

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

На правах рукописи

МОСКАЛИНА Федор Николаевич

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И РАЗРАБОТКА  
ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ ПРИ ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРАХ КОМБИНИРОВАННОГО  
ДУТЬЯ

Специальность 05.16.02  
"Металлургия черных металлов"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Днепропетровск

1974

Работа выполнена в Институте черной металлургии Академии наук Украины.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
В.Н.АНДРОНОВ;

доктор технических наук, профессор  
В.П.ТАРАСОВ;

доктор технических наук, профессор  
К.Ф.ШУМИЛОВ.

Ведущее предприятие - Днепровский металлургический комбинат  
им.Ф.Э.Дзержинского.

Защита диссертации состоится "24 марта" 1994 г. на  
заседании специализированного совета Д.068.20.01  
при Донецком государственном техническом университете.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "24 февраля" 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
доктор технических наук,  
профессор



С.И.Прошевский



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема повышения эффективности доменного производства, как наиболее энергоемкого передела в черной металлургии, является одной из актуальных при разработке перспектив развития топливообеспечения промышленного комплекса Украины. Одним из основных путей улучшения экономичности доменной плавки состоит в кардинальном совершенствовании процесса выплавки чугуна при применении природного газа и дутья с изменением содержания кислорода в широком диапазоне, вплоть до предельных значений.

Технология доменной плавки с применением комбинированного дутья, разработанная в 1957–1958 г.г., в последнее время получила широкое распространение на металлургических предприятиях Украины – в 1990 г. в доменные печи Министерства промышленности было подано 5,03 млрд.м<sup>3</sup> природного газа и 5,39 млрд.м<sup>3</sup> технологического кислорода, что обеспечило дополнительное производство около 5 млн. тонн чугуна и экономию кокса примерно 4,3 млн. тонн в год.

Однако, в связи с резким сокращением объема поставок природного газа и удорожанием энергоносителей в настоящее время подача его в доменные печи практически полностью прекращена. Наряду с ухудшением других условий работы доменных печей (понижение качества железорудного сырья и кокса и др.) перевод доменных печей Украины на режим без вдувания природного газа и обогащения дутья кислородом привел к значительному увеличению расхода кокса – за II месяцев 1993 г. он составил 617 кг/т чугуна по сравнению с 529 кг/т чугуна в 1992 г. Тем не менее в перспективе проблема сокращения расхода топлива в доменном производстве будет обостряться, в связи с чем исследования по определению путей экономии металлургического кокса являются своевременными и актуальными. Поэтому раскрытие потенциальных технологических возможностей комбинированного дутья приобретает народнохозяйственное значение.

Следует отметить, что существующие теоретические концепции применения комбинированного дутья базируются на аксиоматических положениях, в которых задача минимизации расхода кокса не ставится и соответствующие условия для достижения этой цели не разработаны. Тем не менее, основанные на этих принципах технологические режимы оказались достаточно эффективными и на начальном этапе обогащения дутья кислородом до 25–28 %, но при более высоких значениях этого параметра наблюдаются существенные изменения в развитии процессов, прежде всего в высокотемпературной области доменной печи, что приводит к нарушениям процесса плавки. Однако отсутствие теоретических ос-

новы и практические рекомендации по оптимизации параметров процесса как в существующих условиях работы доменных печей, так и в перспективных с дальнейшим увеличением концентрации кислорода в дутье.

Данная диссертационная работа посвящена решению важной народно-хозяйственной проблемы – резкому повышению эффективности доменной плавки за счет применения комбинированного дутья с изменением концентрации кислорода в широком диапазоне, вплоть до предельных значений, и разработке оптимальных технологических режимов. В этой связи рассматриваются основные проблемы эффективного применения комбинированного дутья – рациональный ввод газа в дутье, формирование и распределение восстановительных реагентов в печи, развитие восстановительных процессов в высокотемпературной зоне, теплообмен и газодинамика процесса плавки.

Главное научное направление представленной работы состоит в расчетно-теоретическом исследовании развития высокотемпературных процессов при широком изменении параметров комбинированного дутья с определением их предельных значений и в разработке способов оптимизационного управления технологическим режимом доменной печи. Таким образом, диссертационная работа посвящена решению крупной народнохозяйственной проблемы – значительному сокращению расхода дефицитного металлургического кокса при сохранении или увеличении объема производства чугуна путем кардинальных изменений восстановительно-тепловых и газодинамических условий доменной плавки при существующем качестве железорудного сырья и топлива. Это определяет актуальность представленной работы.

Тема диссертационной работы непосредственно связана с решением основной проблемы доменного производства по созданию и освоению в промышленном масштабе технологических процессов и оборудования для подготовки сырья и выплавки чугуна, обеспечивающих интенсификацию производства за счет улучшения металлургических свойств сырья, увеличения использования кислорода и природного газа, применения пылеугольного топлива и горячих восстановительных газов, которая последовательно решалась в отделе металлургии чугуна ИЧМ в 1958–1985 г.г. Для современных условий актуальность работы состоит в обеспечении возможности стабилизации технологических режимов доменных печей Украины в существующих нестационарных условиях частых производственно-технических и организационных нарушений и сбоев.

Целью работы являются теоретические и экспериментальные исследования процессов газообразования, теплообмена и восстановления в высокотемпературной зоне доменной печи при значительном увеличении

восстановительного потенциала горювых газов (примерно в два раза) и широкое варьирование дутьевых и газодинамических параметров и разработка на этой основе оптимальных режимов плавки и способов управления, обеспечивающих снижение расхода кокса и прирост производства чугуна. Результаты исследований позволяют решить крупную научно-техническую и народнохозяйственную проблему сокращения расхода кокса на 15-20 % при значительном увеличении или сохранении объема выплавки чугуна, что дает возможность усовершенствовать структуру отрасли путем концентрации доменного передела на современных печах, существенно повысить технический уровень доменного производства, тем самым улучшить экологическую обстановку в металлургических регионах Украины.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

а) проведены расчетно-теоретические исследования физико-химических и температурно-тепловых процессов, развивающихся в нижней зоне печи, при изменении содержания кислорода в дутье в пределах 21-50% и расхода природного газа  $0,3-0,7 \text{ м}^3/\text{м}^3$  дутья, в которых рассмотрены следующие вопросы:

изменения производительности и расхода кокса при различных газодинамических режимах плавки;

развитие эндотермических процессов в высокотемпературной зоне печи;

количественные закономерности образования монооксида кремния ( $\text{SiO}$ ) в области горна и заплечиков;

развитие теплообмена в верхней и нижней зонах печи при различной газодинамике процесса;

формирование концентрационных полей в полости воздушной фурмы и зонах горения;

изменение пространственных размеров и взаиморасположения фурменных очагов при различных параметрах дутья;

зависимость предельной концентрации кислорода в дутье от расхода природного газа и интенсивности плавки;

б) на основе теоретического анализа были разработаны методы оптимизационного управления режимом плавки, которые базируются на разработанных принципах взаимозависимости и согласованности процессов, развивающихся в верхней и нижней частях доменной печи;

в) проведены длительные опытно-промышленные плавки на доменных печах объемом 1386, 2000 и  $5000 \text{ м}^3$  при концентрации кислорода в дутье 25, 30, 35 и 40 %, в которых были опробованы и внедрены разра-

ботанные методы оптимизационного регулирования, подтвердившие соответствие теоретических предпосылок и фактических закономерностей развития высокотемпературных процессов;

г) выполнены промышленные исследования на доменных печах при содержании кислорода в дутье 23–35 % – состава газовых смесей в фурме, температурного режима и состава газа, в том числе его влажности, по сечению горна, изменений температур чугуна и шлака на выпуске, а также состава газовой фазы и температуры по высоте доменной печи.

Научная новизна основных результатов, полученных автором в ходе решения поставленных проблем, проявилась в следующих оригинальных разработках и научных достижениях:

создана научная база высокоэффективного технологического процесса производства чугуна и способов его управления путем применения комбинированного дутья с широким диапазоном изменения расхода кислорода и природного газа;

предложены и обоснованы новые принципиальные положения о развитии высокотемпературных процессов доменной плавки – образование фурменного очага, как специфического вида неизотермической струи, автономность движения газовых потоков в верхней и нижней зонах печи, криволинейность движения рудного гребня по высоте печи, возможность широкого варьирования газодинамических параметров плавки, количественные закономерности образования монооксида кремния ( $SiO$ ) в высокотемпературной области;

разработаны теоретические обоснования предельных уровней обогащения дутья кислородом в зависимости от технологических условий ведения процесса;

получены экстремальные закономерности изменений прироста производства чугуна и экономии кокса на добавочный 1 %  $O_2$  в дутье в зависимости от уровня обогащения дутья кислородом;

определены взаимосвязи между теоретической температурой горения и высокотемпературными тепловыми затратами в различных диапазонах содержания кислорода в дутье;

разработаны теоретические основы формирования концентрационных полей в полости фурмы при различных параметрах потоков природного газа и дутья;

установлены особенности теплообмена по высоте печи в зависимости от характеристик потоков газов и ихти и интенсивности процесса плавки;

представлены теоретические обоснования развития вторичного окисления чугуна в зонах горения и влияния этого процесса на фильтрационные свойства горна;

получены аналитические соотношения между уровнем теоретической температуры горения и технологическими условиями работы печи — составом шихты, концентрацией кислорода в дутье, давлением колошниково-го газа и др.;

произведен теоретический анализ движения газового потока в зоне кускового состояния материала при различных состояниях столба шихты — наличии каналов, деформированном профиле скорости газа, различной порозности слоя по сечению печи.

Практическая ценность рас. м определяется тем, что в ней решены следующие научно-технические проблемы:

созданы теоретические основы высокоинтенсивной технологии производства чугуна и внедрены в практику экономичные технологические режимы на современных доменных печах объемом 1386–5000 м<sup>3</sup> в существующих шихтовых условиях, позволяющая достигать удельной выплавки чугуна до 3,0 т/м<sup>2</sup> сутки с понижением расхода кокса до 400–410 кг/т чугуна;

разработаны расчетно-теоретические способы оптимизации основных технологических параметров доменной плавки как в конкретных условиях работы доменных печей, так и в перспективных при переводе их на повышенную концентрацию кислорода в дутье;

предложен и реализован новый метод расчета параметров рационального подвода природного газа в дутье;

решена задача выбора конкретных технологических способов оперативного управления режимом плавки с целью обеспечения его устойчивости и ровности схода шихты;

на основе проведенных исследований освоены и внедрены технологические способы оптимизации параметров плавки доменных печей объемом 2000–5000 м<sup>3</sup> при концентрации кислорода в дутье в пределах 30–40 %;

предложены способы ведения плавки на комбинированном дутье о выборе приоритетных задач — обеспечения максимального прироста производства чугуна или достижения минимального удельного расхода кокса;

разработана технология плавки, позволяющая получать чугун с низким содержанием кремния (0,3–0,4 %), в существующих условиях работы печей путем варьирования параметрами дутья.

Новая технология выплавки чугуна позволяет решать стратегические задачи черной металлургии Украины как по увеличению производства чугуна в отдельных регионах на существующих мощностях и сокращения расхода кокса, так и улучшения экологической обстановки в регионах за счет вывода из эксплуатации маломощных и низкоэффективных доменных печей.

Промышленная реализация результатов диссертационной работы осуществлялась в процессе проведения впервые в мировой практике опытных плавок: на доменных печах объемом 1386 м<sup>3</sup> ДМК и 2000 м<sup>3</sup> ДМК и МК "Криворожсталь" с обогащением дутья кислородом до 25, 30, 35 и 40%; при этом на 1 % O<sub>2</sub> в дутье прирост производства чугуна составил 1,38-2,6 %, а коэффициент замены кокса природным газом - 0,83 - 1,08 кг/м<sup>3</sup>.

Суммарный экономический эффект от внедрения результатов НИР, выполненных под руководством автора и составивших основу диссертационной работы, составил 9026,3 тыс.рублей.

Личный долевым экономический эффект автора от внедрения результатов работы составил 4313,6 тыс.рублей в год (в ценах 1980 г.).

Основные положения диссертационной работы были использованы при составлении "Типовой технологической инструкции по доменному производству" (выпуски 1977 и 1990 г.г.), а также нашли отражение в учебниках и учебных пособиях по специальности "Металлургия чугуна": А.Д.Гоголиб "Доменный процесс" (М., Металлургия, 1966, 506 с.), А.Н.Фамм "Современный доменный процесс" (М., Металлургия, 1980, 302 с.), Г.Т.Ефименко, А.А.Гиммельфарб, В.Е.Левченко "Металлургия чугуна" (Киев, "Вища школа", 1981, 494 с.) и в справочниках-изданиях - Е.Ф.Вегман "Краткий справочник доменщика" (М., Металлургия, 1981, 238 с.), "Доменное производство" (М., Металлургия, 1989, 494 с.).

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены:

- а) на Европейском конгрессе по доменному производству (14 - 17.09.86 г., Аахен, ФРГ);
- б) на XVI заседании Комиссии по черной металлургии стран-членов СЭВ (12-15.11.78 г., София, Болгария);
- в) на 10-ти всесоюзных научно-технических конференциях и совещаниях - межвузовской конференции "Организация и регулирование доменного процесса" (Магнитогорск, 1968 г.); конференциях "Проблемы автоматизированного управления доменным процессом" (Киев, 1971 г., 1973 г., 1975 г., 1977 г., 1979 г., 1981 г., 1983 г.), конференции "Теория и практика современного доменного производства" (Днепропет-

ровск, 1983 г.); всесоюзных совещаниях по доменному производству (1972-1984 г.г.);

г) на республиканских, межотраслевых и областных конференциях, а также на научных семинарах отдела металлургии чугуна Института черной металлургии, кафедры "Руднотермические процессы" Донецкого государственного технического университета;

д) на отраслевых совещаниях по доменному производству в бывшем Министерстве черной металлургии СССР, совещаниях в проектно-исследовательских организациях (Гипрометзе, УкрГипрометзе), научно-технических советах металлургических предприятий (Днепропетровского металлургического комбината им. Дзержинского, комбината "Криворожаталь", Новолипецкого металлургического комбината).

## I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДУТЬЕ

### I.1. Прогнозная оценка показателей доменной плавки

Существующие методы определения производительности и удельного расхода кокса не учитывают разнообразия газодинамических режимов плавки и различных соотношений между расходами атмосферного воздуха, технологического кислорода и природного газа, в связи с чем результаты расчетов значительно отличаются от реальных показателей работы доменных печей. В разработанном методе производится учет указанных факторов и, кроме того, используется новое уравнение для расчета показателя степени прямого восстановления  $Z_d$ , которое дает результаты, практически совпадающие с фактическими при обогащении дутья кислородом в пределах 24-40 % (рис.1):

$$Z_d = 52 e^{-8,59 Q_{пг}} \%,$$

где  $Q_{пг}$  - расход природного газа,  $m^3/m^3$  дутья.

При анализе изменений показателей плавки рассматривались следующие режимы обогащения дутья кислородом: объем горнового газа остается неизменным ( $V_r^0 = const$ ), изменение выхода газа в единицу времени пропорционально приращению содержания кислорода в дутье ( $\Delta V_r = \Delta \omega$ ), кинетическая энергия и расход дутья сохраняются постоянными ( $E^0 = const$  и  $Q_d^0 = const$ ). Расход природного газа на  $1 m^3$  кислорода (коэффициент компенсации) находился в пределах 0,3-0,7  $m^3$ . В зависимости от выбранного режима на  $1 \% O_2$  в дутье выход горнового газа в единицу времени изменяется от нуля до 3,7 %. Для определения эффективности комбинированного дутья с увеличением концентрации кислорода на  $1 \%$  были рассмотрены изменения

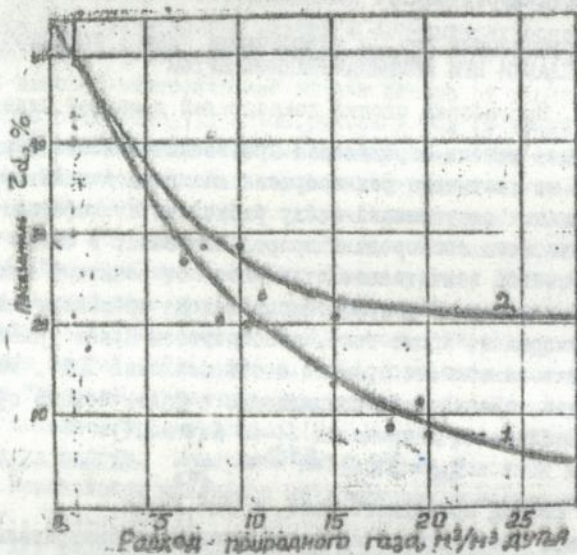


Рис. 1 Изменение показателя  $Z_d$  от расхода природного газа.  
 1 - по уравнению (1); 2 - по уравнению А.И. Рама (точками обозначены результаты опытных плавок)

прироста производительности  $\Delta P$ , снижения удельного расхода кокса  $\Delta K$ , изменения степени прямого восстановления  $\Delta Z_d$ , интенсивности плавки  $\Delta J$  и расхода дутья  $\Delta Q_d$ . Расчетный анализ поведения указанных показателей позволил выявить их характерные закономерности (таблицы 1, 2, 3).

Таблица 1

Изменения показателей доменной плавки на 1%  $O_2$  при увеличении содержания кислорода от 21 до 45%, %

Показатели	Режимы плавки					
	$\Delta V_r = \Delta \omega$			$V_r^0 = \text{const } E^0 = \text{const } Q_d^0 = \text{const}$		
	$\Delta \varphi = 0,3$	$\Delta \varphi = 0,5$	$\Delta \varphi = 0,7$	$\Delta \varphi = 0,5$	$\Delta \varphi = 0,5$	$\Delta \varphi = 0,5$
Производительность ( $\Delta P$ )	+3,69	+2,66	+1,61	+1,5	+3,0	+4,0
Расход кокса ( $\Delta K$ )	-1,22	-1,32	-1,41	-1,43	-1,27	-1,17
Интенсивность плавки ( $\Delta J$ )	+1,40	+0,50	-0,35	-0,37	+0,78	+1,69
Степень прямого восстановления ( $\Delta Z_d$ )	-3,1	-3,6	-4,3	-4,3	-3,4	-2,9
Расход дутья ( $\Delta Q_d$ )	-0,6	-0,8	-1,0	-1,47	-0,63	0

Таблица 2

Изменение показателей доменной плавки на 1%  $O_2$  в различных диапазонах обогащения дутья кислородом и коэффициентах компенсации (режим  $\Delta V_r = \Delta \omega$ ), %

Содержание $O_2$ в дутье, %	Коэффициент компенсации $\Delta \varphi$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>											
	$\Delta \varphi = 0,3$				$\Delta \varphi = 0,5$				$\Delta \varphi = 0,7$			
	$\Delta P$	$\Delta K$	$\Delta P + \Delta K$	$\Delta Z_d$	$\Delta P$	$\Delta K$	$\Delta P + \Delta K$	$\Delta Z_d$	$\Delta P$	$\Delta K$	$\Delta P + \Delta K$	$\Delta Z_d$
21-25	+1,9	-2,8	4,7	-3,2	+1,5	-3,8	5,3	-4,2	+1,3	-4,7	6,0	-5,3
26-35	+4,2	-1,6	5,8	-2,0	+3,2	-1,8	4,8	-2,1	+2,1	-1,6	3,7	-2,1
36-45	+2,3	-0,5	2,8	-0,5	+1,7	-0,4	2,1	-0,75	0,9	-0,3	1,2	-0,9

Результаты приведенного анализа состоят в следующем:

газодинамика процесса существенно влияет на показатели плавки - при переводе печи с режима  $V_r^0 = \text{const}$  на режим  $Q_d^0 = \text{const}$  прирост производительности  $\Delta P$  на 1%  $O_2$  в диапазоне обогащения дутья кислородом 21-45% возрастает с 1,5 до 4,0%, а экономия кокса  $\Delta K$  соответственно уменьшается с 1,43 до 1,17%;

Изменение показателей доменной плавки на 1 %  $O_2$  в различных диапазонах обогащения дутья кислородом и режимах плавки  
( $\Delta P = 0,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ), %

Содержание $O_2$ в дутье %	$V_r^0 = \text{const}$				$E^0 = \text{const}$				$Q_d^0 = \text{const}$			
	$\Delta P$	$\Delta K$	$\Delta P + \Delta K$	$\Delta Z_d$	$\Delta P$	$\Delta K$	$\Delta P + \Delta K$	$\Delta Z_d$	$\Delta P$	$\Delta K$	$\Delta P + \Delta K$	$\Delta Z_d$
21-25	+1,1	-4,3	5,4	-4,9	+1,8	-3,2	5,0	-3,6	+2,2	-2,3	4,5	-2,5
26-35	+2,2	-1,7	3,9	-2,2	+4,0	-1,7	5,7	-2,2	+4,8	-1,7	6,5	-2,2
36-45	+0,8	-0,4	1,2	-1,0	+1,4	-0,4	1,8	-0,7	+2,0	-0,4	2,4	-0,4

увеличение коэффициента компенсации от 0,3 до 0,7  $\cdot 3/\text{м}^3$  при одинаковом уровне обогащения дутья кислородом приводит к понижению интенсивности плавки на 1,75 %, а производительности — от 3,69 до 1,61 %; экономия кокса при этом возрастает от 1,22 до 1,41 %;

изменение прироста производительности на 1 %  $O_2$   $\Delta P$  с увеличением концентрации кислорода в дутье имеет экстремальный вид для всех режимов плавки, максимальное значение его достигает в диапазоне 26-35  $O_2$  и составляет 2,2-4,8 %, тогда как самая значительная экономия кокса на 1 %  $O_2$   $\Delta K$  наблюдается в диапазоне 21-25 %  $O_2$  и составляет 2,3-4,3 %, уменьшаясь до 0,4 % при содержании  $O_2$  в дутье 36-45 %;

эффективность комбинированного дутья, оцениваемая суммой показателей  $\Delta P + \Delta K$ , уменьшается по мере повышения его параметров, но и при 36-45 % в дутье величина её достаточно высокая и составляет 1,2-2,4 % (при "скользящей" базе сравнения отдельных диапазонов обогащения дутья кислородом).

Газодинамические особенности выбранных режимов с увеличением обогащения дутья кислородом характеризуются следующими количественными соотношениями:

кинетическая энергия дутья для режимов  $V_r^0 = \text{const}$  и  $\Delta V_r = \Delta \omega$  уменьшается и при 40-45 %  $O_2$  составляет соответственно 50-60 % и 80-83 % её начальной величины, тогда как для режима  $Q_d^0 = \text{const}$  значение её возрастает на 40-45 %;

выход горновых газов в единицу времени возрастает для всех режимов (кроме  $V_r^0 = \text{const}$ ) и в максимальной степени при  $Q_d^0 = \text{const}$  — на 1,6-3,7 %;

при высоком уровне обогащения дутья кислородом (35 % и выше) более значительное снижение показателя  $Z_d$  и, следовательно, получение более высокой экономии кокса на 1 %  $O_2$  достигается при менее интенсивных режимах плавки ( $V_r^0 = \text{const}$  или  $\Delta V_r = \Delta \omega$ ) по сравнению с другими режимами с более высокими расходами природного газа.

Таким образом, комбинированное дутье является уникальным средством управления процессом доменной плавки и позволяет решать различные целевые производственные задачи – приоритетное достижение максимальных прироста производства или экономии кокса за счет выбора соответствующих параметров дутья и в этом состоит его главное технологическое преимущество по сравнению с другими способами интенсификации доменного процесса.

### 1.2. Развитие эндотермических процессов и теплообмена в высокотемпературной зоне доменной печи

В работе были проанализированы изменения тепловых затрат на развитие высокотемпературных процессов, протекающих при температурах 1200°C и более, а именно: нагрева фурменного кокса, прямого и косвенного (за счет водорода) восстановления FeO, восстановления кремния и марганца, перевода серы в шлак, нагрева чугуна и шлака до температуры на выпуске, образования монооксида кремния (SiO) и тепловых потерь в нижней зоне доменной печи.

Расход тепла  $q$  на образование SiO:

$$q = 11,656 P_0 (1 + \Delta P) [K_0 (1 - \Delta K)] \beta_k \chi_{SiO_2} (1,8 \Delta \omega + 0,6) + u\% SiO_2 (1,8 \Delta \omega + 0,07) \text{ МДж/мин.}$$

Анализ показал, что с повышением обогащения дутья кислородом суммарные расходы тепла в единицу времени изменяются неоднозначно: до 25 % они снижаются за счет уменьшения развития процесса прямого восстановления, а далее возрастают вследствие интенсификации процесса образования SiO и увеличения производства чугуна.

Увеличение расхода тепла в нижней зоне печи в различных диапазонах обогащения дутья кислородом характеризуется следующими данными (в процентах):

Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	Режим плавки		
	$V_r^0 = \text{const}$	$E^0 = \text{const}$	$Q^0 = \text{const}$
21–25	100,0	102,1	103,6
26–35	101,7	105,5	107,7
36–45	103,3	107,7	110,8

При переводе доменной печи с базового режима, характеризующегося выходом горновых газов  $V_r^0$ , суммарным расходом тепла в нижней зоне  $Q^0$  и теоретической температурой горения  $t^0$  на более высокие параметры дутья при значениях  $V_r$  и  $Q$ , то для покрытия возросшей теплопотребности нижней зоны необходимо устанавливать новые значения теоретической температуры горения  $t$ , которое равно:

$$t = t_0 \frac{V_r^0 (1450 c_0 V_r + Q)}{V_r (1450 c_0 V_r^0 + Q^0)} \quad ^\circ\text{C},$$

где  $c_0$  — теплоемкость двухатомных газов, кДж/м<sup>3</sup>град.

Изменение теоретической температуры горения по мере повышения содержания кислорода в дутье по сравнению с базовым периодом для всех режимов подчиняется общей закономерности — на первом этапе обогащения дутья (до 25 %) значение  $t$  понижается на 16–18<sup>o</sup>C на 1 % O<sub>2</sub>, а при дальнейшем наращивании содержания O<sub>2</sub> в дутье он возрастает на 7–19<sup>o</sup>C и в диапазоне 36–45 % может достигать 2400–2700<sup>o</sup>C (таблица 4, рис. 2 и 3).

Таблица 4

Изменение теоретической температуры горения при увеличении содержания кислорода в дутье на 1 % при различных режимах плавки и значения  $\Delta\phi$  (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), <sup>o</sup>C

Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	$\Delta V_r = \Delta \omega$			$\Delta\phi = 0,5$		
	$\Delta\phi=0,3$	$\Delta\phi=0,5$	$\Delta\phi=0,7$	$V_r^0 = \text{const}$	$\epsilon^0 = \text{const}$	$Q_{\text{д}}^0 = \text{const}$
21–25	-7	-17	-26	-18	-17	-16
26–35	+19	+13	+8	+12	+16	+18
36–45	+17	+10	+7	+11	+8	+9

Проведенный анализ позволяет определить технологические пределы обогащения дутья кислородом, которые определяются следующими параметрами:

уменьшением кинетической энергии дутья на 30–40 % от её начальной величины; для режима  $V_r^0 = \text{const}$  этот предел составляет 40–45 % O<sub>2</sub>, для других режимов этот предел не достигается;

понижением содержания FeO в первичных шлаках до 5–7 %, что соответствует значению  $Z_d$  равном 2–3 %, при этом наступает резкое увеличение вязкости шлака; по этому параметру пределы составляют 40,0–93,6%;

выходом горючих газов более 3 м<sup>3</sup>/мин на 1 м<sup>3</sup> объема печи, что приводит к осадкам шихты; предельные значения O<sub>2</sub> в дутье достигаются только для режима  $Q_{\text{д}}^0 = \text{const}$  и составляют 40–45 %;

вырождением верхней ступени теплообмена, что приводит к исчезновению резервной зоны и похолоданиям печи (60–90 % O<sub>2</sub>).

На основе данных о бумажных тепловых расходах в нижней зоне печи и изменении теоретической температуры горения были выполнены исследования процесса теплообмена при различных режимах плавки.

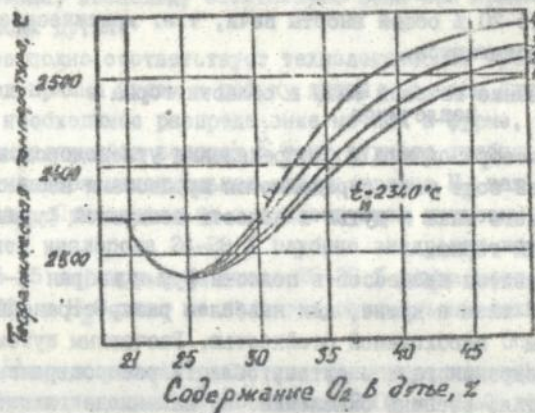


Рис. 2. Изменение теоретической температуры горения в зависимости от содержания  $O_2$  в дутье при  $\Delta\phi = 0,5$   
 1 -  $V^0 = const$ , 2 -  $\Delta V_r = \Delta\omega$ , 3 -  $E^0 = const$ ,  
 4 -  $G_j^0 = const$

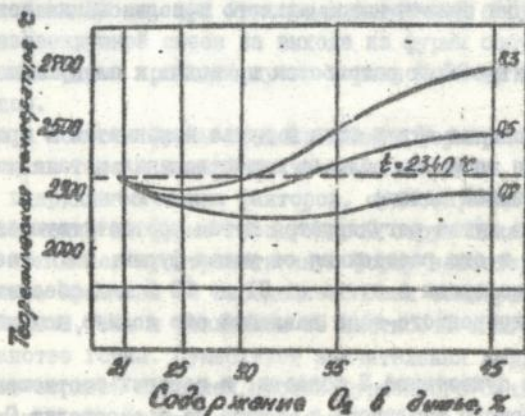


Рис. 3. Изменение теоретической температуры горения в зависимости от содержания  $O_2$  в дутье (значения  $\Delta\phi$ :  
 1 - 0,3; 2 - 0,5; 3 - 0,7, режим  $\Delta V_r = \Delta\omega$ )

Анализ показал, что с повышением обогащения дутья кислородом верхняя ступень теплообмена возрастает, но высота нижней ступени остается постоянной. Следует указать, что при содержании  $O_2$  в дутье 45-50 % резервная зона в шахте с температурой 900-1100°C сохраняется и составляет 15-20 % общей высоты печи, т.е. критические режимы при этом не достигаются.

### 1.3. Формирование газовой фазы в области горна и заплечиков

Особенности газообразования и распределения углеводородов и их производных в нижней зоне печи определяются процессами взаимодействия потоков природного газа и дутья в полости воздушной фурмы и окислительных очагах горна.

Для анализа развития процессов в полости фурмы выбран поперечный профиль газа в дутье, как наиболее распространенный в практике и обладающий необходимой стойкостью. Расчетным путем были оценены глубина внедрения газа в дутье, область распространения метана в потоке дутья, степень окисления  $CH_4$  на выходе газовой смеси в горн. Различное влияние на процесс смесеобразования в фурме оказывает соотношение скоростей газа и дутья и длительность пути смешивания. Комплекс этих параметров приводит к различным вариантам окисления метана - полного с образованием  $CO_2$  и  $H_2O$  или неполного с выделением  $H_2$  и  $CO$ . Последний вариант является наиболее предпочтительным с точки зрения максимального использования водорода природного газа.

Результаты аналитических разработок приводят к следующим выводам:

глубина проникновения струи газа в дутье изменяется в пределах 5-100 мм и на выходе из фурмы область существования метана может охватывать весь дутьевой поток;

внедрение газа в дутье регулируется путем соответствующего выбора диаметра сопла и его расстояния от устья фурмы, но с увеличением концентрации кислорода в дутье от 21 до 50 % для обеспечения требуемых расходов природного газа давление его должно повышаться от 0,1 до 3,4 МПа;

в полости фурмы существует 2 области, в которых соотношение содержаний элементарного кислорода и метана не превышает 0,5, а в другой - более 2-х, что предопределяет развитие в первом случае окисления  $CH_4$  до  $CO$  и  $H_2$ , а во втором - до  $H_2O$  и  $CO_2$ ; в промежуточной зоне эти процессы протекают совместно;

указанные превращения углеводородов зависят от конструкции пол-  
вода газа – при рассредоточенной его подаче мелкими струями метан  
более полно окисляется до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ;

в полости фурмы не создаются условия для развития процесса  
пиролиза метана, поскольку отсутствуют зоны без примеси элементар-  
ного кислорода дутья.

Наиболее полно соответствует технологическим требованиям под-  
вод газа под прямым углом к потоку дутья – в этом случае могут быть  
обеспечены необходимое распределение метана в фурме, позволяющее  
направить выделяющийся водород в зону рудного гребня, т.е. в этом  
случае достигается максимальное использование  $\text{H}_2$  как восстановитель-  
ного реагента. Применительно к существующим дутьевым условиям с  
концентрацией кислорода 24–28 % глубина внедрения газа в дутье со-  
ставляет 15–25 мм, при этом около 25–30 % вдуваемого метана окис-  
ляется до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , что не является оптимальным технологическим  
вариантом.

На рис. 4 представлены расчетные концентрационные поля  $\text{CH}_4$  и  $\text{O}_2$   
в полости фурмы доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> НЛМК при содержании  
кислорода в дутье 35 %, из которого следует, что в этих условиях  
основную часть потока дутья занимает область с соотноше-  
нием содержаний  $\text{O}_2$  и  $\text{CH}_4$  равном менее 0,5, т.е. в данном случае  
механизм окисления природного газа происходит с преимущественным  
выделением  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ . Глубина внедрения струи газа в дутье в данном  
случае составила 32 мм, при этом на оси газовой струи содержание  
метана в газозудной смеси на выходе из фурмы составляло 29 %.  
В нижней части фурмы проходит дутье толщиной 50 мм без примеси  
углеводородов.

Процессы в полости фурмы определяют формирование фурменных  
очагов и состав газа в нижней части доменной печи. Анализ теплотех-  
нических и гидродинамических факторов, существующих в нижней части  
печи при истечении из фурмы газодутьевой струи показывает, что зо-  
на горения принимает пространственную форму неизотермической струи,  
причем степень кривизны её определяется как температурным градиен-  
том газовой фазы, так и различием её плотности в струе и межфурмен-  
ном пространстве горна. Существует значительная дифференциация плот-  
ностей газов верхней и нижней частей фурменного очага (в 1,3–1,5  
раза) в связи с различным содержанием водорода – в верхней части оно  
достигает 25–50 %, тогда как в нижней половине очага  $\text{H}_2$  практически  
отсутствует. Этот фактор приводит к расширению фурменной зоны с уве-  
личением обогащения дутья кислородом на 0,5–4,0 % на 1,0 %  $\text{O}_2$  и  
усилению периферийности газового потока.

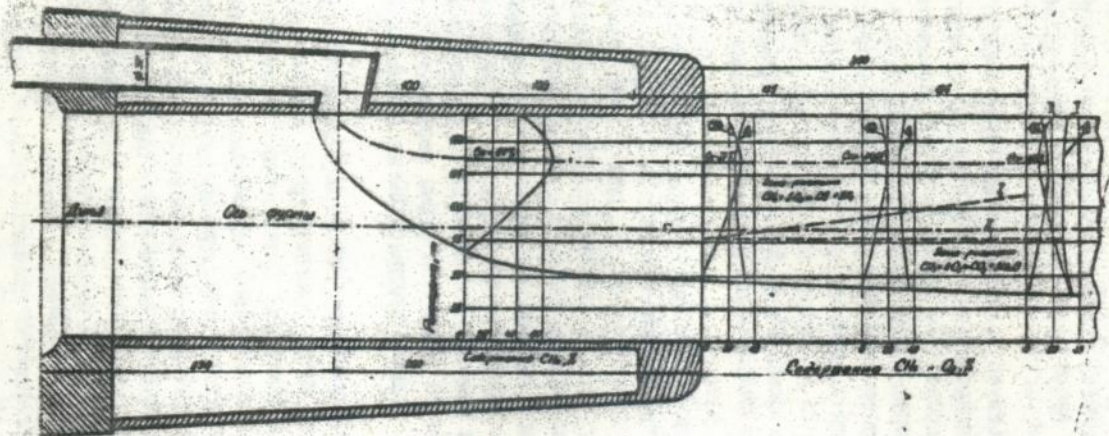


Рис. 4. Распределение природного газа в полости фурмы и в горне на доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> НДМ при концентрации кислорода в дутье 35 %

Для оценки кривизны очага применялся критерий Архимеда, в котором учтены указанные выше различия температур и плотностей газов очага и межфурменного пространства. Уравнение оси фурменного очага имеет следующий вид:

$$y = \frac{7,4g}{2\rho\bar{u}^2} \left( \frac{\rho_{окр} T_{стр}}{\rho_{стр} T_{окр}} - 1 \right) x^3.$$

Длина фурменного очага  $L$  :

$$L = \sqrt[3]{\frac{h z_{ф} \bar{u}^2 T_{окр}}{7,4g [T_{стр}(1+\Delta\omega) T_{окр}]} \text{ м.}}$$

Уравнения верхней ( $y_в$ ) и нижней ( $y_н$ ) границ фурменной струи:

$$y_в = Bx^3 + 2\varphi; \quad y_н = Cx^3 - 2\varphi;$$

$$B = \frac{h - 2\varphi}{(L - St_{\frac{g}{2}} - 2\varphi)^3}; \quad C = \frac{h + 2\varphi}{(L + St_{\frac{g}{2}} + 2\varphi)^3}.$$

Длина горизонтального участка очага соответствует размеру окислительной зоны, определяемой экспериментально точкой исчезновения  $CO_2$  из газовой фазы; криволинейная часть зоны горения примерно равна горизонтальной и поэтому полная длина зоны горения в 2 раза превышает её горизонтальную часть.

Окислительные очаги в плоскости фурм не соприкасаются между собой, а их взаимное перекрытие происходит в зоне заплечиков, образуя сплошное по окружности горна окислительное кольцо.

Наличие в нижней части дутьевой струи элементарного кислорода без примеси природного газа приводит на горизонте фурм к интенсивному развитию вторичного окисления чугуна. При этом шлаковый расплав с повышенным содержанием вторичного  $FeO$  отбрасывается газовым потоком вглубь зоны горения и вызывает газификацию измельченного кокса, который скапливается в центральных участках горна. Характерно, что повышение параметров дутья приводит к усилению указанного процесса и в соответствии с расчетами на 1 %  $O_2$  в дутье количество вторичного  $FeO$  увеличивается на 2,0 %.

Особенности газообразования в фурменных очагах (неизотермическая форма струи) предопределяют двумерное движение газопотока в заплечиках и нижней части шахты.

В высокотемпературной части доменной печи газовый поток является ламинарным и газораспределение зависит от параметров дутьевого режима. На входе в зону кускового состояния материалов движение газа становится одномерным и в значительной мере определяется свойствами столба шихты.

#### 1.4. Течение газа в шахте в зоне кусковых материалов

В разработанной математической модели, в отличие от ранее используемых, в качестве переменных величин приняты изменения порозности слоя по сечению доменной печи и начального профиля скорости газа на входе в зону кусковых материалов. Рассмотрен также вариант с образованием канала в осевой части печи площадью до 5 % от общего сечения печи, при этом профиль скорости газа на входе в слой принимался равномерным.

Для расчетов давления и скорости газа в доменной печи применялись системы уравнений, используемых в работах Б.И. Китаева. Согласно расчету, при деформированном начальном профиле газового потока и однородной порозности шихты неравномерность распределения газа по высоте печи наблюдается на небольшом участке - на 0,15-0,20 её радиуса (примерно на 2,0-3,0 м), а далее по сечению печи скорость газа выравнивается. При наличии в осевой зоне печи канала в случае равномерного начального профиля газа происходит его сток в эту область и на выходе из канала скорость газа составляет 100-120 м/с, что в 1,5-2,0 раза превышает скорость витания кусков агломерата. Следовательно, засорка канала железосодержащими материалами при регулировании газораспределения является в данном случае неэффективной, поскольку они выносятся газом. При повышении концентрации кислорода в дутье вязкость газа уменьшается и процесс его отсоса из шихты в канал возрастает. Проведенный анализ позволяет заключить, что в доменной печи существуют 2 автономные зоны газораспределения - высокотемпературная (более 1200°C), в которой газовый поток регулируется конфигурацией фурменных очагов и параметрами дутья и изотермическая при температурах 800-1100 С, где распределение газа организуется изменением порозности шихты за счет различных режимов загрузки.

#### 1.5. Обеспечение устойчивости теплового состояния доменной печи и движения столба шихты

Разработанные теоретические предпосылки дают основания заключить, что максимальная устойчивость теплового состояния и стока столба материалов достигается при оптимизации двух параметров режима загрузки - распределением рудных материалов на колошнике, при котором рудный гребень проходит в горне через фокус горения, и применения максимально-возможной массы подачи железорудных материалов с сохранением ровного хода и нормального теплового состояния печи. Кроме того, в высокотемпературной области доменной печи необходима

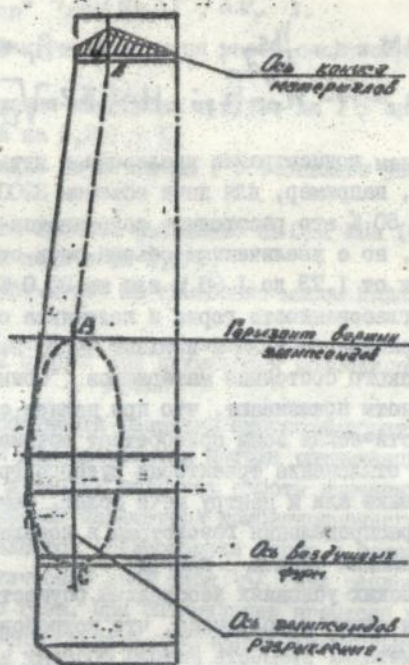


Рис. 5. Схема согласования положения рудного гребня на колоснике и окислительных очагов.  
ABC — траектория движения рудного гребня

Организация сплошного окислительного кольца фурменных очагов (рис. 5). Оптимальное расстояние между рудным гребнем и стенкой колошника  $RM$ :

$$RM = a - \frac{h_c}{\operatorname{tg} \alpha_m}; \quad a = R_p - R_r + L/2;$$

$$h_c = H - h_p - h_3; \quad H = 5,5 z_0 \sqrt{\frac{z_0}{(1 - e^2)}}.$$

С увеличением концентрации кислорода в дутье гребень приближается к стенке, например, для печи объемом  $3200 \text{ м}^3$  с повышением  $O_2$  в дутье с 30 до 50 % это расстояние сокращается с 1,85 м до 1,58 м или на 14,6 %, но с увеличением объема печи от  $1386 \text{ м}^3$  до  $5000 \text{ м}^3$  оно возрастает от 1,73 до 1,98 м или на 20,0 %.

Степень согласованности горна и колошника определяет температурное и концентрационное поля в верхней части печи и конфигурацию зоны пластического состояния материалов ("зоны когезии") в нижней её части. Расчеты показывают, что при полном согласовании горна и колошника пластическая зона приобретает оптимальное очертание — форму  $W$ , а отклонение траектории рудного гребня от оси фурменного очага к стенке или к центру печи более, чем на 25–30 % приводит к нарушениям распределения газопотока и появлению нерациональных форм зоны плавления типа  $L$  или  $J$ .

В практических условиях необходимо осуществлять контроль согласования работы горна и колошника, что потребовало разработки соответствующего метода. Сущность метода состоит в том, что на основе анализа газа в шахте рассчитывается показатель  $Q_d$ , характеризующий развитие процесса прямого восстановления по сечению печи:

$$Q_d = \frac{2N_2 \left[ \left( \frac{\sum O_2}{N_2} \right)_{\text{ф}} - \left( \frac{\sum O_2}{N_2} \right)_{\text{т}} \right]}{\eta_{\text{CO}} (\text{CO} + N_2)},$$

где  $\text{CO}$ ,  $N_2$ ,  $N_2$  — расчетное содержание оксида углерода, водорода и азота в горновом газе, ед.;  $\left( \frac{\sum O_2}{N_2} \right)_{\text{ф}}$ ,  $\left( \frac{\sum O_2}{N_2} \right)_{\text{т}}$  — соответственно отношения содержаний суммарного кислорода к азоту в фактическом радиальном газе и расчетном горновом газе, ед.

Величина показателя  $Q_d$  обратно пропорциональна высоте горизонта положения пластичной зоны над уровнем фурм и на основе его изменения по сечению верхней части печи производится технологическая оценка реального профиля зоны когезии. Данный метод опробован и внедрен в практику.

Для расчета массы железорудной подачи в качестве базового кри-

терия принимается величина максимально допустимого удельного перепада давления газа в слое материалов, обеспечивающего ровное опускание шихты. Величина рудной подачи  $Q_{пр}$  определяется соотношением:

$$Q_{пр} = 4,33 \gamma_r \Delta P_r / \Delta P_r^0 \text{ т.}$$

Технологические факторы влияют на массу следующим образом:

повышение содержания кислорода в дутье на 1 % приводит к увеличению массы подачи на 0,2-1,8 %;

вывод мелких фракций из шихты на 1 % позволяет увеличить массу подачи на 1 %;

повышение давления газа на колошнике на 0,1 МПа (0,1 ати) требует увеличения массы подачи на 2,2 %;

влияние температуры дутья на изменение массы подачи отсутствует.

#### 1.6. Методы оптимизации технологических параметров доменной плавки при применении комбинированного дутья

Рассмотренные особенности развития высокотемпературных процессов были использованы для разработки метода оптимизации процесса как при существующих дутьевых условиях работы доменных печей, так и при дальнейшем повышении параметров комбинированного дутья. Критерием оптимизации является согласование горна и колошника, т.е. получение формы пластической зоны типа  $W$  при рациональном подводе в дутье природного газа. При оптимизации процесса могут быть поставлены 2 приоритетные задачи - получение максимального производства чугуна или достижение минимального удельного расхода кокса. Обеспечение указанного критерия может быть достигнуто при соблюдении следующих условий:

согласование рудного гребня на колошнике с конфигурацией фурменных очагов;

образование в зоне заплечиков сплошного окислительного кольца; стабилизация теплового состояния горна и высоты нижней ступени теплообмена;

обеспечение условий максимального использования восстановительной энергии водорода природного газа.

Способ согласования горна и колошника был рассмотрен выше и поэтому здесь его разъяснение опускается, следует только подчеркнуть, что кроме совпадения траектории спускающей оси рудного и жбня и фокуса горения с увеличением обогащения дутья кислородом необходимо подгружать рудными материалами периферийную и центральную зоны колошника.

### 1.6.1. Образование в зоне заплечиков сплошного окислительного кольца

Поскольку экспериментальное изучение фурменных очагов в зоне заплечиков не представляется возможным, то для оценки их взаиморасположения применяется эмпирическое уравнение, связывающее скорость истечения дутья и диаметр фурмы:

$$\Pi = \frac{v}{d} \text{ ед.,}$$

где  $\Pi$  - показатель, характеризующий степень взаимного перекрытия фурменных очагов, ед.;  $v$  - скорость истечения дутья, м/с;  $d$  - диаметр фурмы, м.

Оптимальное значение показателя  $\Pi$  находится в пределах 950-1050, что обеспечивает необходимую степень взаимоперекрытия фурменных зон и наиболее устойчивый сход шихты. При величине  $\Pi$  менее 950 возникает ухудшение стойкости гарниссажа заплечиков и усиление износа футеровки шахты, а увеличение его более 1050 приводит к обособленности фурменных очагов и неровному ходу печи. Регулирование данного показателя возможно путем изменения расхода дутья или диаметра воздушных фурм в зависимости от конкретных условий работы доменной печи и производственных задач.

### 1.6.2. Стабилизация температурного режима горна и высоты нижней ступени теплообмена

Метод стабилизации теплового состояния горна базируется на рассмотренных ранее зависимостях изменения тепловых затрат в высокотемпературной зоне при различном обогащении дутья кислородом и соответствующем регулировании теплового потенциала горновых газов путем установления необходимой теоретической температуры горения (таблица 4).

Однако, следует также учитывать влияние на теоретическую температуру горения и других технологических и конструктивных факторов, перечень которых приведен в таблице 5.

Конечное изменение теоретической температуры горения определяется комплексом переменных факторов, что позволяет обеспечить постоянство теплового состояния печи и горизонта первичного шлакообразования.

Изменение теоретической температуры горения  $\Delta t$  и выхода горновых газов  $\Delta V_f$  при влиянии различных факторов

Факторы	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta V_f, \%$
Повышение содержания железа в шихте на I %	+23	Без изменения
Уменьшение содержания фракции 0-5 мм в шихте на I %	-II	+I,0
Уменьшение содержания серы в коксе на 0,1 %	- 9	+I,0
Уменьшение показателя качества кокса MIO на I,0 %	-12	+2,0
Повышение теплосодержания шлака на 40 кДж/кг (10 ккал/кг) за счет увеличения в нем содержания $MgO$ или основности	+10	Без изменения
Повышение содержания кремния в чугуна на 0,1 %	+43	Без изменения
Увеличение давления газа на колошнике на 10 кПа (0,1 ати)	+2	+I,0
Увеличение объема печи на 1000 м <sup>3</sup>	+27	Без изменения

### 1.6.3. Обеспечение максимального использования водорода вдуваемого природного газа

Использование водорода в предельно-возможной степени достигается при следующих мероприятиях: подвода  $H_2$  природного газа в максимальном количестве в зону рудного гребня, газификации мелкофракционного кокса в центральных участках горна и обеспечения чугуна и шлака по сечению горна в жидкоподвижном состоянии.

Требование подачи природного газа в рудный гребень осуществляется за счет рационального подвода, основными свойствами которого являются: создание условий для конвертирования метана до CO и  $H_2$  в области фокуса горения, газификация коксовой мелочи за пределами зон горения и обеспечение необходимой эксплуатационной стойкости. Наиболее полно этим требованиям соответствует подвод газа одной трубкой поперечно потоку дутья.

Как следует из теоретического анализа для совпадения области с максимальной концентрацией водорода в фурменном очаге с зоной рудного гребня, проходящего через фокус горения, глубина внедрения струи газа в дутье должна составлять 0,3 диаметра фурмы. Это требование может быть обеспечено при любых параметрах комбинированного

дутья, но сечение сопла и давление газа должны находиться в определенном соотношении. Диаметр сопла  $d_R$  определяется уравнением:

$$d_R = \sqrt{\frac{1,64 n V_{nr}}{W_R (100 + P_{nr})}}$$

Условие конверсии углеводородов в области фокуса горения до  $H_2$  и  $CO$  выполняется при определенном расстоянии  $N$  точки ввода газа от устья фурмы, которое рассчитывается по уравнению:

$$N = 100 + 1000 \Delta \omega \text{ мм,}$$

где  $\Delta \omega$  — приращение содержания кислорода в дутье сверх 21 %,  $m^3/m^3$  дутья.

Приведенное соотношение показывает, что с повышением концентрации кислорода в дутье и расхода природного газа подвод его в дутье должен удаляться от устья фурмы. Для существующих дутьевых условий работы доменных печей Украины этот размер не превышает 120–150 мм. Рассмотренная конструкция подвода не содержит специальных вставок, распылителей и других деталей для углубления струи газа и поэтому горячее дутье не окисляет сопло и его эксплуатационная надежность определяется только стойкостью фурмы.

Рассматриваемый способ подвода газа обеспечивает отмеченную в требованиях возможность газификации коксовой мелочи, скопляющейся в центральных участках горна. Поскольку в нижней части устья фурмы проходит обогащенное дутье без примеси природного газа, то на этом горизонте развивается интенсивное вторичное образование  $FeO$  с доставкой его газом по потоку в центральные участки горна, где оксид железа реагирует с коксовой мелочью. Протекание этого процесса зафиксировано при экспериментальных исследованиях состава газа в горне при обогащении дутья кислородом до 30 и 35 % на печи НЛМК — за пределами окислительной области содержания  $CO$  в газе резко возрастает на 5–7 % и более. Проникновению горячих газов за пределы зон горения и повышению их восстановительной энергии способствует улучшение дренажной способности горна. Поэтому при переводе доменной печи на более высокое содержание кислорода в дутье возникает проблема сохранения очертаний фурменных очагов, прежде всего их нижней границы, поскольку, как показано выше, верхняя часть зоны горения закономерно расширяется с увеличением параметров дутья. Такая стабилизация проводится изменением диаметра и количества воздушных фурм. Основываясь на положениях теории неизотермической струи и принимая в качестве исходных критерии фурменной струи — Архимеда  $A_R$  и импульса  $D^0$  — были выведены уравнения для определения диа-

метра фурмы  $d_{\text{ф}}$  и расход дутья на одну фурму  $M_d$  в новых условиях при теоретической температуре горения  $T_{\text{стр}}$  и плотности газовой фазы струи  $\rho_{\text{стр}}$ :

$$d_{\text{ф}} = \sqrt[3]{\frac{0,0095 \Phi^{\circ} A_i^{\circ} T_{\text{д}} T_{\text{окр}} \rho_{\text{стр}}}{\gamma_{\text{д}} P_{\text{д}} (T_{\text{стр}} \rho_{\text{окр}} - T_{\text{окр}} \rho_{\text{стр}})}} \quad \text{м.}$$

Здесь  $\Phi^{\circ}$ ,  $A_i^{\circ}$  - исходные значения импульса фурменно<sup>т</sup> струи и критерия Архимеда;  $T_{\text{д}}$ ,  $P_{\text{д}}$ ,  $\gamma_{\text{д}}$  - температура (К), давление (МПа) и плотность ( $\text{кг/м}^3$ ) дутья.

Установлено влияние технологических факторов на изменения диаметра и количества фурмы:

повышение концентрации кислорода в дутье на 10 % должно сопровождаться уменьшением диаметра фурм на 3,7 % и увеличением их количества на 11,3 % (применительно к режиму  $\Delta V_{\text{г}} = \Delta \omega$ , для других режимов эти значения корректируются соответственно изменению расхода дутья);

с увеличением температуры дутья на 100°C диаметр фурм возрастает на 2,8 %, а их количество - на 7,0 %;

повышение давления колошникового газа на 0,01 МПа (0,1 ати) должно сопровождаться уменьшением диаметра фурм на 1,0 %.

На доменных печах при повышении содержания кислорода в дутье и сохранении количества фурм уменьшение их диаметра производится в меньшей степени и составляет  $\Delta d_{\text{ф}} / (1 + \Delta n_{\text{ф}})$ , а при увеличении температуры дутья от  $T_{\text{д}}^{\circ}$  до  $T_{\text{д}}$  в соотношении  $\sqrt{T_{\text{д}}^{\circ} / T_{\text{д}}}$  ( $\Delta d_{\text{ф}}$  и  $\Delta n_{\text{ф}}$  - соответственно расчетные изменения диаметра фурмы и их количества). Одновременные изменения нескольких факторов аддитивно влияют на диаметр и количество воздушных фурм.

Представленные в данной главе аналитические методы позволяют оптимизировать тепловые и газодинамические процессы доменной плавки при изменении в широких пределах концентрации кислорода в дутье, расходов природного газа и дутья и могут быть применены при отработке рациональных режимов плавки в существующих условиях эксплуатации доменных печей.

## 2. ОПЫТНЫЕ ПЛАВКИ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ ПРИ ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРАХ КОМБИНИРОВАННОГО ДУТЬЯ

### 2.1. Результаты опытно-промышленных доменных плавков

Выводы и рекомендации теоретических исследований по оптимизации технологического режима были испытаны в промышленных условиях при проведении опытных плавков на доменных печах объемом 1386 м<sup>3</sup> (25 % O<sub>2</sub>, ДМК, 1959 г.) и 2000 м<sup>3</sup> (30 % O<sub>2</sub>, МК "Криворожсталь", 1967 г., 35 и 40 % O<sub>2</sub>, НЛМК, 1971 г. и 1983 г.). Основные положения по регулированию режима плавки внедрены также на доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> комбината "Криворожсталь" при освоении её проектной мощности. Техничко-экономические показатели работы этих доменных печей в сопоставимых и опытных периодах плавки представлены в таблице 6. Подача природного газа в дутье осуществлялась поперечно потоку дутья через наружный фланец фурмы (ДМК и МК "Криворожсталь") и через трубку, выходящую в полость фурмы на расстоянии 250 мм от её устья. Предварительно к проведению плавков на НЛМК были разработаны и осуществлены мероприятия по обеспечению адувания в печь необходимых количеств кислорода (до 50 тыс. м<sup>3</sup>/час - реконструирована его подача на впуск турбовоздуходувки, масляные фильтры заменены глицириновыми ударно-инерционными, уплотнены стыки на фурменных приборах и др.) и природного газа - повышено давление его в коллекторе до 1,0-1,2 МПа, расширены проходные сечения трактов и др. Проведены мероприятия по увеличению мощности системы шихтоподачи на 20-30 %, разработана система надежности и безопасности эксплуатации доменной печи при высоком обогащении дутья кислородом - применены быстродействующие клапаны на кислородопроводе, установлена аварийная сигнализация на турбовоздуходувках и др.

В опытных плавках был применен весь комплекс методов оптимизационного управления процессом - согласование горна и колошника, подгрузка рудными материалами периферийной зоны и центра, увеличение массы подачи, повышение теоретической температуры горения, уменьшение диаметра фурм, рационализация подвода природного газа. Были опробованы все четыре рассматриваемые газодинамические режимы, выбор которых диктовался, главным образом, получением максимальной интенсивности плавки при заданном содержании мелких фракций в шихте.

При проведении плавков подтвердились эффективность разработанных теоретических положений и рекомендаций, направленных на оптимизацию высокотемпературных процессов при применении комбинированного дутья. Из таблицы 6 следует, что по мере обогащения дутья кислоро-

Таблица 6

Технико-экономические показатели работы доменных печей в сопоставимых (А)  
и оптных (Б) периодах плавки

Показатели	ДМК, 1386 м <sup>3</sup>		"Приворожсталь", 2000 м <sup>3</sup>		НЛМК, 2000 м <sup>3</sup>		НЛМК, 2000 м <sup>3</sup>	
	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
Длительность периода, сутки	28	31	150	25	92	56	61	20
Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	21,0	24,3	23,8	29,1	26,7	34,7	35,0	40,0
Режим плавки	-	$V_r^o = const$	-	$\Delta V_r = \Delta \omega$	-	$E^o = const$	-	$Q_g^o = const$
Производительность, т/сутки	1958	2124	3458	3788	3755	4330	4227	4748
Расход кокса, кг/т чугуна	762	612	478	435	484	447	436	416
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	нет	124	99	140	110	153	157	180
Расход кислорода, м <sup>3</sup> /т чугуна	нет	74	57	168	99	198	202	248
Выход шлака, кг/т чугуна	675	656	519	522	523	536	524	514
Расход дутья, м <sup>3</sup> /мин	2930	2580	3335	3200	3330	3280	3214	3250
Температура дутья, °С	716	850	1092	1051	1175	1169	1203	1177
Интенсивность плавки по коксу, т/м <sup>3</sup> сутки	1,08	0,95	0,83	0,824	0,909	0,963	0,921	0,988
Коэффициент замены кокса, кг/м <sup>3</sup>	-	1,08	-	1,05	-	0,93	-	0,83
Прирост производительности на 1 % O <sub>2</sub> в дутье, %	-	2,6	-	2,0	-	1,9	-	1,88
Снижение расхода кокса на 1% O <sub>2</sub> в дутье, %	-	4,3	-	1,7	-	1,0	-	0,87
Количество горючих газов, м <sup>3</sup> /мин	3540	3580	4600	4870	4800	5340	5260	5740
Калорийная энергия дутья, ккал/с	2680	2182	4500	4190	5960	6250	6500	7190
Теоретическая температура горения, °С	2080	1930	2090	2110	2240	2340	2350	2350

дом прирост производства и экономия кокса на 1%  $O_2$  уменьшаются - соответственно с 2,6 до 1,88 % и с 4,3 до 0,87 %, но при содержании кислорода в дутье 40 % достигаются достаточно высокие значения этих показателей - 4748 т/сутки и 416 кг/т чугуна. Следует отметить, что значения коэффициента замены кокса газом изменяются незначительно - от 1,08 кг/м<sup>3</sup> до 0,83 кг/м<sup>3</sup>.

Значение проведенных плавков состоит в том, что впервые в промышленных условиях была подтверждена реальность применения комбинированного дутья с содержанием кислорода до 40 % в существующих шихтовых условиях и целесообразность разработанных способов управления. Экономическая эффективность применения дутья с высокой концентрацией кислорода определяется соотношением отпускных цен на кокс, природный газ и технологический кислород. В опытных плавках подтвердились экономические прогнозы эффективности комбинированного дутья при соотношении цены кокса к суммарной стоимости газа и кислорода, равным 1,5-1,7. Можно полагать, что при отношении кокса к суммарной стоимости кислорода и природного газа кокса, равном 1:1, ведение процесса на дутье с высоким содержанием кислорода также будет экономически выгодным в связи с уменьшением затрат по переделу, но для каждого конкретного условия требуется технико-экономический анализ.

Следует отметить, что разработанные способы управления были успешно внедрены и на других металлургических предприятиях при применении высокообогащенного кислородом дутья; они отражены в типовой технологической инструкции по доменному производству.

## 2.2. Исследования высокотемпературных процессов в доменных печах при содержании кислорода в дутье в пределах 24-35 %

В периоды опытных плавок проводились исследования состава газовой смеси в фурме, состава газовой фазы, температурного режима и жидких продуктов плавки по сечению горна и по высоте печи, а также температур выходящих из печи чугуна и шлака.

Развитие процесса смешения в фурме проводилось при подаче природного газа в атмосферным дутьем (ДМК), при обогащении дутья кислородом до 24 % (ДМК) и до 35 % (НДМК). Расходы природного газа в дутье составляли соответственно 4,5-6,1 %, 5,3-7,5 % и 14-15 %. Фактические составы газовой смеси практически совпали с расчетными как по глубине внедрения струи газа в дутье, так и по очертаю области распространения этана в потоке дутья на выходе

из фурмы - на ДЛК проникновение газа составило 20 мм (по расчету - 18 мм), а на печи НЛМК - 32 мм (расчетная величина - 35 мм). В пробах газа на выходе из фурмы отсутствуют диоксид и оксид углерода, а также водород и  $H_2O$ , т.е. горение углеводородов в фурме не происходит и она выполняет роль смесителя потоков природного газа и дутья. В нижней части потока дутья углеводороды не содержатся, здесь проходит только обогащенное кислородом дутье. Данные показывают, что подвод газа, принятый на доменных печах НЛМК (одной трубкой поперечно потоку дутья) наиболее полно удовлетворяет технологическим требованиям, т.к. в фурме подготавливается газодутьевая смесь, в которой в фурменных очагах метан окисляется до  $CO$  и  $H_2$ .

Состав газа в горне изучался при содержании кислорода в дутье 21, 24, 30 и 35 %, а расход природного газа колебался от 3,8 до 14,0 % к дутью. Следует указать, что наряду с определением  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  и  $H_2$  в горновом газе также анализировалось содержание  $H_2O$  по сечению горна с помощью психрометрических измерений. Исследования показали, что с увеличением содержания кислорода в дутье и расхода природного газа окисление метана сдвигается в сторону образования  $CO$  и  $H_2$  с уменьшением выделения  $CO_2$  и  $H_2O$ , что оказывает благоприятное влияние на использование водорода вдуваемого природного газа (рис. 6).

Максимальное количество  $H_2O$  при содержании  $O_2$  в дутье 24/30 % наблюдается в области фокуса горения ( $33-96 \text{ г/м}^3$ ), далее их содержание уменьшается и полное исчезновение происходит на расстоянии 2,5-3,0 м от фурмы. Изучение линейного размера окислительной зоны при различном значении критерия Архимеда подтвердили их взаимозависимость, т.е. косвенно получено доказательство конфигурации фурменного очага, как специфической неизотермической струи.

Замеры температуры по сечению горна на горизонте воздушных фурм дают основания заключить, что с увеличением интенсивности плавки и производительности печи разность между теоретической температурой горения и температурой в фокусе горения возрастает от 40-60°C ( $1,5-1,6 \text{ т/м}^3 \text{ сутки}$ ) до 180-200°C ( $2,0-2,15 \text{ т/м}^3 \text{ сутки}$ ). При нормальном тепловом состоянии горна температура в его центральных областях не зависит от обогащения дутья кислородом и практически постоянная - 1400-1600°C (в среднем 1500°C). Повышение теоретической температуры горения на 100°C приводит к увеличению температуры чугуна на выпуске на 20°C (при прочих равных условиях). При увеличении интенсивности плавки за счет повышения концентрации кислорода в дутье от 23-24 %

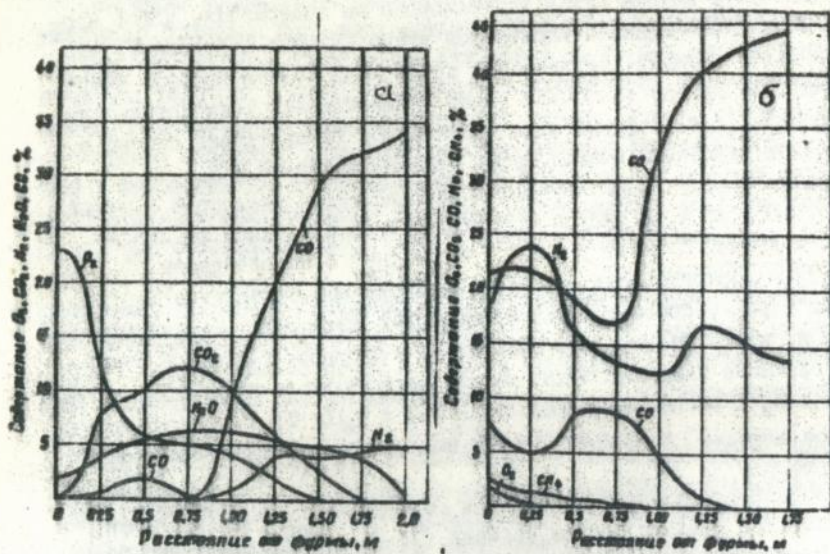


Рис. 6. Состав газа по сечению горна на доменных печах объемом 2000 м<sup>3</sup> комбината "Криворожсталь" (а) и 2500 м<sup>3</sup> (б) при концентрации кислорода в дутье 23,8 % и 34,7 %

до 35 % разность температур нижнего шлака и чугуна возрастает от 40 до 85°C.

Составы шлакового расплава на горизонте фурм и горнового газа подтверждают увеличение вторичного окисления чугуна - в среднем на 1 %  $O_2$  содержание вторичного FeO возрастает на 1,8-2,0 %, и оно примерно соответствует увеличению интенсивности сжигания кокса с повышением содержания кислорода в дутье на 1 %, т.е. здесь наблюдается соответствие между накоплением мелких фракций кокса и увеличением содержания FeO в шлаке. Процессу газификации коксовой мелочи способствует также и увеличение температуры в нижней части фурменного очага в связи с отсутствием здесь природного газа - при 35 %  $O_2$  в дутье градиент температуры верхней и нижней части зоны горения составляет 1700°C.

На основе отборов газа и замера температуры по высоте шахты доменных печей комбината "Криворожсталь" (5 горизонтов) и НЛДМК (1 горизонт) установлено наличие неравномерности содержания водорода в газе на всех горизонтах по высоте печи в периферийной и центральной зонах, но по мере подъема газа это различие уменьшается (в распаре - 2,5 раза, под защитными плитами колошника - 1,5-1,7 раза) за счет снижения его количества в центральной зоне печи. Получено экспериментальное доказательство развития отсоса газа в центральную часть по высоте печи, поскольку здесь содержание  $H_2$  по высоте печи сохраняется неизменным при развитии в этой зоне косвенного восстановления за счет CO и  $H_2$  (согласно расчетам для печи комбината "Криворожсталь" при содержании  $O_2$  в дутье 23,8 % количество газа в центре колошника возрастает примерно вдвое по сравнению с горизонтом распара). На основе замеров давления газа в верхней части шахты и расчетов его расхода по сечению распара было установлено наличие перераспределения газового потока при движении от горна к колошнику в соответствии с порозностью столба шахты, что подтверждает выводы теоретического анализа процесса.

Исследования содержания  $CO_2$  в газе и температуры по высоте шахты показывают, что движение рудного гребня к распару происходит параллельно стенке, а далее к фурмам - по вертикальной прямой, что соответствует принятой выше схеме в расчетно-теоретических исследованиях.

Данные расчетов тепловых балансов подтвердили факт относительного увеличения расхода в единицу времени тепла в высокотемпературной зоне

с повышением параметров дутья при общей экономии тепловых затрат на выплавку единицы чугуна. К особенностям процесса относятся:

экспоненциальное снижение показателя степени прямого восстановления  $2d$  с увеличением содержания кислорода в дутье (при 40 %  $O_2$  значение  $2d$  составило 8,0 %);

восстановление оксидов за счет водорода возрастает на 2 % на каждый дополнительный 1 %  $O_2$  и при обогащении дутья до 40 %  $O_2$  примерно половина кислорода шихты отбирается водородом природного газа;

степень использования  $H_2$  в восстановительных реакциях до 40 %  $O_2$  в дутье, не ухудшается и составляет 35,9-46,9 %;

доля углерода кокса, сжигаемого на фурмах, возрастает на 0,8 % на 1 %  $O_2$  в дутье, достигая 76,5 % при содержании кислорода в дутье 40 %.

Исследования процессов в доменных печах подтвердили теоретические предпосылки развития тепловых, газодинамических и восстановительных процессов при применении комбинированного дутья.

Положительные результаты, достигнутые уже в первых опытах на ДМК, обусловили широкое распространение этой технологии и к 1963 г. природный газ применялся на всех металлургических предприятиях Украины. После опытных плавки на комбинатах "Криворожсталь" и Новолипецком темпы внедрения комбинированного дутья усилились и с 1972 г. по 1986 г. годовые расходы природного газа и кислорода на производство чугуна суммарно по Украине и России возросли соответственно с 4,7 до 11,6 млрд. м<sup>3</sup> и с 1,9 до 12,5 млрд. м<sup>3</sup>. На Украине высокая концентрация кислорода в дутье доменных печей применяется на доменных печах Енакиевского металлургического комбината (27,8 %, 1990 г.), на печи объемом 5000 м<sup>3</sup> комбината "Криворожсталь" (29,8 %, 1990 г.). Широкое применение получила технология плавки на высоких параметрах комбинированного дутья на доменных печах НЛМК - в 1990 г. среднее содержание кислорода в дутье по 6-ти печам составило 32 %, а в отдельные периоды (3-4 месяца) концентрация кислорода в дутье повышается до 40 %. На НЛМК за счет применения кислорода и природного газа ежегодно дополнительно выплавляется около 1,8 млн. тонн чугуна (около 20 % общего производства) и экономится около 1,0 млн. тонн кокса. Режим плавки с обогащением дутья кислородом до 35 % заложен в проекты крупнейших доменных печей, введенных в эксплуатацию в 1975-1988 г.г. - печи объемом 5000 м<sup>3</sup> комбината "Криворожсталь" и 5500 м<sup>3</sup> Череповецкого металлургического комбината.

В периоды опытных плавов на комбинатах им. Дзержинского, "Кри-  
ворожсталь" и Новолипецком внедрялись рекомендации по совершенст-  
вованию параметров технологического режима, а общий экономический  
эффект за 12 опытных периодов составил в ценах 1980 г. 9026,3 тыс.  
рублей.

Расчетные проработки Гипромега, выполненные в 1980 г., пока-  
зали, что производство 1 тонны чугуна при обогащении дутья кисло-  
родом до 35 % обходится дешевле по сравнению с стоимостью чугуна,  
полученного на печах объемом 5000 м<sup>3</sup> как для условий Украины, так  
и для Российской Федерации.

В настоящее время доменные печи Украины объемом 1410 м<sup>3</sup> и менее  
не соответствуют современному уровню доменного производства -  
удельная производительность ниже примерно на 20 %, а расход кокса  
выше на 35-40 кг/т чугуна по сравнению с работой печей объемом  
1513-5000 м<sup>3</sup>. Расчеты показывают, что при выводе из эксплуатации  
7 устаревших доменных печей потери производства могут быть скомпен-  
сированы увеличением кислорода на остальных 48 доменных печах  
за счет повышения среднего содержания кислорода в дутье на 5,0 %,  
при этом может быть получена экономия кокса не менее 5 % (около  
25-30 кг/т чугуна). Повышению экономичности применения комбиниро-  
ванного дутья способствуют совершенствование режима работы кисло-  
родных блоков с полным извлечением редких газов, сокращение потерь  
кислорода, улучшение качества железорудного сырья. Следует отме-  
тить, что внедрение новой технологии потребует реконструкции сис-  
тем шихтоподачи, охлаждения, трактов природного газа и кислорода,  
особо необходимо разработать мероприятия по увеличению давления  
природного газа до 12-15 МПа.

Разработанная технология высококонцентрационного процесса произ-  
водства чугуна не имеет аналогов за рубежом - в отдельных опытных  
плавках концентрация кислорода в дутье не превышала 30 %. Необходи-  
мо также указать, что большинство разработанных методов управле-  
ния пригодны и эффективны при применении мазута или пылеугольного  
топлива, что расширяет технологический диапазон и возможности пред-  
ставленной работы.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главная задача исследований представленной диссертации сос-  
тоит в создании научной основы для решения крупной народнохозяй-  
ственной проблемы - достижения значительного снижения расхода

кокса и увеличения (или сохранения) объема производства чугуна путем кардинального совершенствования восстановительных, теплообменных и газодинамических условий процесса доменной плавки.

Поставленная задача решена путем проведения теоретических и опытно-промышленных исследований развития высокотемпературных процессов и практического внедрения предложенных технологических режимов при применении природного газа и дутья с концентрацией кислорода 25–40 %, что является доказательством объективности и надежности полученных теоретических результатов и эффективности комбинированного дутья высоких параметров. Улучшение качества сырья и топлива является не альтернативой комбинированного дутья, а дополнительным резервом улучшения показателей доменного производства.

Основу предложенных технологических решений и методов управления составляют результаты теоретических, экспериментальных и опытно-промышленных исследований доменного процесса, проведенных на современных доменных печах Украины и Российской Федерации.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом.

3.1. На основании теоретического анализа развития высокотемпературных процессов и опытно-промышленных исследований созданы научные основы высокоинтенсивной технологии доменной плавки на основе применения природного газа и дутья с широким диапазоном обогащения его кислородом (до 40–45 %), что позволяет решить крупную научно-техническую и народнохозяйственную проблему по снижению расхода металлургического кокса на 15–20 % и увеличения производства чугуна на существующих доменных печах на 30–35 %.

3.2. Предложены рациональные газодинамические режимы плавки, обусловленные фильтрационной способностью столба шихты и характеризующиеся изменением выхода горновых газов  $\Delta V_G$  в единицу времени с увеличением обогащения дутья кислородом на 1 %, а именно - объем газов остается неизменным, величина  $\Delta V_G$  возрастает пропорционально приращению содержания кислорода в дутье ( $\Delta V_G = 1,0\%$ ) сохранение кинетической энергии дутья ( $\Delta V_G = 1,2 - 2,1\%$ ) и сохранение расхода дутья ( $\Delta V_G = 1,6-3,7\%$ ).

3.3. На основе разработанного метода анализа установлены закономерности изменений природста производительности и уменьшения удельного расхода кокса на 1 %  $O_2$  в дутье в зависимости от интенсификации процесса.

Максимальная экономия кокса достигается при сохранении началь-

ного объема горновых газов с повышением содержания кислорода в дутье - на 1 %  $O_2$  она составляет 1,43 % при приросте производительности 1,5 %, тогда как при постоянстве расхода дутья эти показатели ( $\Delta P$  и  $\Delta K$ ) составляют соответственно 1,17 % и 4,0 %.

Наиболее значительный прирост производства чугуна достигается в диапазоне 26-35 %  $O_2$  в дутье, а экономии кокса - при 21-25 %  $O_2$ , т.е. экстремальные величины этих показателей не совпадают. При концентрации кислорода в дутье более 32-33 % режим плавки с постоянным объемом горновых газов является предпочтительным с точки зрения экономии кокса по сравнению с более интенсивными режимами даже с повышенным расходом природного газа (до  $0,7 \text{ м}^3/\text{м}^3$  кислорода). Технология комбинированного дутья обладает уникальным свойством - возможностью варьирования в широких пределах приростом производства чугуна или снижением удельного расхода кокса, что позволяет целенаправленно выбирать соответствующие режимы в зависимости от производственных задач и условий плавки.

3.4. Показано, что существует определенный диапазон предельных концентраций кислорода, определяемый совокупностью факторов - потерей жидкотекучести первичного шлака при содержании  $FeO$  ниже 4-5 % (значение  $Z_d$  равно 1,5-2,0%), загрязнением горна при уменьшении кинетической энергии дутья ниже 70 %, вырождением верхней ступени теплообмена, увеличением выхода горновых газов более  $3 \text{ м}^3/\text{м}^3$  мин и минимальным коэффициентом замены кокса природным газом, не обеспечивающим снижение себестоимости чугуна. В зависимости от конкретных условий плавки предельный уровень обогащения дутья кислородом может находиться в диапазоне 42,0-93,3 %. Длительные опытные плавки подтвердили реальность и достоверность этого прогноза об эффективности предлагаемых режимов с обогащением дутья кислородом до 40 %.

3.5. Обоснованы количественные закономерности образования в единицу времени монооксида кремния ( $SiO$ ) в нижней части печи - на 1%  $O_2$  количество его возрастает на 1,6 % и при концентрации кислорода 35 % около 30 % содержащегося в шихте  $SiO_2$  переходит в  $SiO$ , из которого только около 10 % участвует в реакции восстановления кремния. Тепловые затраты на этот процесс в этих условиях составляют около 20 % от их общей величины в высокотемпературной зоне печи.

3.6. Проанализированы изменения тепловых высокотемпературных затрат при различных параметрах комбинированного дутья - при содер-

жании кислорода в дутье более 25 % они возрастают на 0,2-0,3 % на каждый дополнительный 1 %  $O_2$  в дутье.

3.7. Разработаны методы расчета концентрационных полей метана в полости воздушной фурмы и окислительной зоне на основе теории взаимодействия двух газовых потоков и оценки степени окисления  $CH_4$  в  $CO$  и  $H_2$  при различных способах подвода природного газа в дутье.

3.8. На основе анализа процесса смесеобразования и экспериментального изучения состава газа в фурме разработаны технологические требования к конструкции подвода природного газа, обеспечивающую подачу струи газа и его производных в зону максимальной рудной нагрузки и требуемую эксплуатационную надежность.

3.9. Предложена новая концепция формирования зоны горения, как специфической формы неизотермической струи, кривизна которой определяется критерием, отражающим влияние температурных условий и различия состава газовой фазы. Окислительные зоны на горизонте фурм не соприкасаются и их взаимное перекрытие имеет место в зоне заплечиков на высоте 0,5-0,8 м с образованием сплошного кольца по окружности печи.

3.10. Исследовано движение газового потока в шахте доменной печи на основе двухмерной математической модели при изменении как порозности материалов, так и профиля скоростей газового потока по сечению печ. При наличии канала происходит интенсивный отсос газа в эту зону с увеличением его скорости до величины, приводящих к выбросу рудных материалов.

3.11. Показано, что в окислительных очагах интенсивно развивается вторичное окисление чугуна и на каждый 1%  $O_2$  в дутье количество вторичное  $FeO$  возрастает на 1,5-2,5 %; при обогащении дутья до 35 %  $O_2$  этому процессу подвергается около 50 % выплавленного чугуна.

3.12. Созданы теоретические основы движения рудных материалов по высоте печи и на этой базе рассмотрены различные варианты взаимодействия рудного гребня и фурменных очагов, что определяет форму пластической зоны и характер развития высокотемпературных процессов.

3.13. Проведены широкомасштабные промышленные исследования в зоне горна, подтвердившие результаты теоретических разработок, а именно:

в полости фурмы развивается процесс смесеобразования дутья и метана в соответствии с расчетной схемой без заметного окисления углеводородов, что предопределяет распределение их производных по сечению г. гча;

с увеличением концентрации кислорода в дутье окисление углеводородов сдвигается в сторону образования CO и  $H_2$  и при 35 %  $O_2$  содержание водорода в фурменном очаге возрастает до 20-25 %;

изменения конфигурации фурменных очагов подчиняются закономерностям неизотермической струи, в области заплечиков они смыкаются, образуя окислительное кольцо;

температура в фокусе горения изменяется пропорционально величине теоретической температуре горения; с увеличением интенсивности плавки различие их возрастает от 40-60°C до 180-210°C;

вторичное окисление интенсивно развивается в нижней части фурменных очагов, где происходит дутье без примеси природного газа и на каждый 1 %  $O_2$  в дутье содержание вторичное FeO возрастает на 1,6 %;

повышение теоретической температуры горения на 100°C приводит к увеличению температуры чугуна на выпуск на 20°C;

доказана криволинейность траектории движения рудного гребня по высоте печи.

3.14. На основе проведенных исследований разработаны технологические способы управления режимом плавки, состоящие в следующем: газодинамический режим плавки устанавливается в зависимости от фракционного состава шихты или выбирается с учетом производственных задач;

стабилизируется тепловое состояние горна путем изменения теоретической температуры горения в пределах на 3-19°C на 1%  $O_2$  в зависимости от принятого режима плавки;

стабилизируется нижняя граница фурменной струи за счет изменения диаметра воздушной фурмы;

производится согласование положения рудного гребня с конфигураций фурменного очага, при котором область с максимальной рудной нагрузкой проходит в горне через фокус горения;

применяются мероприятия по обеспечению максимального использования природного газа и устойчивого хода печи - рационализируется подвод природного газа и устанавливается максимальная масса подачи.

3.15. Проведены промышленные плавки на доменных печах объемом 1386-5000 м<sup>3</sup> комбинатов им.Д.ержинского, Новолипецком и "Криворож-сталь" в диапазоне обогащения дутья кислородом 24-40 %. Результаты опытных плавок практически совпали с расчетно-теоретическими прогнозами и подтвердили их обоснованность и достоверность - на 1%  $O_2$  прирост производства и экономия кокса составили соответственно

1,9–2,0 % и 0,9–1,6 %. На доменных печах НЛМК режимы с высокими параметрами дутья по кислороду – 35–40 % + внедрены с 1971 г. на всех печах доменных цехов № 1 и № 2 и ежегодный прирост выплавки чугуна за счет кислорода составлял около 1,25 млн. тонн (около 2,1% от общего объема его производства на НЛМК). На печах объемом 2000 м<sup>3</sup> НЛМК при 40 % O<sub>2</sub> в дутье удельная производительность достигала 2,5 т/м<sup>3</sup>сутки, а удельный расход кокса снижался до 405–410 кг/т чугуна.

3.16. В процессе проведения опытных плавки с участием автора разработаны предложения по усовершенствованию технологического оборудования и повышению надежности его работы в эксплуатационных условиях – системы шихтоподачи, трактов подвода природного газа и дутья, повышению давления природного газа и др.

3.17. Показано, что технология доменной плавки на комбинированном дутье является одним из наиболее эффективных направлений развития доменного производства на ближайшую перспективу – по данным Гипромега выплавка 1 т чугуна при 35 % O<sub>2</sub> в дутье дешевле на 4,83–6,73 руб. (в ценах 1980 г.) по сравнению со стоимостью чугуна, выплавленного на печи объемом 5000 м<sup>3</sup>. В современных условиях работы доменных печей Украины при соотношении стоимостей природного газа и кокса равном 1:2 эффективность комбинированного дутья высоких параметров обеспечивается. Расчетный анализ показывает перспективность применения нового режима доменной плавки для повышения технического уровня доменного производства Украины.

3.18. Долевой экономический эффект автора от внедрения результатов диссертационной работы в ценах 1980 г. составляет 4313,6 тыс. руб. Для условий Украины может быть обеспечен дополнительный эффект при внедрении рекомендаций без применения природного газа.

3.19. Изложенные в диссертационной работе исследования и достигнутые результаты в виде разработанных теоретических описаний развития высокотемпературных процессов и практических технологических решений по увеличению эффективности современного доменного производства Украины, как наиболее энергоемкого в металлургической промышленности, соответствуют утвердившимся в настоящее время основным направлениям научно-технического прогресса в народном хозяйстве Украины. Практическая ценность работы и достоверность её результатов подтверждается значительным экономическим эффектом, полученным при внедрении технологических режимов с высокими параметрами комбинированного дутья.

В связи с этим совокупность представленных в диссертации исследований и разработок позволяет квалифицировать её как научный труд, в котором изложены научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса и имеет весомое народнохозяйственное значение.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Некрасов З.И., Москалина Ф.Н. Исследование состава газозооной смеси в фурменном приборе при работе доменной печи на комбинированном дутье // Науч. труды ИЧМ. - Выпуск 13. - Из-во АН УССР, 1960. - С.34-49.

2. Некрасов З.И., Москалина Ф.Н. Состав газа в горне доменной печи при работе на природном газе и обычном дутье // Сталь. - 1962. - № 9. - С.773-776.

3. Некрасов З.И., Москалина Ф.Н. Зональные балансы доменной плавки при работе на атмосферном и комбинированном дутье // Интенсификация доменного процесса: Науч. тр. ИЧМ / ИЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1969. - Том.32. - С.87-100.

4. Некрасов З.И., Москалина Ф.Н. К вопросу о кинетической энергии дутья в условиях обогащения его кислородом // Интенсификация доменного процесса: Научные труды ИЧМ, том 32 / ИЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1969. - С.100-103.

5. З.И.Некрасов, П.Г.Петребо, Ф.Н.Москалина, Е.А.Козаков, Н.М.Можаренко. Опытная плавка в доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> при обогащении дутья кислородом до 30 % // Сталь. - 1971. - № 10. - С.887-894.

6. З.И.Некрасов, С.В.Колпаков, В.Ф.Андреев, Ф.Н.Москалина, Г.Б.Рабинович, Н.М.Можаренко, С.В.Васильев. Опытные плавки в доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> на дутье с концентрацией кислорода до 35 % // Сталь. - 1973. - № 2. - С.97-104.

7. Некрасов З.И., Можаренко Н.М., Москалина Ф.Н. Работа газов в шахте доменной печи объемом 2700 м<sup>3</sup> при применении дутья с концентрацией кислорода до 30 % // Металлургия чугуна: Темат.об.науч. тр. / ИЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1973. - № 1. - С.56-69.

8. Некрасов З.И., Москалина Ф.Н. Материальные и тепловые балансы доменной плавки при применении комбинированного дутья с концентрацией кислорода 27 и 35 % // Доменное производство: Темат.об.науч. тр. / ИЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1975. - № 2. - С.59-69.

9. Некрасов Э.И., Москалина Ф.Н., Можаренко Н.М., Т.Б.Рабинович, С.В.Басильев. Особенности процессов в шахте доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> при концентрации кислорода в дутье 35 % // Доменное производство: Темат.об.научн.тр. № 2 / МЧМ СССР. М.: Metallургия, 1975. - С.38-48.

10. Некрасов Э.И., Бузовера М.Т., Москалина Ф.Н., В.А.Шатлов, Э.А.Шепетовский. Восстановительно-тепловая работа газов в доменной печи, рабо авшей на комбинированном дутье, содержащем до 32 % кислорода // Metallургическая и горнорудная промышленность. - 1977. - № 4. - С.3-6.

11. Врублевский В.В. и Москалина Ф.Н. Величина окислительных зон и работа доменных печей // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема: Темат.отрасл.сб. № 3 / МЧМ СССР. - М.: Metallургия, 1977. - С.20-29.

12. Некрасов Э.И., Истремко П.Г., Бузовера М.Т., Москалина Ф.Н. Доменная плавка на комбинированном дутье, содержащем 30-32 % кислорода // Сталь. - 1978. - № 4. - С.306-310.

13. Москалина Ф.Н., Ровенский М.И. О рациональной конструкции ввода пргодного газа в дутье для воздушной фурмы доменной печи // Интенсификация процессов доменной печи и освоение печей большого объема: Темат.отрасл.сб. № 5 / МЧМ СССР. - М.: Metallургия, 1979. - С.52-54.

14. Некрасов Э.И., Можаренко Н.М., Москалина Ф.Н., Антипов Н.С., Мещеряков А.А., Цилмерман А.Ф. Опытные плавки с обогащением дутья кислородом до 40 % // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема: Темат.отрасл.сб. № 5. // МЧМ СССР. - М.: Metallургия, 1979. - С.38-40.

15. Москалина Ф.Н., Антипов Н.С., Шепетовский Э.А., Пухов А.П. Работа доменных печей НЛМЗ при увеличении содержания кислорода в дутье от 22 до 26 % // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема: Темат.отрасл.сб. № 5 / МЧМ СССР. - М.: Metallургия, 1979. - С.35-38.

16. Шепетовский Э.А., Москалина Ф.Н., Антипов Н.С., Урбанович Г.И. Состав газа и расплава в горне доменной печи объемом 3200 м<sup>3</sup> // Сталь. - 1981. - № 5. - С.8-10.

17. Некрасов Э.И., Бузовера М.Т., Москалина Ф.Н., Хомич И.Г., Покрышкин В.А. Исследование распределения шихтовых материалов в шахте доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> Криворожского металлургического завода // Сталь. - 1981. - № 9. - С.13-15.

18. З.И.Некрасов, Н.С.Антипов, Ч.М.Можаренко, Ф.Н.Москалина, Первый опыт работы доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> НЛМЗ с обогащением дутья кислородом до 40 % // Сталь. - 1981. - № 7. - С.7-9.

19. Ф.Н.Москалина, И.Г.Хомич, М.Д.Жембус, А.Г.Ульянов. Освоение доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> // Опыт эксплуатации доменных печей объемом 3000 м<sup>3</sup> и более: Темат. сб. науч. тр. / МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1982. - С.5-14.

20. Москалина Ф.Н., Можаренко Ч.М. Применение комбинированного дутья высоких параметров в доменной плавке // Обзорная информация/Ин-т "Черметинформация". - Сер. Подготовка сырых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна. - Вл.З. - 1983. - 19 с.

21. Бузovery М.Т., Москалина Ф.Н., Тарановский В.В. Исследование состава газа и температуры в шахте доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> // Вопросы теории и практики производства чугуна: Темат. сб. науч. трудов / МЧМ СССР. М.: Металлургия, 1983. - С.34-44.

22. В.И.Елисеев, К.М.Коваль, Ф.Н.Москалина, Э.С.Хомяков. Движение газа в верхней части доменной печи // Вопросы теории и практики производства чугуна. Темат.отрасл.сб. / МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1983. - С.61-67.

23. Москалина Ф.Н. Конфигурация фурменных очагов в горне доменной печи / Институт черной металлургии. - Днепропетровск. - 8с.; Библиогр.4 назв. - Рус.-Деп. в "Черметинформации" 26.12.85 №3222-чм.

24. Москалина Ф.Н., Пухов А.П., Капорулин В.В., Можаренко Н.М., Урбанович Г.И. Работа доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> НЛМК при концентрации кислорода в дутье 40 % // Сталь. - 1985. - № 8. - С.17-20.

25. Москалина Ф.Н. Оптимальные параметры фурменной струи в современных условиях доменной плавки / Институт черной металлургии. - Днепропетровск, 1985. - 3 с.; Библиогр.4 назв. Рус.-Деп. в "Черметинформации" 26.12.85, № 3221-чм.

26. Ф.Н.Москалина. Газодинамические режимы доменной плавки при применении комбинированного дутья / Ин-т черн.металлургии. - Днепропетровск, 1985. - II с.; Библиогр.4 назв. Рус. - Деп. в "Черметинформация" 26.12.85 г., № 3219-чм.

27. Москалина Ф.Н. Теоретические основы формирования фурменных газов в доменной печи при высоких параметрах комбинированного дутья / Институт черной металлургии. - Днепропетровск, 1986. - 22 с.; Библиогр.18 назв. - Рус. - Деп. в "Черметинформации" 26.08.86, № 3563-чм.

28. Москалина Ф.Н. Расчетно-теоретическое исследование взаимодействия струи природного газа и высокообогащенного кислородом дутья в горне доменной печи / Институт черной металлургии. - Днепропетровск, 1986. - 14 с.; Библиогр. II назв. - Рус. - Деп. в "Черметинформация" 10.08.86, № 3518-чм.

29. Москалина Ф.Н. Развитие процессов в фурменных очагах доменной печи при высоких параметрах комбинированного дутья / Институт черной металлургии. - Днепропетровск, 1986. - 36 с.; Библиогр. IЕ назв. - Рус. - Деп. в "Черметинформация" 26.09.86, № 3635-чм.

30. А.Г.Ульянов, Ф.Н.Москалина. Работа доменной печи на комбинированном дутье высоких параметров. Доклад на Европейском конгрессе доменщиков, 14-17 сентября 1986 г., г.Аахен, ФРГ. Том 2, раздел IV/A.

31. Москалина Ф.Н. Тепловые балансы высокотемпературной зоны доменной печи при предельных параметрах комбинированного дутья / Институт черной металлургии. - Днепропетровск, 1986. - 13 с.; Библиогр. 23 назв. Рус. - Деп. в "Черметинформация" 10.12.86 г., № 3712-чм.

32. Ф.Н.Москалина. Теоретический анализ эффективности применения в доменной плавке комбинированного дутья / Институт черной металлургии. - Днепропетровск, 1987. - II с.; Библиогр. IO назв. - Рус. - Деп. в "Черметинформация".

33. Москалина Ф.Н. Оценка показателей доменной плавки при комбинированном дутье // Совершенствование технологии доменного производства: Темат. сб. науч. тр. / МЧМ СССР. - М.: Металлургия, 1988. - С. 63-65.

34. Москалина Ф.Н. Оптимизация теплового режима доменной печи при комбинированном дутье / Институт черной металлургии. - Днепропетровск, 1988. - 26 с.; Библиогр. I4 назв. - Рус. - Деп. в "Черметинформация" 27.05.88, № 4493-чм.

35. Москалина Ф.Н. Особенности теплообмена в доменной печи при комбинированном дутье / Институт черной металлургии, 1983. - 37 с.; Библиогр. 9 назв. - Рус. - Деп. в "Черметинформация" 27.05.88, № 4495-чм.

36. К.М.Коваль, В.И.Елисейев, А.П.Толстомят, Ф.Н.Москалина. Экспериментальные исследования движения газа в слое кусковых материалов при наличии канала // Металлургия и коксохимия. Респ. межвед. науч.-техн. сб. / МВ ССВ УССР. - К.: Техника, 1988. - Выпуск 95. - С. 44-46.

37. Москалина Ф.Н. Регулирование теоретической температуры горения при изменении технологических условий работы доменной печи // Технология выплавки чугуна: Темат. сб. научн. трудов / ММ СССР. - М.: Металлургия, 1989. - С.59-62.

По теме диссертации получены авторские свидетельства СССР № 910766, 1186635.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $P_0, K_0$  - производительность печи (т/мин) и удельный расход кокса (кг/т чугуна);  
 $\Delta P, \Delta K$  - изменение производительности и расхода кокса на 1%  $O_2$  (доли единицы);  
 $\beta_K$  - содержание золы в коксе, ед.;  
 $\alpha_{SiO_2}$  - содержание  $SiO_2$  в золе кокса, ед.;  
 $\Delta \alpha_{SiO_2}$  - прирост содержания  $O_2$  в дутье, ед.;  
 $u$  - выход шлака, кг/т чугуна;  
 $\% SiO_2$  - содержание  $SiO_2$  в шлаке, ед.;  
 $x, y$  - текущие координаты;  
 $r_{фр}$  - радиус воздушной фурмы, м;  
 $\tilde{u}$  - приведенная скорость дутья ( $\tilde{u} = u_0/2$ ), м/с;  
 $u_0$  - фактическая скорость дутья, м/с;  
 $\rho_{стр}, \rho_{окр}$  - плотность газа струи и окружающей среды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $T_{стр}, T_{окр}$  - теоретическая температура горения и окружающей среды, К;  
 $h$  - высота подъема струи, м;  
 $S$  - длина осевой траектории, м;  
 $\alpha$  - угол раскрытия фурменной струи, град.;  
 $\alpha_{ш}$  - угол наклона шахты, град.;  
 $R_p, R_r$  - радиусы распара и горна, м;  
 $h_p, h_3$  - высоты распара и залечиков, м;  
 $H$  - высота эллипсоидов разрыхления, м;  
 $\gamma_p$  - насыпной вес рудных материалов, т/м<sup>3</sup>;  
 $\Delta P_r^0, \Delta P_r$  - перепад давления газа на 1 м рудных материалов и на 1 м высоты печи;  
 $V_{пр}$  - расход природного газа на одну фурму, м<sup>3</sup>/час;  
 $n$  - соотношение скоростей дутья и газа ( $n = w_d/w_{пр}$ );  
 $P_{пр}$  - давление природного газа, МПа.



1161960

AB 29.396