Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. L, вып. 3, 1970 г.

ПРОДУВКА ЖИДКОЙ ВАННЫ ГАЗООБРАЗНЫМИ АГЕНТАМИ ЧЕРЕЗ СОПЛА, РАСПОЛОЖЕННЫЕ ПОД УГЛОМ К ПОВЕРХНОСТИ ВАННЫ

И. А. Южанинов

Верхняя продувка металлургических расплавов газообразными агентами в настоящее время успешно применяется в черной металлургии [1—3] и начинает получать признание в цветной металлургии [4—6], где наиболее перспективно для таких агрегатов наклонное к поверхности ванны расположение сопел.

Анализ фиксируемой общей картины поведения ванны для определения основных параметров дутьевой воронки при различном положении сопел позволяет наметить оптимальные варианты верхней продувки.

Исследования проводились на моделях, изготовленных из оргстекла. Основной моделью была водяная модель поверхностью 400×650 *мм* и высотой, позволявшей изменять глубину ванны от некоторого минимума до 450 *мм*. Применялись цилиндрические сопла диаметром d от 0,8 до 6,0 *мм*, расположенные вертикально или под углом α к ванне (30, 45, 60 и 75°), на уровне поверхности ванны, на высоте 2, 5, 10, 25 и 50 d (калибров) над ванной или при погружении в ванну на те же расстояния.

Давление дутья p_1 изменялось от 50 до 35 000 *кГ/м*^{2} (*мм вод. ст.*), коэффициент расхода сопел φ определен по данным специальных измерений. В опытах фиксировались температура дутья t_1 и барометрическое давление B. По величине давления

перед соплом p_1 и коэффициенту расхода φ рассчитывалась скорость истечения газов $w_и$.

При давлениях дутья выше критического ($p_1 + B > 1{,}9\,p_2$, где p_2 — давление среды, в которую вытекает струя) учитывалось расширение струи по формуле Ростоковского [2].

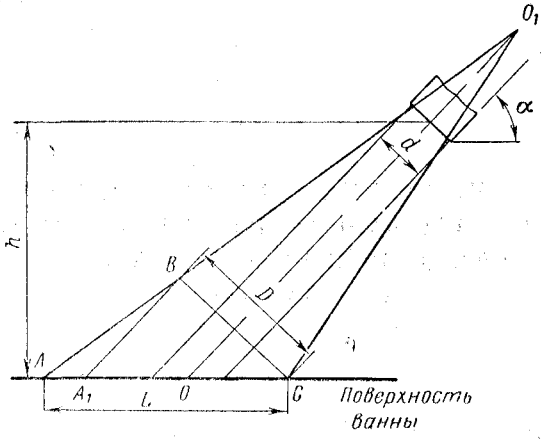


Рис. 1. Схематичный вид газовой струи, вытекающей из сопла, расположенного наклонно к поверхности жидкой ванны

В соответствии с общими положениями по моделированию гидродинамики ванны [2, 7], результаты опытов обрабатывались в виде критериальных зависимостей типа*

$$\frac{H}{d} = f(\mathrm{Ar}_d,\ k_\gamma), \qquad (1)$$

$$\frac{H}{d} = f(\mathrm{Ar}_D,\ k_\gamma) \quad \text{или} \quad \frac{H}{D_у} = f(\mathrm{Ar}_{D_у},\ k_\gamma), \qquad (2)$$

где Ar_d, Ar_D и $\mathrm{Ar}_{D_у}$ — критерии Архимеда; H — глубина проникновения струи в жидкую ванну, измеряемая от точки встречи струи с поверхностью ванны до нижней части воронки по вертикали; D и $D_у$ — диаметр газовой струи в месте встречи

* Значения симплексов k_F (отношения площади сечения рабочей части конвертора или модели к живому сечению сопел, соответственно, конвертора или модели) и k_V (отношение объема, подаваемого в ванну дутья, к объему жидкой ванны) изменялись незначительно.

ее с ванной соответственно при вертикальном и наклонном (условный диаметр) расположении сопла на высоте h над ванной; при угле раскрытия струи около 20° $D = d + 0{,}353\,h$.

Принято $D_y = \frac{D+L}{2}$. Величина L находится из треугольника ABC (рис. 1) с использованием формулы Непера

$$L = D\,\frac{\operatorname{tg}\left(45° + \frac{\alpha}{2}\right) + \operatorname{tg}\left(55° - \frac{\alpha}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(45° + \frac{\alpha}{2}\right) - \operatorname{tg}\left(55° - \frac{\alpha}{2}\right)}. \qquad (3)$$

Очевидно, с увеличением угла наклона сопла $L \to D$ и при $\alpha = 90°$ (вертикальное сопло) $L = D$.

Значение критерия Архимеда определялось в зависимости от положения сопла. При расположении его над ванной на высоте h вертикально

$$\mathrm{Ar}_D = \frac{\gamma_a w_h^2}{g\gamma_ж D}, \qquad (4)$$

и наклонно

$$\mathrm{Ar}_{D_y} = \frac{\gamma_a w_h^2}{g\gamma_ж D_y}, \qquad (4')$$

где $\gamma_ж$ — удельный вес жидкости, *кг/м*³; γ_a — удельный вес газа в струе, равный γ_1 (действительному удельному газу перед соплом) при $p < 0{,}1$ *ати*, а при $p > 0{,}1$ *ати*

$$\gamma_a = \gamma_1 \left(\frac{P_2}{P_1 + B}\right)^{\frac{1}{k}},$$

где k — показатель адиабаты.

При возрастании h изменяется γ_a за счет вовлечения в струю окружающей ее газовой среды. Изменение γ_a учитывает коэффициент k' (рис. 2), найденный нами по данным Г. П. Иванцова и Г. Н. Абрамовича [8] для различных значений h/d.

Действительная скорость газа по оси струи w_h на расстоянии h от сопла по формуле Абрамовича

$$w_h = w_и \left(\frac{0{,}96}{\frac{0{,}16h}{d} + 0{,}29}\right), \ м/сек, \qquad (5)$$

причем при $h \leqslant 5d$ (начальный участок струи) принимается $w_h = w_и$.

Критерий Архимеда для сопла, расположенного на уровне ванны ($h=0$),

$$\mathrm{Ar}_d = \frac{\gamma_a w_и^2}{g\gamma_ж d}, \qquad (4'')$$

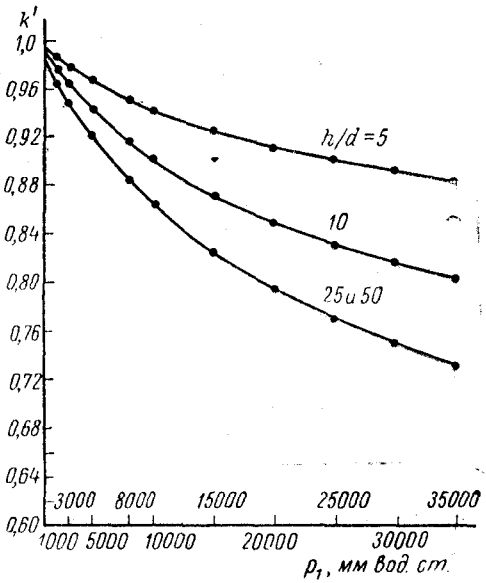


Рис. 2. Значение коэффициента k', учитывающего изменение γ_a струи

а для погруженного в ванну сопла учитывается и глубина его погружения $h_и$ при определении p_2 в формулах по расчету $w_и$. В зависимости (1) и (2) входит симплекс $k_\gamma = \frac{\gamma_ж}{\gamma_a}$, непосредственно учитывающий влияние удельных весов взаимодействующих фаз — газовой струи и жидкости. Как показали опыты, при изменении величины k_γ ее влияние на относительную глубину погружения газовой струи и характер продувки незначительно. Поэтому выбранный вид зависимостей (1) и (2) в дальнейшем упростился.

Значения критерия Архимеда для наиболее вероятных заводских условий при верхней продувке штейнов и ферроникеля

сжатым воздухом или кислородом колеблются от десятых долей единицы до нескольких сотен [6]. Именно в этом интервале значений и проведена основная часть опытов, хотя в целом значение Ar в лабораторных исследованиях изменялось в более широких пределах. Вместе с основными измерениями параметров дутья, воронки проводились визуальные наблюдения за поведением ванны: наличием и характером крупных выбросов жидкости из дутьевой воронки, брызгообразованием, аэрацией жидкости, циркуляционными потоками в ванне. В результате установлено, что положение дутьевых устройств относительно ванны существенно отражается на всей картине поведения ванны.

Рассмотрим полученные результаты вначале с чисто качественной стороны.

Дутьевое устройство, расположенное на уровне поверхности жидкой ванны. При малых давлениях дутья в жидкости образуется небольшая воронка. Аэрация ее ничтожна, и газ контактирует с жидкостью только по поверхности воронки. Для вертикального сопла форма воронки близка к цилиндрической с диаметром, примерно равным диаметру сопла. С уменьшением угла наклона воронка приобретает сначала форму, близкую к конусу, а затем более сложную конусовидную форму с образующими разной длины. При малых углах наклона ($\alpha \leqslant 45°$) воронка вытягивается по направлению дутьевой струи.

Величина H при изменении α от 90 до 75° почти постоянна, а при дальнейшем уменьшении быстро падает.

Повышение давления дутья p_1 приводит сначала только к заметному увеличению размеров воронки при сохранении ее формы и характера продувки. С ростом p_1 цилиндрическая воронка вертикального сопла трансформируется в коническую и характер продувки изменяется: в воронке появляются крупные газовые пузыри, а над ней — заметное количество всплесков и брызг. Начинается аэрация воронки, мелкие пузырьки отрываются от основной струи, струя раздробляется. При наклонном сопле пузырьки отрываются в основном на стороне воронки, противоположной соплу. Увеличение давления (расхода) дутья приводит к росту степени аэрации областей жидкости, примыкающих к воронке. Первоначально резкие очертания контура воронки исчезают, быстро увеличивается поверхность контактирующих фаз. Одновременно начинает расти и число выбросов — крупных всплесков жидкости, число мелких брызг; увеличивается амплитуда раскачивания ванны.

При малых углах наклона ($\alpha \leqslant 45°$) преобладают мелкие брызги. Подавляющая их часть при этом направлена вверх и вперед. На сопло они почти не попадают, кроме тех, которые вылетают непосредственно из-под сопла. При $\alpha = 60°$ число мелких брызг заметно уменьшается, а с увеличением α до 75° они почти исчезают. Одновременно возрастает число крупных по массе, но более ограниченных по высоте и области разброса пульсирующих всплесков. Характер циркуляции ванны становится глубинным и весьма интенсивным при значительной аэрации ванны. Исключением является вертикальное расположение сопла, когда циркуляция ванны по длине резко уменьшается и становится симметричной относительно сопла.

Дутьевое устройство, погруженное в ванну на глубину $h_п$. При малых давлениях дутья, несколько превышающих противодавление окружающей сопло среды, отдельные газовые пузыри отрываются от сопла и всплывают, что сопровождается легкими всплесками жидкости на поверхности практически без образования брызг.

При α, равном 30 и 45°, даже при значительном погружении сопла ($h_п = 50d$) в районе сопла остается спокойная зона, где отсутствует заметная циркуляция жидкости. С ростом α спокойная зона постепенно исчезает, и сопло начинает омываться жидкостью все активнее. Увеличение глубины погружения сопла ведет к более частому изменению места всплытия газовых пузырей.

Рост давления дутья приводит к появлению двух хорошо различаемых визуально газовых потоков в дутьевой воронке: нисходящего, конусообразного с четкими границами, наклонного при наклонном сопле, и восходящего, гроздевидного потока, пульсирующего и меняющего свои очертания, особенно при увеличении симплекса $h_п/d$.

Глубина проникновения струи H, измеряемая по вертикали от среза сопла до нижней части воронки, при изменении $h_п$ и сохранении прочих условий продувки остается почти постоянной. Общая глубина проникновения струи в ванну при этом, естественно, возрастает

$$H_{общ} = H + h_п.$$

Дальнейшее увеличение p_1 приводит к появлению аэрации воронки, причем для α, равного 30 или 45°, она заметно меньше, чем с продувкой при $\alpha \geqslant 60°$.

Характер образования всплесков и брызг для различных углов наклона сопла, равно как и общая форма воронки, ана-

логичны таковым при сопле, расположенном на уровне ванны. Так, при малых α преобладают мелкие брызги, направленные вверх и вперед, при $\alpha \geqslant 60°$ преобладают большие по массе с меньшей областью разброса всплески.

Значительное повышение давления дутья приводит к исчезновению видимых очертаний потоков в воронке из-за сильной аэрации жидкости. При этом быстро растет число выбросов и брызг. Для всех положений сопла число этих выбросов при некоторых p_1 и d (некоторых массовых расходах) достигает такой величины, при которой нормальный процесс продувки нарушается, так как начинается сильное раскачивание ванны, быстрое уменьшение ее уровня (открытая ванна), возникают и некоторые другие явления. Наступает своеобразный «предел» по дутью. Анализ этого качественно нового состояния ванны при продувке ее газообразными агентами выходит за рамки настоящей статьи. Заметим, что при проведении опытов нами исключалась область катастрофических выбросов.

Дутьевое устройство, расположенное над поверхностью ванны на некоторой высоте. Газовая струя, вытекающая из сопла, на участке от точки истечения до поверхности ванны подчиняется закономерностям свободной струи. Затем она взаимодействует с жидкой ванной, образуя дутьевую воронку. При низком положении сопла в пределах двух-пяти калибров сохраняется примерно такой же характер поведения ванны, что и для случая расположения сопла на уровне ванны ($h=0$). При этом важно, что глубина проникновения струи для аналогичных α уменьшается незначительно.

Подъем сопла до $h=10d$ и выше приводит к заметному росту брызгообразования и интенсификации крупных выбросов. Мелкие, далеко летящие брызги образуются не только при малых наклонах сопла, но и при $\alpha=60\div90°$. Правда, количество их заметно меньше, чем при тех же условиях и α, равном 30 или 45°. Подъем сопла ведет к заметному уменьшению глубины проникновения струи. Особенно существенно это уменьшение при $h=(25\div50)d$.

Форма дутьевой воронки при поднятом над ванной наклонном сопле оказывается довольно сложной, конусовидной. В плане она имеет яйцевидную форму с рваными краями в противоположной соплу части. С ростом α до 90° воронка приобретает более четкие геометрические формы, при малых давлениях дутья приближаясь к цилиндру, при больших — к конусу.

Рассмотрим полученные количественные зависимости.

Обобщение проведенных замеров по высоте основной массы крупных всплесков (выбросов) жидкости из дутьевой воронки $h_в$ представлено на рис. 3. На горизонтальной оси его 0 обозначает поверхность ванны, а положительные и отрицательные величины h/d, соответственно, расположение сопла над ванной и в ванне. Несмотря на значительный разброс экспериментальных точек, совершенно очевидно, что с позиций достижения максимального погружения дутьевой струи в ванну при минимальных выбросах целесообразен вариант погруженного в ванну сопла (фурмы). Этому же варианту соответствует и минимальное образование мелких брызг.

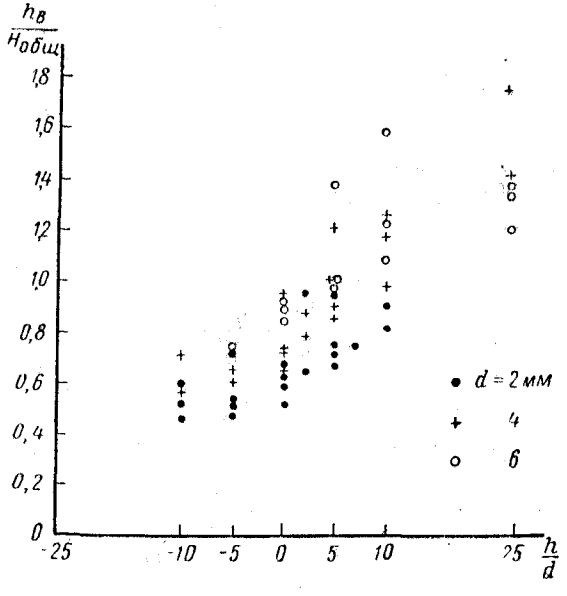


Рис. 3. Зависимость $\frac{h_в}{H_{общ}} = f\left(\frac{h}{d}\right)$

Если учесть, что в реальных условиях продувки на пути дутьевой струи к штейну или металлу часто имеется более или менее значительный слой шлака, вариант погруженного дутья становится еще более перспективным. Действительно, в настоящее время погруженное дутье применяется при продувке расплавов [3].

На основе опытных данных по изменению размеров дутьевой воронки в зависимости от параметров дутья и положения соп-

ла, в соответствии с принятой выше формой обработки, получены следующие критериальные уравнения (цилиндрические сопла): для сопла, расположенного на уровне ванны или в ванне,

$$H/d = 1{,}5 \sin\alpha \, \mathrm{Ar}_d^{0{,}42}, \qquad (6)$$

для сопла, расположенного над ванной,

$$H/D_y = 0{,}75 \sin\alpha \, \mathrm{Ar}_{D_y} \quad \mathrm{Ar}_{D_y} \leqslant 1, \qquad (7)$$

$$H/D_y = 0{,}75 \sin\alpha \, \mathrm{Ar}_{D_y}^{0{,}45} \quad \mathrm{Ar}_{D_y} > 1. \qquad (7')$$

Сравнение уравнений (6), (7) и (7′) с подобными зависимостями для частных случаев [2, 7—9] свидетельствует об их общности при некоторых отличиях коэффициентов, показателей степеней.

Пользуясь более общими зависимостями (6), (7) и (7′), можно оценивать основные размеры дутьевой воронки для промышленных конверторов или других агрегатов с различными вариантами верхнего подвода дутья. На рис. 4 приведены значения (в зависимости от величины симплекса h/d) основных размеров дутьевой воронки (H и D) конвертора промышленного масштаба, рассчитанные по предлагаемой методике. Сопло расположено на поверхности ванны или над ванной под углом, близким к 90°.

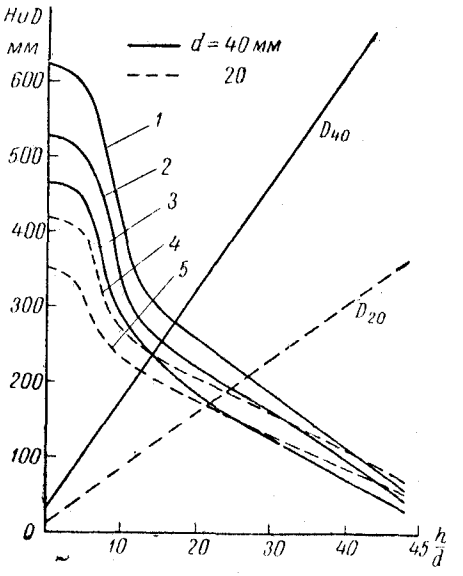


Рис. 4. Основные размеры дутьевых воронок для продувки расплавов: *1* и *4* — никелевый штейн; $p_1 = 10$ *ати*; *2* и *5* — никелевый штейн, $p_1 = 5$ *ати*; *3* — ферроникель, $p_1 = 5$ *ати*

Как следует из рисунка, влияние давления дутья на изменение глубины проникновения струи в расплав при сверхкритических давлениях не очень велико. Значительно большее влияние на величину H оказывает положение сопла (даже при неизменном α).

При этом увеличение h/d в пределах 0—5 не ведет практически к изменению H, а затем глубина проникновения струи в расплав быстро уменьшается. Это указывает на целесообразность низкого расположения сопла.

Заключение

Выбор положения сопла в агрегате для продувки жидкой фазы (расплава) газом имеет первостепенное значение.

Положение сопла в таком агрегате в значительной степени отражается на всех сторонах его работы: технологической, тепловой, конструктивной, так как определяет размеры и положение ракционной зоны, аэрацию и циркуляцию ванны (массо- и теплообмен), количество и характер выбросов, брызгообразование.

Оптимальным положением сопла для достижения, с одной стороны, наибольшего проникновения газовой струи в ванну, высокой степени ее аэрации и активной глубинной циркуляции, а с другой — уменьшения размеров выбросов, снижения количества мелких брызг, является погружение сопла в ванну при угле его наклона порядка 75°.

При весьма агрессивных расплавах, таких как штейн, по условиям безопасной работы приходится располагать сопло вне ванны. В этом случае лучшим вариантом следует считать установку сопла на небольшой высоте над ванной (до 5 калибров), также под углом порядка 75°.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев С. Г., Шумов М. М., Квитко М. П. Основные закономерности продувки чугуна кислородом сверху. Сталь, № 10, 1960.
2. Баптизманский В. И. Механизм и кинетика процессов в конвертерной ванне. Металлургиздат, 1960.
3. Иванцов Г. П., Василивицкий А. В., Смирнов В. И. Непрерывный сталеплавильный процесс. Изд-во Металлургия, 1967.
4. Диомидовский Д. А. и др. Непрерывное конвертирование штейнов. Цветные металлы, 1959, № 2.
5. Непрерывная выплавка металлов. Экспресс-информация. Цветная металлургия, № 26 и 34, 1967.
6. Шалыгин Л. М. Конвертерный передел в цветной металлургии. Изд-во Металлургия, 1965.
7. Казанцев И. Г. Исследование динамики газообразной струи, втекающей в жидкость. Ждановский металлургич. ин-т. Сб. научн. тр., вып. 2, 1952.
8. Иванцов Г. П. Аэродинамика кислородного конвертерного процесса. Тр. научно-технич. об-ва черной металлургии, т. XVIII, 1957.
9. Физико-химические основы производства стали. Тр. V конференции по физико-химическим основам производства стали. Металлургиздат, 1961.