

УДК 669.162.2:662.74.001.5

Н.М.Можаренко, А.А.Параносенков, Н.М.Загоровская

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ГОРЕНИЯ КОКСА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Исследовано влияние распределения газового потока по окружности печи на газодинамические условия горения кокса в доменной печи. Показано улучшение диффузионных условий горения при вдувании природного газа.

Цель работы. Определяющее влияние на горение кокса в доменной печи принадлежит газодинамическим условиям, что связано с диффузионным режимом окисления углерода топлива. Скорость газового потока и число Рейнольдса в расчете по зависимости работы [1] определяются приближенно и зависят от газодинамических условий работы доменной печи. С целью изучения газодинамических условий области горения был проведен расчет числа Рейнольдса газо–воздушной смеси при ее истечении из фурм доменной печи №9 (ДП-9) ОАО «Криворожсталь» за 31.08.2005.

Методика исследования. Рассчитывали число Рейнольдса по фурмам по данным подсистемы «Контроль распределения дутья и природного газа по фурмам» [2]. Действительный расход дутья и газа определяли по уравнениям работы [3], плотность смеси рассчитывался с учетом плотности влаги по зависимостям работы [4], динамическая вязкость газо–воздушной смеси находилась без учета влаги дутья по данным работ [4, 5].

По результатам расчета среднее значение числа Рейнольдса истечения газо–воздушной смеси по фурмам составило 611 098 ед., при среднеквадратичном отклонении – 96 467 ед. Наибольшее значение составило 786 406 ед., наименьшее – 311 875 ед. Как следует из результатов, режим истечения газо–воздушной смеси после выхода из фурмы является турбулентным, с высоким значением числа Рейнольдса. При этом данное число находится в функциональной зависимости от расхода горячего дутья по фурмам, рис.1.

После подстановки значения числа Рейнольдса в зависимость определения коэффициента переноса окислителя через пограничный слой, то его среднее было равным 0,4 м/с. Если подставить это значение в расчет по уравнению работы [1], то данный коэффициент совпадет с константой скорости химической реакции k при температуре 900⁰С, что в точности совпадает с результатами расчета этой работы. Следовательно, в этой работе рассчитывалось число Рейнольдса для истечения газо–воздушной смеси из фурм доменной печи.

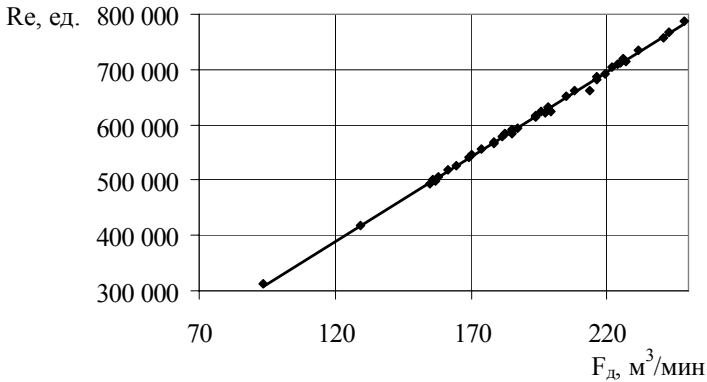


Рис.1. Зависимость числа Рейнольдса (Re) от расхода дутья по фурмам (F_д) доменной печи №9 ОАО «Криворожсталь» 31.08.2005

Однако кинетическая энергия газо–воздушной смеси на выходе из фурмы доменной печи создает коксовую полость или значительное разрыхление, в которых горение топлива происходит на внешней поверхности. При этом скорость газового потока и его число Рейнольдса в зоне горения топлива может существенно отличаться от фурменных, так как в фурменном очаге происходит падение давления за счет гидравлического сопротивления и противодействия потока шихтовых материалов.

Кроме того, по результатам работы [6], в фурменном очаге существуют противоточная и вихреобразная (неустойчивая) области горения кокса, рис.2, газодинамические условия в которых различны.

Выбранное название областей горения кокса связано с особенностью встречи газового и коксового потоков. Так, в вихреобразной области поступление кокса в зону горения в основном осуществляется при обрушении шихтового свода, и горение топлива происходит в потоке газо–воздушной смеси. Для обрушения коксового свода необходимо преодоление силы сопротивления газового потока.

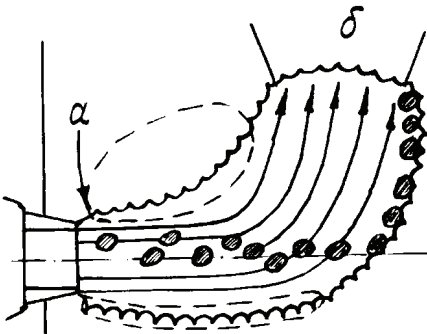


Рис.2. Вид фурменного очага: а – вихреобразная область горения кокса, б – противоточная область расхода кокса

В общем случае силу сопротивления среды движущемуся телу можно выразить формулой Ньютона [7]:

$$P = c \cdot F \cdot \omega^2 \cdot \rho = \lambda \cdot F \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2}, \quad (1)$$

где $c = \frac{\lambda}{2}$ – коэффициент, зависящий от характера движения, ед.;

F – площадь проекции тела, перпендикулярной направлению движения, м²;

ω – скорость твердого тела относительно среды (газа или жидкости) или, наоборот, скорость среды по отношению к телу, м/с;

ρ – плотность жидкости (газа), кг/м³.

При расчете режима движения газа по отношению к отдельному куску кокса из вихреобразной области использовали результаты предыдущих расчетов, диаметр куска кокса был принят 0,035 м. Среднее значение числа Рейнольдса было равным 142 590 ед., что является показателем турбулентной области движения газа.

Для расчета силы сопротивления газового потока отдельному куску кокса из вихреобразной области брали скорость газо–воздушной смеси на выходе из фурмы. Сопротивление определялось по закону Стокса для частиц шаровидной формы [0]:

$$P = 0,173 \cdot d^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho, \quad (2)$$

где d – диаметр куска кокса, м.

Полученное среднее значение силы сопротивления было равным 6,3 Н. В то же время сила тяжести шарообразного куска кокса при плотности равной 0,8 кг/м³ составляет 0,00018 Н. Следовательно, сила сопротивления газового потока отдельному куску кокса на выходе из фурмы значительно больше его силе тяжести, что делает невозможным его проникновение в поток газа. Попадание кусков кокса в газовый поток возможно лишь при обрушении коксового свода, обладающего большей силой тяжести.

Изложение основных материалов исследования. Для определения сопротивления газового потока отдельному куску кокса на участке фурма – противоточная область горения кокса следует рассмотреть фурму и фурменный очаг как единую газодинамическую систему. При этом ее гидравлическое сопротивление будет состоять из потери напора на удар при внезапном расширении потока газо–воздушной смеси на выходе из фурмы. Особенностью данного местного сопротивления является значительное уменьшение скорости потока. Коэффициент местного сопротивления на удар при внезапном расширении потока (отнесенный к скоростному напору в узком сечении) равен [7]:

$$\xi = \left(1 - \frac{f}{F}\right)^2, \quad (3)$$

где: f – площадь узкого поперечного сечения, м²;

F – площадь широкого поперечного сечения, м².

Как следует из зависимости (3), коэффициент местного сопротивления на удар снижается при увеличении площади узкого и уменьшении площади широкого поперечных сечений.

При расчете потери напора на удар при выходе газо–воздушной смеси из фурмы доменной печи брались данные предыдущих расчетов. Площадь узкого поперечного сечения равнялась сечению фурмы. Диаметр широкого поперечного сечения определялся двумя способами: как расстояние между двумя соседними фурмами; – как ширина фурменного очага.

При расчете не учитывалось всасывание печного газа в зону горения, так называемое явление инжекции, и изменение свойств газа.

Коэффициент местного сопротивления на удар в первом случае был равен 0,946 ед., среднее значение данного коэффициента во втором случае составило 0,936 ед. Относительная погрешность потери скоростного напора между средними расчетными значениями по двум способам составила –0,83%. На основании результатов расчета можно сделать следующие выводы:

- при рассмотрении фурмы и зоны горения как газодинамической системы на выходе газового потока из фурмы происходит значительная потеря давления на удар;
- потери давления на удар зависят от расстояния между двумя соседними фурмами, которое определяет диаметр широкого поперечного сечения;
- при увеличении количества фурм на доменной печи снижаются потери давления газового потока на удар при выходе из фурмы;
- потеря напора газо–воздушной смеси на удар влияет на ширину фурменного очага.

По результатам расчета, среднее значение силы сопротивления газового потока куску кокса составило 0,53 Н, что превышает его силу тяжести в 2 997 раз. Следовательно, проникновение отдельных кусков кокса в газовый поток крайне затруднительно даже после гидравлических потерь напора на удар.

Итерационным способом в среде Microsoft Excel было найдено значение диаметра шаровидной частицы кокса, при которой обеспечивается равенство силы сопротивления газового потока движению частицы и силы ее тяжести. Для фурмы №15 ДП-9, сила сопротивления газового потока которой была наиболее приближена к среднему значению, величина диаметра частицы было равным 0,30 мм. Следовательно, в результате собственной силы тяжести коксовая пыль, размером менее и равной 0,30 мм, внедряется в поток фурменного газа, где происходит ее сжигание.

При увеличении диаметра куска кокса будет изменяться сила тяжести и сила сопротивления в различной степени. Для шарообразного куска кокса увеличение диаметра приведет к большему увеличению силы сопротивления газового потока. К тому же для крупных кусков следует вво-

дить поправочный коэффициент ψ к значению величины λ на форму, что еще более увеличит силу сопротивления газового потока в несколько раз (табл.1), [7].

Таблица 1. Значение поправочного коэффициента на форму твердого тела к определению силы сопротивления среды его движению

№ п/п	Форма частицы	Поправочный коэффициент ψ к значению λ
1	Шаровая	1,0
2	Округленная с неровной поверхностью	2,4
3	Продолговатая	3,0
4	Пластинчатая	5,0
5	Усредненная (для смешанных тел)	2,9

По результатам расчета и из вышесказанного можно сделать вывод, что кокс из свода в вихреобразной области фурменного очага не в состоянии под собственной силой тяжести проринкнуться в газовый поток, и даже если рассматривать коксовый свод как систему, то преодоление силы сопротивления газового потока движению твердого тела все равно крайне затруднительно.

В этой связи причинами обрушения коксового свода вихреобразной области фурменного очага, очевидно, являются давление столба шихтовых материалов над сводом и изменение расхода дутья по фурмам. К силе тяжести коксового свода, расположенного непосредственно над зоной горения, добавляется сила тяжести шихты, состоящей из коксового слоя со стекающими через него расплавами. Верхней пределом данного слоя кокса можно рассматривать нижнюю границу области вязко–пластичного состояния материалов. Это связано с тем, что железорудные материалы в вязко–пластичном состоянии обладают значительной силой когезии и адгезии, удерживающей шихту.

Поэтому для расчета давления шихты на коксовый свод верхним краем взаимодействующих материалов можно принимать область распара. У доменной печи №9 высота заплечиков составляет 3290мм, от оси воздушных фурм до границы горна и заплечиков – 500мм. Как следует из рис.2, область вихреобразного движения кокса составляет половину длины фурменного очага, а его сечение, очевидно, представляет из себя равнобочную трапецию. При расчете площади равнобочной трапеции по математическим зависимостям [8] было получено ее среднее значение 0,36м².

Допускаем, что на коксовый свод оказывает давление объем кокса, равный произведению площади равнобочной трапеции и высоты между фурменным очагом и нижней границей распара доменной печи. Кроме того, через коксовый слой стекают чугун и шлак, увеличивая силу тяжести шихтовых материалов. Как приведено в работе [9], непосредственно

перед фурмой стекает поток расплава со скоростью 20–40 г/с, который распыляется дутьем, подвергается интенсивному окислению и отбрасывается к оси печи. Следовательно, можно принять в расчетах, что в объеме параллелепипеда со сторонами 0,25 м, 0,25 м и 0,30 м (объем непосредственно перед фурмой) находится расплав массой 0,03 кг. Тогда среднее значение силы тяжести шихтовых материалов будет 37,7 Н, что в 2,58 раза превышает силу сопротивления газового потока движению кокса диаметром 0,035 м с учетом поправочного коэффициента ψ для округленных частиц с неровной поверхностью.

Однако если внести в расчет значение поправочного коэффициента ψ для продолговатых частиц, количество расплавов массой 0,02 кг и высоту шихтовых материалов, уменьшенную на половину (что может быть результатом не вертикального движения материалов), то отношение силы тяжести шихты к силе сопротивления будет равным 0,80 ед. Следовательно, периодичность обрушения коксового свода при постоянстве газодинамических условий зависит от формы кусков кокса, высоты и вектора движения коксового слоя над фурменным очагом и количества в нем расплавов.

После попадания в фурменный очаг куски кокса из-за относительно малой силы тяжести по сравнению с силой сопротивления газового потока их движению увлекаются потоком газа, рис. 2. Более крупные куски измельчаются благодаря удару и трению о плотный граничный слой кокса, что приводит к засорению горна со всеми вытекающими от этого последствиями [10]. Учитывая также то, что при обрушении коксового свода происходит потеря напора газового потока, следует признать более благоприятным в газодинамическом отношении горение кокса в противоточной области.

Сила газового потока сообщает попавшему в фурменный очаг куску кокса ускорение. Тогда по оси ОХ можно составить уравнение:

$$F_{\text{гп}} = m_{\text{к}} \cdot a_{\text{к}}, \quad (4)$$

где: $F_{\text{гп}}$ – сила газового потока, Н;

$m_{\text{к}}$ – масса частицы кокса, кг;

$a_{\text{к}}$ – ускорение частицы кокса, м/с².

Учитывая то, что силу газового потока, действующего на частицу, можно найти из зависимости (2), и преобразуя уравнение (4) относительно скорости частицы кокса, получим:

$$v_{\text{к}} = 0,813 \cdot v_{\text{г}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{к}}}}, \quad (5)$$

где: $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³;

$\rho_{\text{к}}$ – плотность кокса, кг/м³.

Как следует из зависимости (5), скорость куска (частицы) кокса определяется скоростью газового потока и отношением плотностей газа и кок-

са. Среднее значение частицы кокса эквивалентным диаметром 0,023 м было равным 180 м/с, что на 4 м/с менее скорости газового потока.

С учетом этого, при подстановке значений скорости и числа Рейнольдса в зависимость скорости горения углерода кокса [1], были получены следующие температуры: 613⁰С – температура равенства скоростей химической реакции горения и переноса кислорода к поверхности взаимодействия; 956⁰С – температура превышения скорости химической реакции горения над скоростью переноса кислорода к поверхности взаимодействия в 100 раз. Следовательно, учитывая потерю напора дутья на удар на выходе из фурмы, горение кокса в вихреобразной области горения протекает в диффузионной или внешнедиффузионной области взаимодействия. Увеличение скорости горения может быть достигнуто путем ускорения переноса кислорода к поверхности взаимодействия.

Расписав зависимость определения коэффициента переноса окислителя к поверхности взаимодействия, получим:

$$\beta = \frac{0,031 \cdot v^{0,8} \cdot \mu^{0,2}}{d^{0,2} \cdot \rho_2^{0,2}}, \quad (6)$$

где: μ – динамическая вязкость газа, Па·с;

d – диаметр сечения потока газа, м.

Как следует из зависимости (6) увеличение скорости горения может быть достигнуто путем увеличения скорости и динамической вязкости газа, снижения его плотности, а также уменьшения диаметра сечения газового потока.

В области противоточного горения кокса существуют следующие условия:

- газовый поток, направленный вертикально вверх, удерживает слой кокса во взвешенном состоянии;
- периодически происходит обрушения коксового свода при уменьшении колебаний давления газа;
- при обрушении коксового свода некоторое время горение топлива происходит как слоевое;
- скоростной напор газового потока значительно ослаблен;
- температура газа снижается за счет расширения объема, разложения природного газа и всасывания печной среды. Одновременно увеличивает температуру фурменных газов горение кокса и газа, окисления чугуна и шлака;
- диаметр разрыхленного слоя кокса меньше чем в вихреобразной области горения.

При расчете для условий противоточной области горения по зависимости скорости горения углерода были получены следующие температуры: 838⁰С – температура равенства скоростей химической реакции горения и переноса кислорода к поверхности взаимодействия; 1437⁰С – температура превышения скорости химической реакции горения над скоро-

стью переноса кислорода к поверхности взаимодействия в 100 раз. Следовательно, для данной области горения скорость взаимодействия протекает в диффузионной или внешнедиффузионной области, при этом взаимодействие в большей мере зависит от температуры. Кроме того, согласно расчетам скорость химического взаимодействия во второй области горения в 28 раз больше, чем в первой.

Изменение расхода природного газа относительно расхода дутья будет различным образом изменять отношение скоростей химического взаимодействия в данных областях горения. Первоочередной задачей вдувания природного газа в фурмы является уменьшение степени его недожога. При разложении газа затрачивается значительное количество теплоты, уменьшая общий тепловой уровень фурменного очага.

Увеличение расхода дутья и природного газа по фурмам должно приводить к снижению количества кокса (при увеличении скорости его горения), сгорающего в вихреобразной области. Причина заключается в меньшем превышении силы тяжести шихтовых материалов при этом к силе сопротивления газового потока движению твердых тел, рис.3-4.

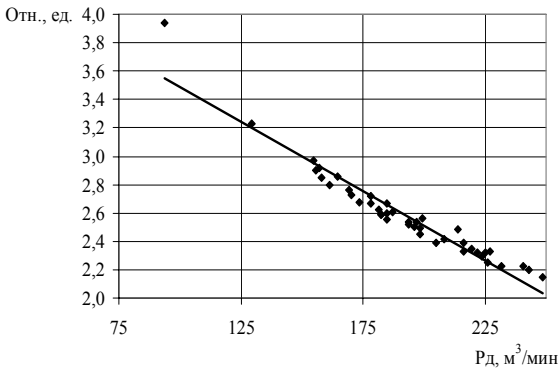


Рис.3. Влияние действительного расхода дутья по фурмам (Рд) ДП №9 на отношение силы тяжести шихтовых материалов к силе опротивления газового потока движению твердых тел (Отн.)

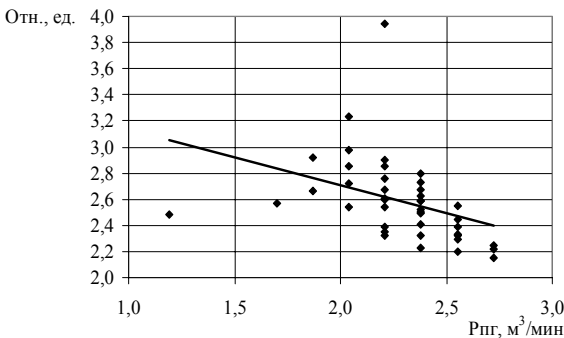


Рис.4. Влияние действительного расхода природного газа по фурмам (Рпг) ДП №9 на отношение силы тяжести шихтовых материалов к силе сопротивления газового потока движению твердых тел (Отн.)

В то же время увеличивается количество и скорость горения кокса, сгорающего в противоточной области. Учитывая то, что следует стремиться к увеличению количества сгорающего кокса в противоточной области, то увеличение расхода природного газа на фурмах с увеличенным расходом дутья (общепринятый прием) приводит к расширению противоточной области горения и увеличению в ней скорости взаимодействия кокса и окислителя.

Поддержание на фурмах равномерного отношения природного газа к дутью, что считается наилучшим при существовании измерения распределения дутья по фурмам, будет приводить к сохранению неравномерности газодинамических условий горения по окружности доменной печи, если при согласованных расходах газа с дутьем по фурмам первичная неравномерность распределения дутья существенно не изменится.

Таким образом, существует возможность управления скоростью горения кокса в доменной печи за счет изменения расходов природного газа по фурмам. Однако данное управление основывается на газодинамических условиях горения кокса в фурменном очаге, а не на стехиометрических уравнениях окисления углерода кокса и природного газа.

Выводы.

1. В фурменном очаге существуют две различные по газодинамическим условиям области горения кокса: вихреобразная и противоточная.
2. Сила сопротивления газового потока отдельному куску кокса на выходе из фурмы значительно больше его силе тяжести, что делает невозможным его проникновение в поток газа. Попадание кокса в газовый поток возможно лишь при обрушении коксового свода, обладающего большей силой тяжести.
3. При рассмотрении фурмы и зоны горения как газодинамической системы на выходе газового потока из фурмы происходит значительная потеря давления на удар, которая зависит от расстояния между двумя соседними фурмами.
4. При увеличении количества фурм на доменной печи снижаются потери давления газового потока на удар при выходе из фурмы, которые также влияют на ширину фурменного очага.
5. Проникновение отдельных кусков кокса в газовый поток крайне затруднительно даже после гидравлических потерь напора на удар.
6. Периодичность обрушения коксового свода при постоянстве газодинамических условий зависит от формы кусков кокса, высоты и вектора движения коксового слоя над фурменным очагом и количества в нем расплавов.
7. Более благоприятным в газодинамическом отношении является горение кокса в противоточной области.
8. Скорость движения частицы кокса в газовом потоке определяется скоростью газового потока и отношением плотностей газа и кокса.

9. Учитывая потерю напора дутья на удар на выходе из фурмы, горение кокса в вихреобразной области горения протекает в диффузионной или внешнедиффузионной области взаимодействия.
10. Увеличение скорости горения кокса в вихреобразной области фурменного очага может быть достигнуто путем увеличения скорости и динамической вязкости газа, снижения его плотности, а также уменьшения диаметра сечения газового потока.
11. В противоточной области горения скорость взаимодействия также протекает в диффузионной или внешнедиффузионной области взаимодействия, но в большей мере зависит от температуры и протекает, согласно расчетам, в 28 раз быстрее.
12. Согласование расхода природного газа с распределением дутья по фурмам должно приводить к благоприятному расширению противоточной области горения и увеличения в ней скорости взаимодействия кокса и окислителя.
13. При согласовании расходов природного газа с распределением дутья по фурмам возникает возможность управления скоростью горения кокса в доменной печи за счет изменения расходов природного газа по фурмам.

1. *Чернов Н.Н.* Кинетические закономерности процесса горения углерода в доменной печи // *Металлургия и коксохимия*. – Выпуск 5. – Харьков: Изд. Харьковского университета, 1970. – 248 с.
2. *Автоматизированная система контроля расхода дутья по воздушным фурмам доменной печи* / Н.М. Можаренко, В.В. Канаев, А.А. Параносенков и др. // *Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Ст.научн.тр. ИЧМ. – Вып. 11. – 2005. – С.34-42.
3. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
4. *Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – М.: Химия, 1981. – 560 с.
5. *Бретшнайдер Ст.* Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета – М.: Химия, 1966. – 535 с.
6. *Исследование движения материалов в области фурм доменной печи с помощью эндоскопа* / М. Гройель, Ф.В. Хильнхюттер, Х. Кистер, Б. Крюгер // *Черные металлы*. – 1974.– № 12.– С.9–15.
7. *Гордон Г.М., Пейсахов И.Л.* Пылеулавливание и очистка газов. – М.: Металлургия, 1968. – 499 с.
8. *Рывкин А.А., Рывкин А.З., Хренов Л.С.* Справочник по математике: справочное пособие для учащихся сред. спец. заведений и поступающих в вузы. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 480с.
9. *Доменное производство*. Том 1. Подготовка руд и доменный процесс. Справочник. / Под ред. Вегмана Е.Ф. – М: Металлургия, 1989. – 495 с.
10. *Старшинов Б.Н., Сеницкий В.Д.* О влиянии коксовой мелочи на физические свойства шлаков в доменной печи // *Шлаковый режим доменных печей*. – М.: Металлургия, 1967. – С.216 – 223.

Статья рекомендована к печати канд.техн.наук А.Д.Джиготой