

043  
600.16

Б 81

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Аспирант БОНДАРЕНКО А.И.

ВЛИЯНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ  
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Специальность 321

"Металлургия черных металлов"

Автореферат  
диссертации на соискание учёной  
степени кандидата технических наук

Челябинск, 1969 г.

ЧПИ

669.162.25

Работа выполнена на кафедре металлургии черных металлов  
Челябинского политехнического института.

Научный руководитель - и.о. профессора, кандидат технических наук Остроухов М.Я.

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук Стефанович М.А.; доцент, кандидат технических наук Греков П.Н.

Ведущее предприятие - Челябинский металлургический завод.

Автореферат разослан "5 марта 1969 г.

Защита диссертации состоится "9 апреля 1969 г.  
на заседании Совета по присуждению ученых степеней Челябинского политехнического института (г. Челябинск, проспект имени В.И.Ленина, 76, главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать отзыв (отзыв присыпается в 2-х экземплярах, заверенных печатью).

Ученый секретарь Совета,  
доцент, канд. техн. наук

*В.Гончар* ( Гончар В.Н.)

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ С С С Р



ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
На правах рукописи

Аспирант БОНДАРЕНКО А.И.

ВЛИЯНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ  
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Специальность 321 05.16.02  
"Металлургия черных металлов"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

674514

Челябинск, 1969 г.

Работа выполнена на кафедре металлургии черных металлов  
Челябинского политехнического института.

Научный руководитель - и.о. профессора, кандидат технических наук Острожухов М.Я.

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук Стефанович М.А.; доцент, кандидат технических наук Греков П.Н.

Ведущее предприятие - Челябинский металлургический завод.

Автореферат разослан " " 1969 г.

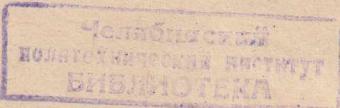
Защита диссертации состоится " " 1969 г.  
на заседании Совета по присуждению ученых степеней Челябинского политехнического института (г. Челябинск, проспект имени В.И.Ленина, 76, главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать отзыв (отзыв присыпается в 2-х экземплярах, заверенных печатью).

Ученый секретарь Совета,  
доцент, канд.техн.наук

*Гончар* ( Гончар В.Н. )



Создание материально-технической базы коммунизма в СССР требует дальнейшего роста производства черных металлов, что в свою очередь связано с увеличением выплавки чугуна.

Развитие производства чугуна осуществляется как путем повышения производительности существующих доменных печей (реконструкция, улучшение подготовки сырья и совершенствование технологии), так и за счет ввода в действие новых агрегатов. При этом осуществляется курс на строительство мощных доменных печей - полсажным объемом 2000 м<sup>3</sup> и более.

Опыт эксплуатации больших доменных печей показал высокую экономическую эффективность их работы. В то же время было установлено, что с ростом размеров печей показатели интенсивности плавки ухудшаются. Это обстоятельство снижает эффективность работы больших печей.

Вопросы интенсивности работы печей различного объема рассматриваются в работах М.А.Павлова, А.Н.Рамма, Н.К.Леонидова, М.А.Стефановича, Н.И.Красавцева, Л.Г.Шумакова, И.И.Коробова, М.Я.Островского, В.И.Логинова и др.

Интенсивность работы доменных печей определяется аэродинамическими факторами, которые включают:

1) Условия движения газов в слое материалов-режим движения газов, степень неравномерности распределения газов по сечениям слоя, наличие жидкой фазы в слое материалов, внутреннее очертание рабочего пространства (профиль) печи.

2) Условия входа газа в слой и выхода из него. При периферийном подводе дутья, что имеет место в доменной печи, большое значение приобретает выбор необходимого числа и сечения воздушных фурм.

На интенсивность плавки значительное влияние оказывают также условия движения материалов от колошника к горну доменной печи.

В данной работе ставится задача путем теоретического анализа и экспериментальных исследований изучить вопросы аэродинамики, оказывающие существенное влияние на интенсивность доменной плавки.

К ним относятся:

I) Исследование режима движения газов в доменной печи и оценка влияния различных параметров столба материалов и газово-го потока на интенсивность доменной плавки.

2) Выявление характера и причин изменения интенсивности работы доменных печей при изменении их абсолютных размеров; внесение необходимых корректировок в методику расчета профиля и в определение числа и сечение воздушных фурм для печей различного объема.

### I. Исследование аэродинамики подвижного горящего слоя.

Целью этого исследования явилось изучение гидравлического сопротивления опускающегося и горящего слоя и влияние на потери напора газов жидкой фазы — шлака и чугуна.

Для экспериментов использовалась установка цилиндрического профиля — шахтная печь типа вагранки — с внутренним диаметром 400 мм и высотой 3000 мм.

Опыты проводились с коксом фракции 15-25, 25-35 и 35-45 мм. Используемые в опытах материалы — дробленный шлак, чугун и известняк — имели такой же размер кусков, как кокс, с которым они совместно применялись.

Уровень засыпи во время опытов поддерживался постоянным. Дутье от заводского компрессора с максимальным расходом до 300 м<sup>3</sup>/час подводилось через кольцевой воздухопровод и фурмы, расположенные на высоте 500 мм от подины.

По высоте установки через каждые 20-40 см были сделаны отверстия, в которые вставлялись специальные устройства, позволяющие одновременно измерять температуру, статическое давление и отбирать пробы газа для последующего химического анализа.

Всего было проведено 12 опытов-плавок продолжительностью 2-3 часа каждая. Для каждого случая определялись газодинамические параметры слоя материалов (средний размер кусков, порозность) и газового потока (скорость, удельный вес, вязкость).

Для описания режима движения газов в слое горящего кокса результаты опытов обрабатывались по „струйному“ методу, разработанному в Центральном котло-турбинном институте (ЦКТИ) в координатах:

$$\lambda_{cr} = 1,3 m^{4,2} \Delta P \frac{2\varrho}{g\omega^2} \cdot \frac{\delta}{H} = f(Re_m); \quad (1)$$

$$Re_m = \frac{0,45}{(1-m)m^2} \cdot \frac{U_m \delta}{\eta}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{cr}$  - коэффициент сопротивления;

$m$  - порозность слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$\Delta P$  - потери напора в слое, кг/м<sup>2</sup>;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/сек<sup>2</sup>;

$\delta$  - средний диаметр кусков, м;

$\varrho$  - удельный вес газов, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega$  - скорость газов, отнесенная к полному сечению слоя, м/сек;

$H$  - высота слоя, м;

$Re_{crit}$  - критерий Рейнольдса;

$\eta$  - динамический коэффициент вязкости, кг.м/сек.

Согласно струйной теории, при движении газа через слой материалов имеет место своеобразный режим, отличный от движения в канале или обтекания системы твердых тел. Основным звеном механизма процессов сопротивления и теплопередачи в такой системе является расщепление потока на струи и взаимодействие этих струй между собой и с поверхностью нагрева кусков.

Обработка "струйным" методом данных исследований, проведенных в различных областях техники, позволила сократить разброс точек до  $\pm 25\%$  по сравнению с разбросом более чем  $\pm 100\%$  при обработке по общепринятой методике, что указывает на плодотворность применения струйного метода.

Результаты исследований показали, что режим движения газов в движущемся слое горячего кокса при значениях числа  $Re$ , характерных для нижних и средних горизонтов доменной печи ( $Re_{crit} = 400 - 1350$ ), удовлетворительно описываются уравнениями типа  $\lambda = \frac{A}{Re}$ . При этом показатель степени  $A$  имеет значения, равные 0,4-0,5, что указывает на неустойчивый турбулентный режим движения газов.

Наличие в движущемся слое кокса жидкого шлака в количестве, близкодаемом в доменной плавке, при  $Re_{crit} = 400 - 1350$  не вносит существенных изменений в режим движения газов, а лишь увеличивает величину гидравлического сопротивления слоя.

При проведении опытной плавки смеси кускового чугуна и кокса фракции 30мм в отношении 4:1 по весу (в доменной плавке 2,5-5) пропускная способность воздухонпровода не позволяла получить на установке значений  $Re_{crit}$ , больших 1350.

-4,0 кг чугуна на 1 кг кокса, сгорающего у фурм) не было обнаружено заметного увеличения потери напора газов по сравнению со слоем кокса той же фракции.

Вывод Фернеса о зависимости режима движения газов от их температуры не подтвердился настоящими опытами. Вероятно, причиной такого вывода послужило то обстоятельство, что Фернес не применял при обработке своих данных теории гидравлического подобия, а пользовался графическими зависимостями показателя  $\lambda$  в уравнении  $\lambda = \frac{A}{Re}$  от величины отношения удельного веса к вязкости; при этом из поля зрения выпадали все остальные параметры газового потока и слоя, могущие повлиять на режим движения газов.

Таким образом, наличие теплообмена в слое, обуславливающего неизотермичность газового потока, не влияет на режим движения газов.

Исследования показали также, что при разной величине неравномерности газораспределения (в опытах это достигалось за счет "пристеночного" эффекта, так как отношение диаметра установки к среднему размеру кусков было небольшим и изменялось от 20 до 10) режим движения газов не изменяется и описывается теми же зависимостями  $\lambda = \frac{A}{Re}$ , в которых изменяется лишь величина  $A$ . Однако, если сопоставлять  $\lambda$  и  $Re$  для слоев с разным газораспределением, то это оказывает существенное влияние на зависимость  $\lambda = f(Re)$ .

## 2. Анализ газодинамического режима доменной плавки.

Ввиду сложности протекания физико-химических процессов пока затруднительно полностью моделировать доменную плавку в лабораторных условиях. Поэтому было решено использовать для рас-

чества газодинамики доменной плавки большой экспериментальный материал, накопленный многочисленными исследованиями доменного процесса, проведенными в разное время. Для расчета использовались данные о 94 периодах работы 53 доменных печей СССР, выплавлявших передельный чугун за период 1963-1967г.г. Необходимые расчеты производились с помощью электронно-вычислительной машины.

Параметры газового потока. Аэродинамические параметры газового потока рассчитывали для семи горизонтов по высоте печи (рис. I).

Количество и состав горнового и колошникового (с учетом  $H_2O$ ) газов определялись по формулам А.Н.Рамма, Б.Н.Юрева и Л.В.Юревой, исходя из фактических составов дутья и колошникового газа рассматриваемых 53 печей. Количество и состав газов на остальных горизонтах принимались ориентировочно на основании известных теоретических положений.

Распределение температуры и давления газов по высоте печи принимались в соответствии с данными многочисленных исследований, опубликованных в литературе.

При определении скорости газов для горизонтов распара и низа шахты площадь сечения принималась с учетом 6% разгара кладки.

Динамические коэффициенты вязкости газов, составляющих газовый поток доменной плавки, были вычислены Г.В.Коршиковым и использованы нами с помощью интерполяции для соответствующих составов и температур.

Параметры столба шихты. Порозность слоя материалов для каждого горизонта определяли по результатам замеров времени пребывания газов в печи с корректировкой на величину "рабочего"

(между уровнями фурм и засыпи) объема печи.

Средний размер кусков для горизонта колошника определяли по фактическим рассевам шихтовых материалов; для низа печи - по данным рассевов фурменного кокса, опубликованным в литературе; для остальных горизонтов - ориентировочно.

Затем вычислялись величины  $\lambda_{crp}$  и  $Re_{crp}$ .

#### Изменение газодинамических параметров по высоте печи.

Результаты расчета показывают, что для отдельных случаев величина коэффициента сопротивления  $\lambda_{crp}$  изменяется от 16-60 в нижних горизонтах печи до 0,7-6,0 на колошнике. Число  $Re_{crp}$  при этом изменяется в пределах, соответственно, 500-1500 и 3500-5000. Значительный разброс точек объясняется влиянием неравномерности распределения газов по сечению горизонта.

На рис. I представлены изменения некоторых газодинамических параметров по высоте для пяти групп печей, имеющих различную величину неравномерности газораспределения. Как видно из рисунка, коэффициент  $\lambda_{crp}$  имеет наибольшее значение в нижней части печи, где существенное сопротивление проходу газов оказывает наличие жидкой фазы при высоких скорости и вязкости газового потока. В верхней части печи  $\lambda_{crp}$  имеет наименьшее значение, а число  $Re_{crp}$  - наибольшее, благодаря уменьшению вязкости газа при большой скорости его движения.

#### Зависимость коэффициента сопротивления от числа $Re_{crp}$ .

При графическом сопоставлении усредненных по горизонтам величин  $\lambda_{crp}$  и  $Re_{crp}$  обнаружилось, что для пяти групп печей полученные точки уложились на линии, которые выражаются приближенными уравнениями типа

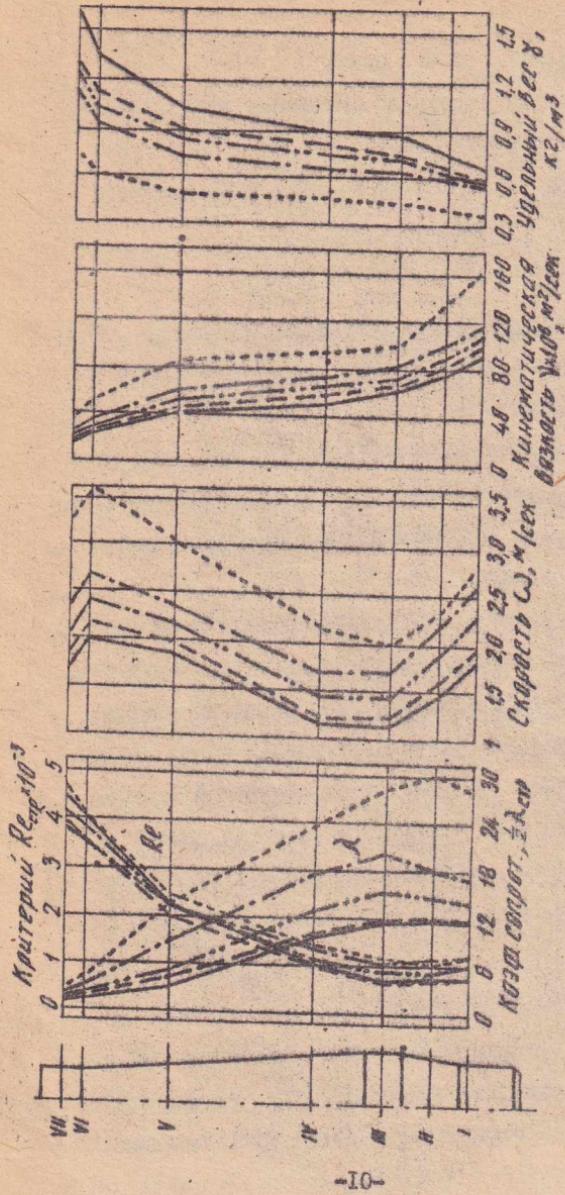


Рис. I. Изменение некоторых газодинамических параметров доменной плавки по высоте печи.

$$\lambda_{crp} = \frac{A}{Re_{crp}} + \frac{B}{Re_{crp}^n}, \quad (3)$$

где А и В - коэффициенты, зависящие от величины неравномерности газораспределения (рис.2).

Уравнение (3) можно заменить рядом более простых выражений типа

$$\lambda_{crp} = \frac{A'}{Re_{crp}^n}. \quad (4)$$

Так, для линии 4 на рис. 2 имеем:

$$\lambda_{crp} = \frac{4677}{Re_{crp}^{0.91}} \quad \text{для участка "горн-низ шахты";}$$

$$\lambda_{crp} = \frac{67610}{Re_{crp}^{1.31}} \quad \text{для участка "низ шахты-верх шахты";}$$

$$\lambda_{crp} = \frac{2 \cdot 10^6}{Re_{crp}^{1.78}} \quad \text{для участка "верх шахты-колошник".}$$

Из этих выражений видно, что при переходе от горизонта к горизонту показатель степени  $n$  изменяется. Более того,  $n$  увеличивается при возрастании числа  $Re$ , что находится в противоречии с общезвестным характером зависимости  $\lambda = f(Re)$ . К тому же величина показателя  $n$  для верхних горизонтов больше единицы, между тем, как  $n = 1$  является предельным для зависимости  $\lambda = f(Re)$  при ламинарном режиме движения газов.

Сопоставляя зависимости  $\lambda_{crp}$  от  $Re_{crp}$  для доменной плавки, для слоя горячего кокса (наши исследования) с зависимостями  $\lambda_{crp} = f(Re_{crp})$  по результатам исследований многих авторов, опубликованных в литературе (рис.3), можно прийти к выводу, что в случае доменной плавки величина показателя  $n$  зависит не только от режима движения газа, но и от изменения величины неравномерности газораспределения при переходе от одного слоя к другому.

Для кусковых засыпок из частиц неправильной формы, продував-

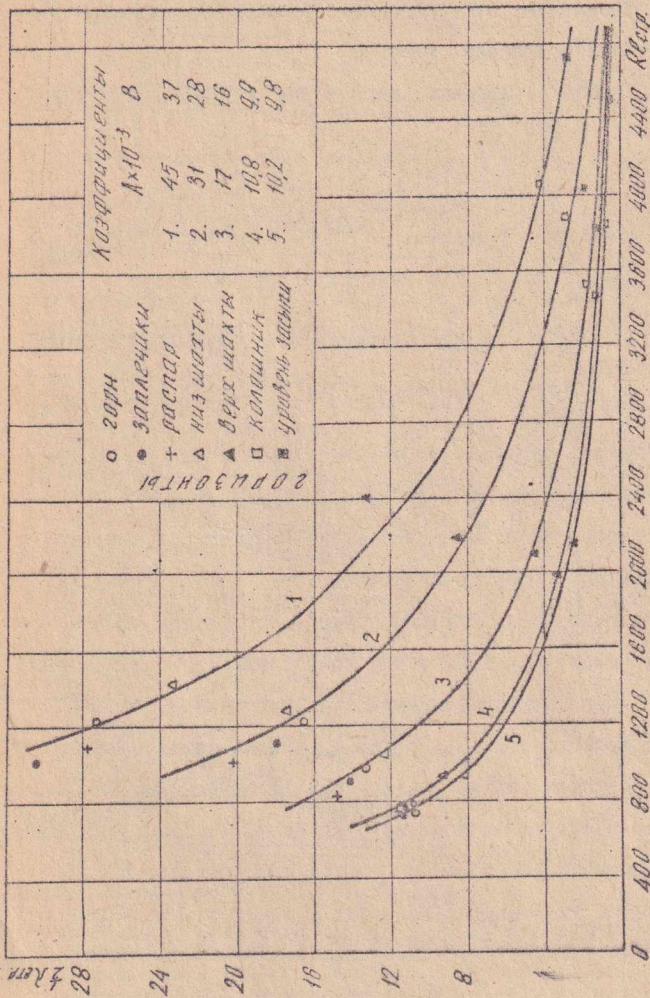


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса для пяти групп печей.

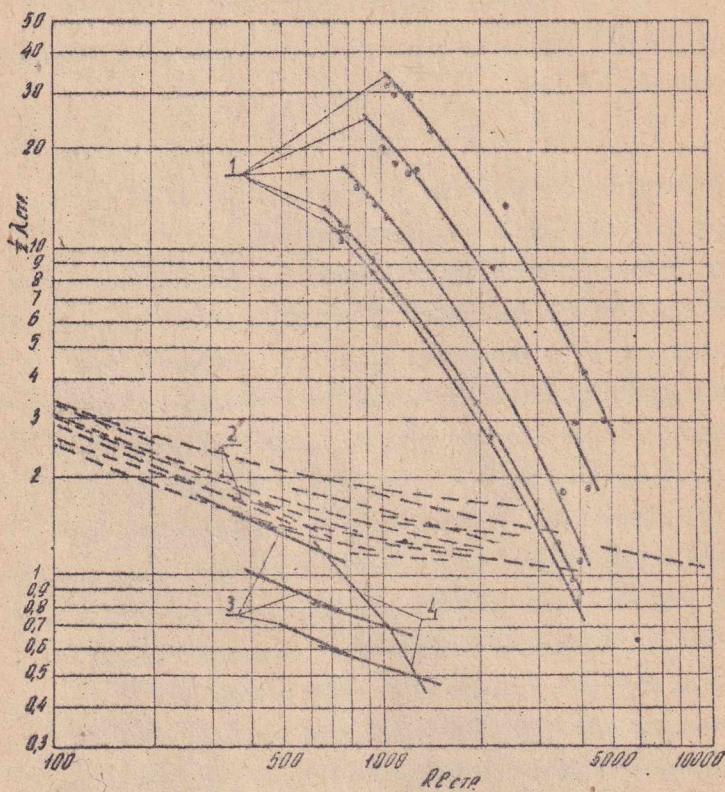


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса для доменной плавки (1), по литературным данным (2), для слоя горящего кокса (3); 4 - линии, соединяющие точки с одинаковым расходом газа при одинаковых температуре и давлении, но с разной неравномерностью газораспределения.

мых равномерно распределенным потоком газа, ЦКТИ дает следующую приближенную зависимость, общую для всего диапазона чисел  $Re$  :

$$\frac{1}{2} \lambda_{crp} = \frac{75}{Re_{crp}} + \frac{15}{\sqrt{Re_{crp}}} + 1 . \quad (5)$$

Это сложное выражение можно заменить семейством более простых зависимостей вида

$$\lambda_{crp} = \frac{A}{Re_{crp}^n} ;$$

при этом значения показателя  $n$  будут изменяться от 1 - при ламинарном режиме, до 0 - при турбулентном.

Для диапазона чисел  $Re_{crp}$ , характерных для доменной плавки (500-5000),  $n$  будет изменяться от 0,6 до 0. Если связать величину показателя  $n$  с изменением числа  $Re$  по высоте печи, то  $n$  будет примерно постоянным (0,6-0,4, в среднем 0,5) для значительного участка доменной печи по высоте - от уровня фурм и до верхней половины шахты - после чего резко уменьшается от 0,4 до 0 (в среднем 0,2) на этом небольшом участке столба шихты.

Если взять на каком-либо участке столба шихты слой материалов элементарной высоты, где неравномерность газораспределения будет постоянна по высоте и во времени, то режим движения газов в нем, при изменении критерия  $Re$  будет описываться обычными зависимостями  $\lambda = f(Re)$ . При переходе к другому слою с иной величиной неравномерности распределения газов также будем иметь обычную зависимость  $\lambda = f(Re)$ , но линии  $\lambda = f(Re)$  будут занимать на графике более высокое или более низкое положение по отношению к предыдущему случаю, смотря по тому, уменьшается или увеличивается степень неравномерности газораспределения.

#### Уравнения для расчета перепада давления газов в столбе материалов доменной печи.

Наиболее точно величина потерь напора газа по высоте столба

материалов в доменной печи может быть выражена уравнением

$$\Delta P = \left( \frac{A}{Re_{cpr}} - \frac{B}{Re_{cpr}^2} \right) \frac{1}{1,3 m^{4,2}} \cdot \frac{8 \omega^2}{2 g} \cdot \frac{H}{\delta} . \quad (6)$$

Уравнение (6) можно заменить менее точным, но более простым выражением согласно (4)

$$\Delta P = \frac{A'}{Re_{cpr}^n} \cdot \frac{1}{1,3 m^{4,2}} \cdot \frac{8 \omega^2}{2 g} \cdot \frac{H}{\delta} ; \quad (7)$$

здесь, кроме упоминавшихся ранее,

$A'$  - коэффициент, зависящий от величины неравномерности газораспределения;

$n$  - показатель степени, учитывающий режим движения газов и изменение неравномерности газораспределения по высоте печи.

В среднем для рассматриваемых 94 периодов работы 53 доменных печей СССР показатель  $n$  равен:

0,9 - для участка печи "горн-ниж шахты" ;

1,3 - " " " " "ниж шахты - верх шахты" ;

1,8 - " " " " "верх шахты - колошник" ;

1,2 - в среднем для всего столба материалов в доменной печи, подсчитывался как средневзвешенное с учетом объема соответствующих участков печи.

Для случая, когда требуется анализировать влияние различных параметров газового потока и столба материалов на перепад давлений газа, необходимо иметь формулу, где зависимость коэффициента сопротивления от числа  $Re$  дана в чистом виде.

При этом показатель степени при  $Re$  в уравнении //?// будет иметь значения, выражающие режим движения газов в доменной печи и равные /согласно М.А.Степановичу/:

$n \approx 0,5$  ( $0,6-0,4$ ) - для участка печи "горн-верх шахты";

$n \approx 0,2$  ( $0,4-0$ ) - для участка "верх шахты - колошник";

$n \approx 0,4$  - в среднем для всего столба материалов;

$A$  - коэффициент, зависит от величины неравномерности газо-распределения.

Влияние аэродинамических параметров столба материалов и газового потока на интенсивность доменной плавки.

Для оценки влияния различных аэродинамических параметров на интенсивность плавки можно воспользоваться уравнением (7), если вместо  $Re_{tr}$  подставить его значение из (2), а величины  $\omega_0, \gamma_0, \eta$  привести к нормальным условиям. Зависимость вязкости от абсолютной температуры (от давления вязкость не зависит) в пределах температур, наблюдаемых в доменной печи, описывается уравнением:

$$\eta = \eta_0 T^{0.65}, \quad (8)$$

где  $\eta_0$  - коэффициент, зависящий от состава газов.

Полагая  $n = 0,4$ , после подстановки и преобразований имеем:

$$\Delta P = \frac{AH}{515} \cdot \frac{(1-m)^{0.4}}{m^4} \cdot \frac{\omega_0^{0.6} \gamma_0^{0.6} \eta_0^{0.4}}{g \beta^{1/4}} \cdot \frac{T^{1264}}{P}, \quad (9)$$

Где  $T$  и  $P$  - абсолютные температура и давление газа;

$\omega_0$  - отношение количества газов в единицу времени к площади поперечного сечения печи - характеризует интенсивность плавки.

Решая уравнение (9) относительно  $\omega_0$ , получим:

$$\omega_0 = \left( \frac{515}{A} \right)^{0.625} \cdot \frac{m^{2.5}}{(1-m)^{0.25}} \cdot \frac{\delta^{0.875}}{\delta_0^{0.375} \eta_0^{0.25}} \cdot \frac{P^{0.625}}{T^{0.75}} \cdot \left( \frac{\Delta P}{H} \right)^{0.625}. \quad (10)$$

Из уравнения (10) следует, что наибольшее влияние на интенсивность доменной плавки оказывает структура столба шахты - его

порозность и средний размер кусков, затем уже идут параметры газового потока - температура, давление, средние потери напора на погонный метр высоты, коэффициент А, характеризующий величину неравномерности распределения, и затем уже следуют удельный вес и вязкость газов, отнесенные к нормальным условиям.

В связи с тем, что режим движения газов несколько изменяется по высоте печи ( $M=0,5+0,2$ ), степень зависимости интенсивности плавки от различных параметров при этом также изменяется. Это нужно иметь ввиду при рассмотрении влияния условий плавки в какой-либо отдельной зоне печи на интенсивность ее хода.

Следует сказать, что уравнение (10) выражает зависимость интенсивности плавки от чисто аэродинамических параметров. Между тем интенсивность доменной плавки зависит также от соотношения сил, способствующих (вес материалов) и препятствующих (подпор газов) равномерному сходу шихтовых материалов в доменной печи. Значительное влияние на соотношение упомянутых сил оказывают профиль печи, а также размеры и взаиморасположение зон горения в горне доменной печи.

### 3. Влияние размеров и профиля доменной печи на интенсивность доменной плавки.

Для изучения характера и степени влияния размеров печей на величину различных показателей плавки были использованы данные о работе 79 доменных печей СССР объемом  $158-2300\text{м}^3$ , выплавлявших передельный чугун, за период 1963 - I пол. 1964 г.г.

На рис.4 сопоставлено изменение суточного расхода кокса ( $K$ ) и интенсивности его горения  $J_A$  ( $\text{т}/\text{м}^2$  сечения горна в сутки) в зависимости от диаметра горна для упомянутых 79 печей, а также по данным других авторов. Из рисунка видно, что за исключением данных

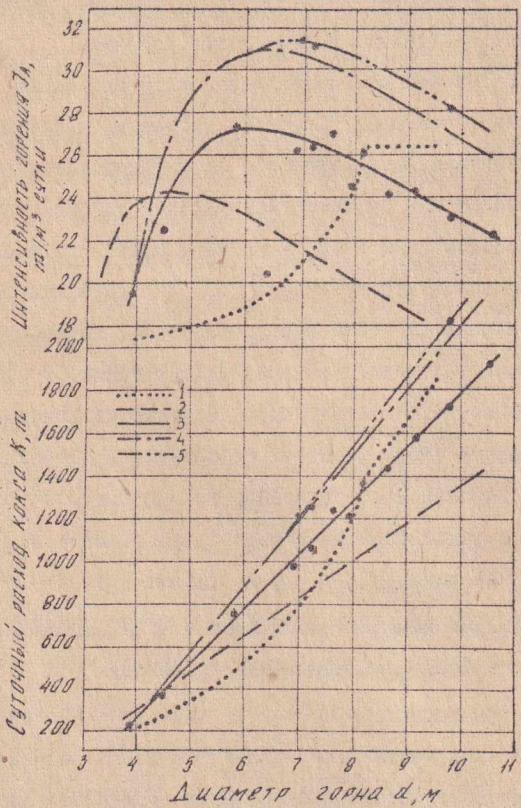


Рис. 4. Зависимость суточного расхода кокса и интенсивности его горения от диаметра горна по данным М.А.Павлова (1), О.Р.Райса (2), для 79 печей СССР (3), по данным немецких исследователей (4) и для печей Череповецкого завода (5).

Н.А.Павлова, полагающего, что с ростом объема печей интенсивность плавки должна увеличиваться, все остальные указывают на снижение интенсивности плавки при увеличении размеров печей. При пересчете величины  $J_a$  на одинаковые условия работы больших и малых печей только по величине давления колошниковых газов сопоставление показало еще более резкое снижение показателей интенсивности плавки с увеличением размеров печей.

В связи с этим были проведены исследования зависимости интенсивности процесса продувки слоя материалов воздухом от факторов, изменяющихся при увеличении абсолютных размеров печей. Экспериментальная установка представляла собой полуцилиндр высотой 1200 и диаметром 240 мм и имела периферийный подвод дутья. При проведении опытов изучалось влияние отношений высоты слоя к диаметру и диаметра слоя к среднему размеру куска, а также числа и сечения воздушных фурм на интенсивность процесса.

Сопоставление результатов исследований с условиями работы доменных печей позволило выявить ряд главных причин снижения интенсивности работы печей с увеличением их размеров, причем все они связаны с фактором периферийности подвода дутья:

1. Увеличение объема доменных печей при сохранении условий плавки постоянными приводит к тому, что условия движения газов в горне (в особенности структура слоя—средний размер кусков и порозистость) в лучшем случае остаются одинаковыми с ростом размеров печей. Это обстоятельство затрудняет распространение зон горения в размерах, пропорциональных увеличению площади сечения горна, и, поэтому, должно привести к снижению интенсивности плавки.

2. В связи с ростом поперечных размеров печи возникает необходимость такого размещения фурменных отверстий, которое способ-

ствовало бы увеличению дальности струи дутья. Дальность струи дутья в фурменной зоне доменной печи зависит главным образом от количества дутья, приходящего на одну фурму, при достаточно большом сечении фурмы. Выполнить такое условие возможно лишь при уменьшении отношения числа фурм к диаметру горна. Практически же число фурм для печей любого объема равно удвоенной величине диаметра горна, выраженного в метрах. Это приводит к тому, что расстояние между противолежащими фурмами увеличивается в соответствии с ростом поперечных размеров горна, в то время, как расстояние между соседними фурмами остается постоянным (см. табл.).

Таблица

Расстояние между противоположными ( $d_r$ ) и соседними фурмами ( $\ell$  - по периметру) в печах различного объема.

Полезный объем, м <sup>3</sup>	158	750	1033	1386	1719	2000	2700
Число фурм	8	12	14	16	18	20	22
$d_r$ , м	4,0	6,2	7,2	8,2	9,1	9,75	11,0
$\ell$ , м	1,57	1,63	1,62	1,61	1,59	1,53	1,57

3. Снижение отношения высоты печей к диаметру поперечного сечения ( $H:D$ ), наблюдающееся по мере роста размеров печей, приводит к увеличению удельного объема зоны с неравномерным движением материалов и газов. Если в высоких и узких печах протяженность пути газа от устья фурмы до колошника на периферии и в центре отличаются незначительно, то при уменьшении отношения  $H:D$  разница в протяженности увеличивается, способствуя неравномерному распределению газов и тем самым снижению интенсивности плавки (в

доменной печи не допускают чрезмерного развития периферийного движения газов, подгружаая периферию более мелкой и труднопроницаемой рудной частью шихты).

Поэтому с точки зрения аэродинамики при возрастании объема печей их высоту следует увеличивать в большей степени, как это имеет место, например, в серии геометрически подобных профилей, предложенных А.Н.Раммом.

Наличие заплечиков благоприятствует более равномерному распределению газов по поперечным сечениям столба шихты и, поэтому, угол наклона заплечиков ( $\alpha_s$ ) должен уменьшаться с увеличением размеров печи. Так как  $\alpha_s$  имеет нижний предел, когда появляется возможность подставления материалов, то для предотвращения этого необходимо увеличивать высоту заплечиков с ростом объема печей.

Повышение интенсивности плавки должно способствовать снижение отношения числа фурм к диаметру горна, как это предлагается Н.К.Леонидовым.

#### 4. Влияние числа и диаметра воздушных фурм на интенсивность доменной плавки.

Периферийность подвода дутыя предъявляет определенные требования к числу и сечению воздушных фурм, поскольку от этого зависят размеры и взаиморасположение зон горения, в свою очередь влияющих на характер движения шихты, степень ее разрыхления, газораспределение, и, в конечном счете, на интенсивность доменной плавки.

Наличие перед формой рыхлой области с циркуляцией в ней газовоздушной смеси (и кусков конка) позволяет с известным приближением отнести форменную воздушную струю к затопленным стру-

ним, встречающим преграду в виде тупика. Исследованиями установлена прямая зависимость глубины проникновения газовой струи от диаметра фурмы. При уменьшении начального диаметра струи, бьющей в тупик, относительная дальность (выраженная в диаметрах фурмы) струи увеличивается, а абсолютная уменьшается. Этим объясняется тот факт, что уменьшение диаметра воздушных фурм с целью увеличения его кинетической энергии во многих случаях не приводит к увеличению глубины распространения зоны горения в доменных печах.

Для выявления основных принципов, необходимых для правильно-го выбора числа и сечения воздушных фурм для данных условий плавки, были проведены исследования на опытной установке, описанной выше. Изучалось влияние числа и сечения воздушных фурм на интенсивность процесса, характеризуемую максимальным расходом дутья, превышение которого приводило к нарушениям структуры слоя.

Сопоставление результатов исследований с условиями формирования струи дутья в доменных печах позволило сделать следующие выводы:

1. Суммарная площадь сечения воздушных фурм ( $F_\phi$ ) должна быть прямо пропорциональна объемному расходу дутья ( $\dot{Q}_{\rho,t}$ ). Превышение или уменьшение  $F_\phi$  для данных условий приводит к снижению интенсивности процесса. Для условий доменной плавки зависимость  $F_\phi$  от  $\dot{Q}_{\rho,t}$  выражается уравнением

$$F_\phi = 0,007 \dot{Q}_{\rho,t} - 0,03, \text{ м}^2; \quad (\text{II})$$

где  $\dot{Q}_{\rho,t}$  — расход дутья при данных давлении и температуре, м/сек.

2. С увеличением отношения числа фурм ( $n$ ) к площади сечения одной фурмы ( $f$ ) индексы интенсивности плавки снижаются.

Для условий доменной плавки можно рекомендовать величину отношения  $\frac{n}{f}$ , равную 700. При этом отношение числа фурм к диаметру горна должно снижаться по мере увеличения размеров печей.

Сопоставляя уравнение (II) с зависимостью  $\frac{n}{f} = 700$  и имея ввиду, что  $F_f = nf$ , после преобразований получаем формулы для определения числа и диаметра ( $d_f$ ) воздушных фурм доменных печей:

$$n = \sqrt{4,9 Q_{dt} - 21}; \quad (12)$$

$$d_f = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{n}{700}}. \quad (13)$$

Расчет числа и ~~воздушных~~ воздушных фурм следует за расчетом профиля. Исходя из заданных условий плавки (производительность печи, физическая и химическая характеристика сырья, температура и состав дутья, давление колошникового газа) рассчитывается количество дутья ( $Q_o$ ) и его объемный расход

$$Q_{dt} = Q_o \cdot \frac{T_g}{273 P_g},$$

где  $T_g$  — абсолютная температура дутья, заданная в условиях плавки,  $^{\circ}\text{К}$ ;

$P_g$  — давление дутья на фурмах, равное  $P_a + 0,052 H' \text{ ат}$ ;

$P_a$  — давление колошникового газа, задано условиями плавки, ат;

$H'$  — высота печи между уровнями фурм и ванели, м;

0,052 — средние потери напора на 1 пог. метр высоты  $H'$ .

Такая сравнительно простая методика позволяет учитывать через  $Q_{dt}$  с большей или меньшей полнотой конкретные условия плавки: сырье, давление газов в печи, состав и температуру дутья, размеры печи.

### ВЫВОДЫ

I. Режим движения газов в движущемся слое горячего кокса

при значениях числа  $Re$ , характерных для нижних и средних горизонтов доменной печи ( $Re = 400-1350$ ), описывается уравнениями типа  $\lambda = \frac{A}{Re^n}$ , где показатель степени  $n$  имеет значения, равные 0,4-0,5.

2. Наличие в движущемся слое кокса; а) жидкой фазы в количестве, наблюдаемом в доменной плавке, б) теплообмена и в) неравномерности газораспределения при  $Re = 400-1350$  не вносит существенных изменений в режим движения газов, а лишь влияет на величину гидравлического сопротивления слоя.

3. Получены уравнения гидродинамики доменной плавки, базирующиеся на результатах многочисленных исследований и данных о работе большого числа доменных печей и учитывающие изменения всех аэродинамических параметров, в том числе и неравномерности газораспределения, по высоте печей. Уравнения могут быть использованы для определения гидравлического сопротивления столба шихты в доменной печи, для оценки влияния аэродинамических параметров столба шихты и газового потока на интенсивность плавки, для расчета поперечных размеров профиля.

4. Из всех аэродинамических параметров доменного процесса наибольшее влияние на интенсивность плавки оказывает порозность столба материалов, что подчеркивает первоочередность всех мероприятий, способствующих увеличению порозности.

При замене части кокса топливными добавками к дутью и повышении давления колотникового газа гидродинамические условия в нижней зоне могут стать фактором, лимитирующим интенсивность плавки.

5. При увеличении абсолютных размеров печей, работающих в одинаковых условиях, интенсивность плавки снижается. Уменьшение

интенсивности плавки связано с периферийностью подвода дутья и обусловлено соответствующими изменениями соотношений между перечисленными размерами печи, с одной стороны, и качеством шихты, высотой печи и числом фурм, с другой.

6. На основании результатов исследований предложены некоторые рекомендации, которые необходимо внести в методику определения профиля доменных печей, что должно способствовать более интенсивной и экономичной их работе. В частности, с ростом размеров печей угол наклона заплечников должен уменьшаться при некотором увеличении их высоты.

7. При увеличении объема печей суммарная площадь сечения фурм должна возрастать пропорционально увеличению объемного расхода дутья, а отношение числа фурм и площади сечения фурмы оставаться постоянным. В соответствии с этим предложена методика определения числа и сечения воздушных фурм для доменных печей, учитывая условия плавки.

Сделанные выводы подтверждены многочисленными примерами из практики работы доменных печей.

8. Результаты настоящей работы могут быть использованы для улучшения проектирования и выбора числа и сечения воздушных фурм для печей шахтного типа, имеющих периферийный подвод дутья (доменные печи, вагранки, обжиговые печи и т.д.) с целью повышения интенсивности и экономичности их работы.

----- X -----

Диссертация содержит 145 стр. текста, 48 рисунков, 15 таблиц и список использованной литературы из 144 наименований.

По материалам диссертации опубликованы следующие  
статьи:

1. А.И.Бондаренко, М.Я.Остроухов. Закономерности изменения интенсивности в доменных печах различного объема. Известия вузов, Черная металлургия, 1967, № 12.
2. А.И.Бондаренко, М.Я.Остроухов. Анализ газодинамического режима доменной плавки. "Тезисы докладов межвузовской научно-технической конференции по организации и регулированию хода доменного процесса", Издание МГМИ, Магнитогорск, 1968.
3. А.И.Бондаренко, М.Я.Остроухов. Анализ газодинамического режима доменной плавки. Бюллетень ЦИНЧМ, 1968, № 6.
4. А.И.Бондаренко, М.Я.Остроухов. Влияние гидродинамических явлений на перепад давлений в доменной печи. Известия вузов, Черная металлургия, 1968, № 8.

О результатах работы сообщалось:

1. На межвузовской научно-технической конференции по организации и регулированию хода доменного процесса, Магнитогорск, 1968.
2. На XXI научно-технической конференции Челябинского политехнического института, посвященной 100-летию со дня рождения В.И. Ленина, Челябинск, 1968.
3. На заседании кафедры металлургии чугуна Магнитогорского горно-металлургического института, Магнитогорск, 1969.

№01036-25/п-69г. Сдано в печать 26/п-69г. Формат 60x90/16  
Объем 1,045л.л. Отпечатано на ротапринте ЧПИ Тираж 120 экз.  
заказ №26.