фурменного газа.

Попытаемся обосновать и подтвердить статистическими зависимостями методику комплексной оптимизации параметров дутья с использованием указанных обобщающих показателей дутьевого режима доменной плавки.

**Теоретическая температура горения топлива** (средняя расчетная температура газообразных продуктов горения топлива на выходе из фурменных очагов) рассчитывается как отношение прихода теплоты (суммы теплосодержания дутья, теплоты горения топлива и теплосодержания кокса, приходящего на фурмы) к произведению объема фурменного газа и его удельной теплоемкости. Формула для расчета теоретической температуры горения топлива ( $T_T$ ) по контролируемым параметрам дутья имеет вид:

$$T_T = \frac{1700Q_{nz} + 10521,19 \left( Q_d - Q_{nz} \left( 0,5 + \frac{1-O_2}{2O_2} \right) \right) O_2 + 1,4Q_d t_d + 2340 \left( Q_d - Q_{nz} \left( 0,5 + \frac{1-O_2}{2O_2} \right) \right) O_2 - 10806Q_d \phi + 4910m_{ПУТ} 0,1 / L}{1,5 \left( \left( 3 + \frac{1-O_2}{2O_2} \right) Q_{nz} + \left( 2 + \frac{1-O_2}{O_2} \right) \left( Q_d - Q_{nz} \left( 0,5 + \frac{1-O_2}{2O_2} \right) \right) + 1,5Q_d \phi + 0,01c_{шл} A_{ПУТ} 0,001 \right)}, ^\circ C,$$

где  $t_d$  – температура дутья,  $^\circ C$ ;  $O_2$  и  $\phi$  – содержание кислорода и влаги в дутье, доли единиц;

$Q_{nz}$  и  $Q_d$  – расходы природного газа и дутья,  $нм^3/с$ ;  $m_{ПУТ}$  – расход пылеугольного топлива,  $кг/т$  чугуна;  $L_{ПУТ}$  – коэффициент летучих ПУТ: от 1 – для антрацита и до 1,3 – для газового угля;  $A_{ПУТ}$  – средняя зольность ПУТ, %;  $c_{шл}$  – удельная теплоемкость шлака,  $кДж/кг \cdot ^\circ C$ .

Естественно, расчетная температура отличается от реальной температуры газа, покидающей окислительную зону фурменного очага. Есть факторы, которые повышают эту температуру (в основном – это частичное горение чугуна, попадающего в кислородную зону), и есть факторы, понижающие температуру газа за счет частичного усвоения теплоты газа жидкими продуктами плавки. Сколько-нибудь точно учесть эти факторы невозможно, поэтому именно теоретическая температура горения топлива в доменной печи является единственным общепотребимым показателем дутьевого режима плавки, который связан с температурно-тепловым уровнем доменного процесса.

К сожалению, на многих заводах теоретическую температуру горения топлива в фурменных очагах рассчитывают по приближенным формулам, например, – по эмпирической формуле [3], которая иногда, особенно при низких расходах кислорода, дает завышенные значения и психологически удерживает технологов от рационального повышения  $T_T$ .

В подходах к выбору оптимального значения теоретической температуры горения однозначности нет. Указывают обычно достаточно широкий диапазон допустимых значений этого параметра (от  $1900^\circ C$  до  $2200^\circ C$ ), не уточняя, как связан выбор значения теоретической температуры горения с целевыми установками ведения доменной плавки.

Для повышения экономичности плавки, связанной со снижением удельного расхода топлива, теоретическую температуру желательно поддерживать на возможно более высоком уровне. Расход кокса определяется из теплового баланса нижней ступени теплообмена. Чем выше исходная температура фурменного газа, тем больше приходная часть этого баланса, хотя на количественном уровне прямая пропорциональность здесь отсутствует из-за возможного при обогащении дутья кислородом сокращения удельного выхода фурменного газа на единицу чугуна. Неизбежное во всех случаях, в первую оче-

редь, из-за сокращения удельного расхода кокса уменьшение удельной величины расхода по-

тока газа в печи понижает (примерно на 50 % от повышения температуры фурменного газа) температурную границу между нижней и верхней ступенями теплообмена, что дополнительно увеличивает количество теплоты газового потока, которое усваивается в нижней ступени теплообмена.

Существуют и некоторые отрицательные последствия повышения температуры фурменного газа для теплового баланса нижней зоны доменной печи. Сокращение удельного выхода газа и понижение температур в шахте печи тормозят в какой-то мере косвенное восстановление и способствуют увеличению степени прямого восстановления железа. Интенсифицируется также нежелательное восстановление кремния в прифурменной области. Таким образом, зависимость расхода кокса от теоретической температуры горения топлива в целом может быть экстремальной. Оптимальное значение  $T_T$  можно установить в результате статистических исследований на конкретной доменной печи. Но практически, особенно при работе с вдуванием топливных добавок, этот оптимум почти никогда не достигается, и это в большинстве случаев – резерв снижения суммарного расхода топлива.

Необходимо учитывать, что повышение  $T_T$  увеличивает реальный объем и скорость движения газа в нижней части печи. Если эта зона является лимитирующей по газодинамике, значительное повышение температуры фурменного газа может привести к снижению производительности печи. В связи с этим важным обобщающим показателем дутьевого режима плавки является **объем образующегося за минуту фурменного газа** ( $V_{фз}$ ) при температуре  $T_T$  и давлении дутья  $P_d$ :

$$V_{фз} = \{Q_d[1 + (1 - \phi_d)\omega + \phi_d] + 2,05Q_{не}\} \frac{0,1(T_T + 273)}{273(0,1 + P_d)}, \text{ м}^3/\text{мин},$$

где  $P_d$  – давление дутья, МПа.

Оптимальное значение этой величины должно согласовываться с требуемой производительностью доменной печи и не должно превышать критического предела, связанного с возникновением неровного хода печи.

Наиболее проблемным является обоснование комплексного показателя, который позволял бы оценивать степень проникновения газового потока к центру печи. Эта степень связана, главным образом, с наличием и размерами разрыхленной зоны перед фурмами. Размеры разрыхленной зоны зависят не только от кинетической энергии струи дутья, но и от энергии давления и расширения фурменного газа в результате горения топлива.

**Полная механическая энергия (мощность) фурменного газа** ( $E_{фз}$ ) может оцениваться как

сумма кинетической энергии (мощности) струи дутья и термодинамической работы изменения за 1 секунду объема газа в фурменном очаге:

$$E_{фз} = \frac{Q_d(1,251 + 178\omega) + 0,782Q_{не}}{4237920n^3 \cdot f^2} \times \left[ (Q_d + Q_{не}) \frac{0,1(t_d + 273)}{273(0,1 + P_d)} \right]^2 + P_d \frac{V_{фзс} - V_{дс}}{n}, \text{ Вт},$$

где  $f$  – площадь свободного сечения воздушной фурмы,  $\text{м}^2$ ;  $P_d$  – давление дутья, принимаемое за среднее давление газа в фурменном очаге,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $V_{фзс}$  – объем образующегося за 1 секунду фурменного газа при температуре  $T_T$  и давлении  $P_d$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $V_{дс}$  – секундный объем дутья, вдуваемого в печь при  $t_d$  и  $P_d$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $n$  – число воздушных фурм.

Осуществлять расчет обобщающих показателей дутьевого режима плавки по заданным значениям параметров дутья и решать задачу корректировки параметров дутья для поддержания на оптимальном уровне значений комплекса обобщающих показателей – удобнее всего при использовании разработанной в НМетАУ диалоговой системы «Дутье» [1]. Главной проблемой при этом остается определение наиболее рациональных значений  $T_T$ ,  $V_{фз}$  и  $E_{фз}$  для конкретных условий доменной плавки, что возможно только в результате статистических исследований.

Статистический анализ среднемесячных показателей работы доменных печей большинства металлургических предприятий Украины показал, что минимальный удельный расход кокса и максимальная производительность печей достигались при самых высоких значениях теоретической температуры горения топлива  $T_T$  и полной механической энергии фурменного газа  $E_{фз}$  – независимо от причины увеличения значений этих обобщающих показателей дутьевого режима плавки.

Например, для доменной печи № 2 «Азовстали» (рис. 1, 2) статистические связи производительности печи и удельного расхода кокса с теоретической температурой горения топлива оказались в целом идентичными аналогичным связям для доменной печи № 2 ДМЗ им. Петровского, несмотря на то, что на «Азовстали»  $T_T$  менялась в наибольшей степени в результате изменения концентрации кислорода в дутье (корреляционное отношение  $R = 0,91$ ), а на заводе им. Петровского – в результате изменения влажности дутья ( $R = 0,73$ ), а эти два параметра дутья влияют на  $T_T$  противоположно. Естественно, преимущественная причина изменения  $T_T$  статистически влияет на количественную связь производи-

## ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

тельности печи (П) с величиной  $T_T$ . При увеличении  $T_T$  на  $100^\circ\text{C}$  П увеличивалась на «Азовстали» в среднем на 18 %, а на заводе им. Петровского – на 14 %.

Аналогично, почти идентичным для двух указанных печей был характер связи удельного расхода кокса с  $T_T$ , хотя количественно эти связи закономерно отличались. Увеличение  $T_T$  на  $100^\circ\text{C}$  снижало удельный расход кокса на «Азовстали» в среднем на 5 %, а на заводе им. Петровского – на 7 %.

Влияние полной механической энергии фурменного газа  $E_{фг}$  на производительность доменной печи и на удельный расход кокса показано в качестве примера для той же доменной печи «Азовстали» на рис. 3 и 4. Здесь идентичность данных зависимостей для разных доменных печей вполне закономерна, так как  $E_{фг}$  преимущественно зависит от расхода дутья (для доменной печи «Азовстали»  $R = 0,93$ , а для доменной печи завода им. Петровского  $R = 0,97$ ).

Следует учитывать, что доля кинетической мощности струи дутья в полной механической

мощности фурменного газа составляет для разных условий плавки всего от 3 до 8 %, и именно термодинамическая работа расширения газа в фурменном очаге при горении топлива, хотя она и направлена во все стороны, в наибольшей степени определяет размеры разрыхленной зоны перед фурмами и способность газа проникать к центру печи. Поэтому равномерность распределения газового потока в печи в значительной мере зависит от теоретической температуры  $T_T$ , которая непосредственно влияет на реальный объем фурменного газа и величину термодинамической работы расширения газа. Более равномерное распределение газа в печи при росте  $T_T$  дополнительно снижает расход кокса.

Параметры дутьевого режима плавки существенно зависят от давления дутья, которое почти функционально связано с давлением колошниковога газа. Среди доменщиков в последнее время вопрос о необходимости поддержания на максимально высоком уровне давления колошниковога стал, почему-то, дискуссионным.

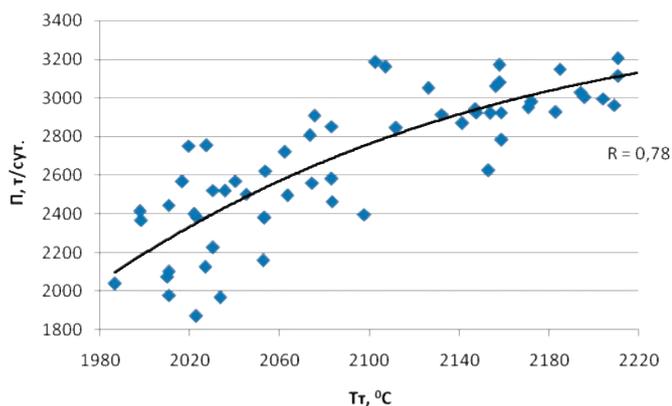


Рис. 1. Зависимость производительности доменной печи от теоретической температуры горения топлива для ДП № 2 «Азовстали»

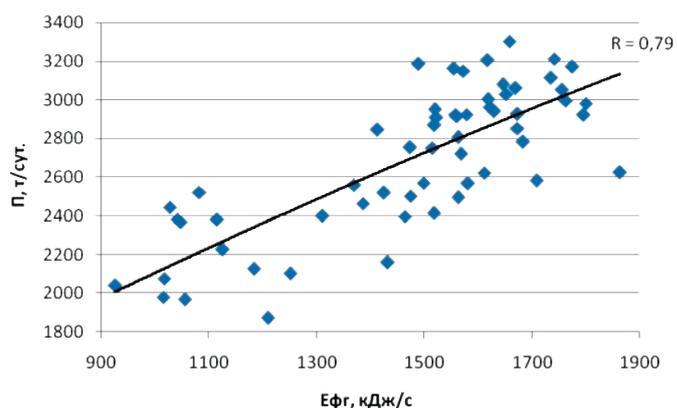


Рис. 3. Зависимость производительности доменной печи от полной механической энергии (мощности) фурменного газа для ДП № 2 «Азовстали»

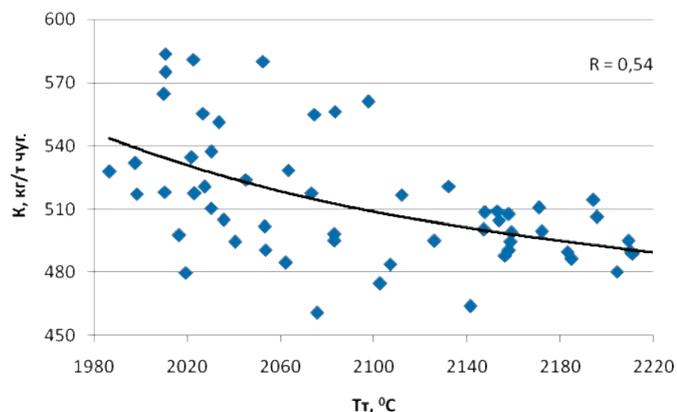


Рис. 2. Зависимость расхода кокса на тонну чугуна от теоретической температуры горения топлива для ДП № 2 «Азовстали»

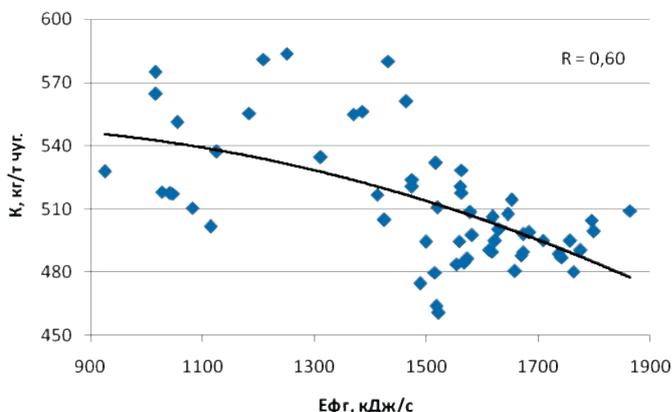


Рис. 4. Зависимость расхода кокса на тонну чугуна от полной механической энергии (мощности) фурменного газа для ДП № 2 «Азовстали»

Не имея порой возможности активизировать центральную зону печи путем изменения распределения материалов на колошнике, доменщики на практике иногда прибегают к мерам, которые могут способствовать увеличению кинетической энергии струи дутья, а именно – к закрытию части фурм, к уменьшению диаметра фурм и к понижению давления колошниково-го газа.

Оставив за пределами данной статьи проблему оптимизации числа и диаметра фурм, проясним влияние давления колошниково-го газа на параметры доменной плавки.

Статистика на больших массивах данных подтверждает однозначную и достаточно тесную положительную связь массового расхода дутья и давления колошниково-го газа, что совершенно естественно, так как теперь уже практически нигде используемое повышенное давление колошниково-го газа не ограничивает в соответствии с характеристиками воздуходувок расхода дутья. Влияние расхода дутья оказывается преобладающим, поэтому кинетическая энергия струи дутья с уменьшением давления колошниково-го газа почти всегда статистически надежно снижается. Энергия расширения фурменного газа, пропорциональная давлению дутья, также однозначно уменьшается с уменьшением давления на колошнике. Поэтому мнение о том, что, снижая давление газа на колошнике, можно усилить газовый поток в центре печи, в целом не может считаться оправданным.

#### Выводы

Совершенствование дутьевого режима доменной плавки необходимо осуществлять, ори-

ентируясь на максимально возможное увеличение теоретической температуры горения топлива в фурменных очагах и полной механической энергии фурменного газа, не допуская при этом появления признаков неровного хода печи.

При текущих корректировках параметров дутья рационально поддерживать на экспериментально установленном оптимальном уровне значения комплекса обобщающих показателей дутьевого режима плавки, решая поисковую задачу с использованием диалоговой системы «Дутье».

Применять понижение давления газа на колошнике с целью активизации центральной зоны доменной печи не рационально.

#### Библиографический список

1. Тонких Д. А., Тараканов А. К., Костомаров А. С. Совершенствование режимов загрузки шихты и дутья на доменных печах ПАО «МК «Азовсталь» // *Металлург.* – 2013. – № 9. – С. 25-28.
2. Тараканов А. К., Лялюк В. П., Костомаров А. С. Выбор на доменных печах рациональных значений параметров дутья на основе расчетного контроля обобщающих показателей дутьевого режима плавки // *A collective monograph «XIII International Scientific Conference: New technologies and achievements in metallurgy».* – № 24. – Chestohova, Poland, 2012. – P. 181-185.
3. Волков Ю. П., Шпарбер Л. Я., Гусаров А. К. *Технолог-доменщик: справочник.* – М.: *Металлургия*, 1986. – 263 с.

*Поступила 27.01.2015*

