

# ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В КОВШЕ-ПЕЧИ

**С.А. Письменов, Д.Я. Поволоцкий, А.А. Устюгов**

Широкое распространение внепечной обработки в ковше-печи с перемешиванием ванны продувкой инертным газом для улучшения качества стали вызывает значительный интерес к процессам, протекающим при такой обработке. Физико-химические основы процессов в ковше-печи в значительной мере изучены, чего нельзя сказать о физических процессах - гидродинамике, массопереносе и др., обеспечивающих достаточно интенсивное перемешивание расплава, высокие скорость и степень развития реакций, однородность ванны.

Вследствие того, что сталеплавильная ванна непрозрачна, а измерения в ней в условиях высокой температуры затруднены, эти физические процессы изучают на холодных моделях. Такая методика была принята и в нашем исследовании.

Для перемешивания в ковше-печи продувкой инертным газом обычно применяют донные пористые пробки. Поэтому целью исследования было поставлено изучение влияния расположения донных пробок и расход продувочного газа на картину перемешивания и гидродинамику ванны при обработке в ковше-печи с моделированием реальных режимов продувки.

Методом масштабных преобразований совокупность величин  $w-\varphi(i, g, \rho, l_1, \dots, l_n)$ , определяющих гидродинамику металлической ванны во время продувки, привели к безразмерному виду:  $w^2/gl_1 = \Phi(l, l_1/l_2)$ , где  $l = i/\rho_m g l^3$  - безразмерный критерий импульса струи;  $i$  - импульс струи, равный произведению массы на ускорение,  $\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$ ;  $w$  - скорость,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $g$  - гравитационное ускорение,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\rho$  - плотность металла,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $l$  - геометрические параметры, м.

Полученные критериальные зависимости использовали для моделирования гидродинамики ванны при продувке в 100-т ковше: расчет расхода газа для модели, пересчет скорости циркуляции с модели на образец. Для этого изготовили из прозрачного оргстекла в масштабе 1 : 10 геометрическую модель ковша. Кроме центральной донной фурмы, аналогичной имеющейся в промышленных агрегатах, в модели на расстоянии половины радиуса установили три эксцентрично расположенные донные фурмы. Это позволило производить как отдельную (через центральную фурму или три эксцентрично расположенные), так и комбинированную (через четыре фурмы сразу) продувку. Схема расположения донных фурм, мест ввода индикатора и направления съемки приведена на рис. 1,2.

Как и в предыдущих опытах [1, 2], жидкий

металл моделировали водой, дутье - воздухом. В качестве индикатора направления и скорости перемещения потоков жидкости в модели выбрана метиленовая синь, водный раствор которой шприцем вводили в разные области ванны.

Распространение облачка индикатора фиксировали видеосъемкой на цифровую видеокамеру со скоростью 24 кадр/с. Каждый эпизод ввода индикатора снимали отдельно. Съемку выполняли под углом  $90^\circ$  к плоскости ввода индикатора, и в кадре всегда присутствовала масштабная линейка. За вектор скорости принимали максимально удаленную от зоны ввода дутья границу облачка, движущегося с потоком.

Опыты проводили при суммарной интенсивности дутья, в пересчете на образец,  $0,4-2,5 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{мин})$ , что соответствует принятым в промышленности режимам.

По результатам видеосъемки строили векторные диаграммы движения жидкости в модели. Обобщенные картины скоростей циркуляции жидкости при продувке через центральную, три радиальных и одновременно четыре донные фурмы в пересчете на образец показаны на рис. 3.

Установлено, что характер движения жидкости при всех исследованных способах: через центральную, три радиальные, и совместно четыре донные фурмы не зависит от интенсивности продувки - потоки жидкости, захватываемые всплывающими пузырьками продувочного газа, в центральной (осевой) части ванны являются восходящими, а на периферии нисходящими. Однако необходимо отметить, что застойная зона, находящаяся на периферии придонной части ванны, возникает лишь в случае продувки через одну центральную фурму.

Она практически полностью отсутствует при использовании трех эксцентрично расположенных фурм.

В пределах изученных расходов газа, скорости потоков жидкости при продувке через центральную фурму, как это видно на рис. 3а, практически не зависят от интенсивности продувки и колеблются в пределах 50-150 см/с. При такой продувке в объеме жидкости над центральной фурмой образуется практически сплошной столб вдуваемого газа. В случаях же одновременной продувки через три эксцентрично расположенные и одну центральную донные фурмы четко прослеживается увеличение скоростей в среднем на 50-100 см/с при увеличении расхода газа (рис. 3 б, в). В исследованных режимах при увеличении расхо-

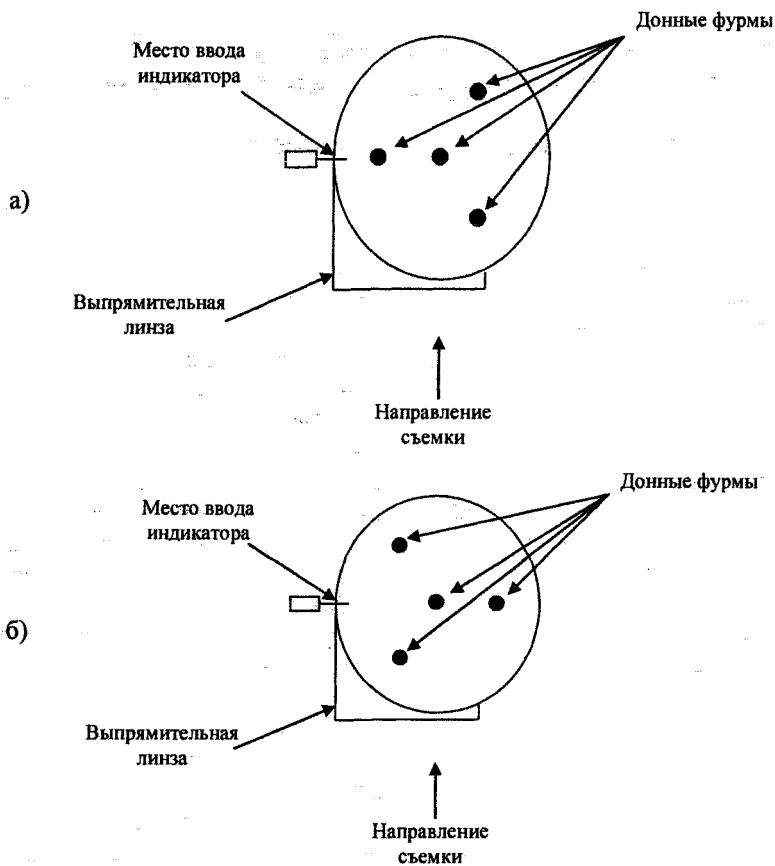


Рис. 1. Установка – вид сверху: а – позиция 1; б – позиция 2

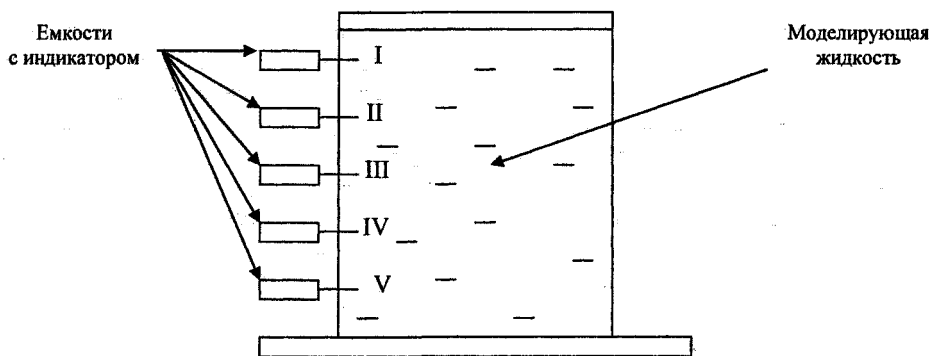


Рис. 2. Установка – вид сбоку

да газа через донные фурмы с 0,4 до 2,5 м<sup>3</sup>/(т-мин) для трех фурм скорости изменяются, соответственно, от 70-150 см/с (в различных сечениях) до 120-200 см/с, и для четырех фурм от 70-150 см/с до 150-250 см/с.

Установленное в настоящем исследовании увеличение скорости перемешивания при увеличении количества продувочных фурм можно объяснить уменьшением окрестности приходящейся на каждую из этих фурм и, по-видимому, исчезновением практически сплошного воздушного столба подаваемого газа в объеме жидкости, который

наблюдается при использовании одной центральной фурмы.

Для сравнения интенсивности переноса жидкости при разных способах продувки по экспериментальным данным определили коэффициент турбулентной диффузии, который рассчитывали как квадрат скорости среднего для данной зоны смешения частицы на расстояние  $x$ :

$$D_T = x^2/2.$$

Результаты определения, приведенные в таблице, показали, что в условиях одинакового расхода газа при продувке через 3 донные фурмы коэффициент

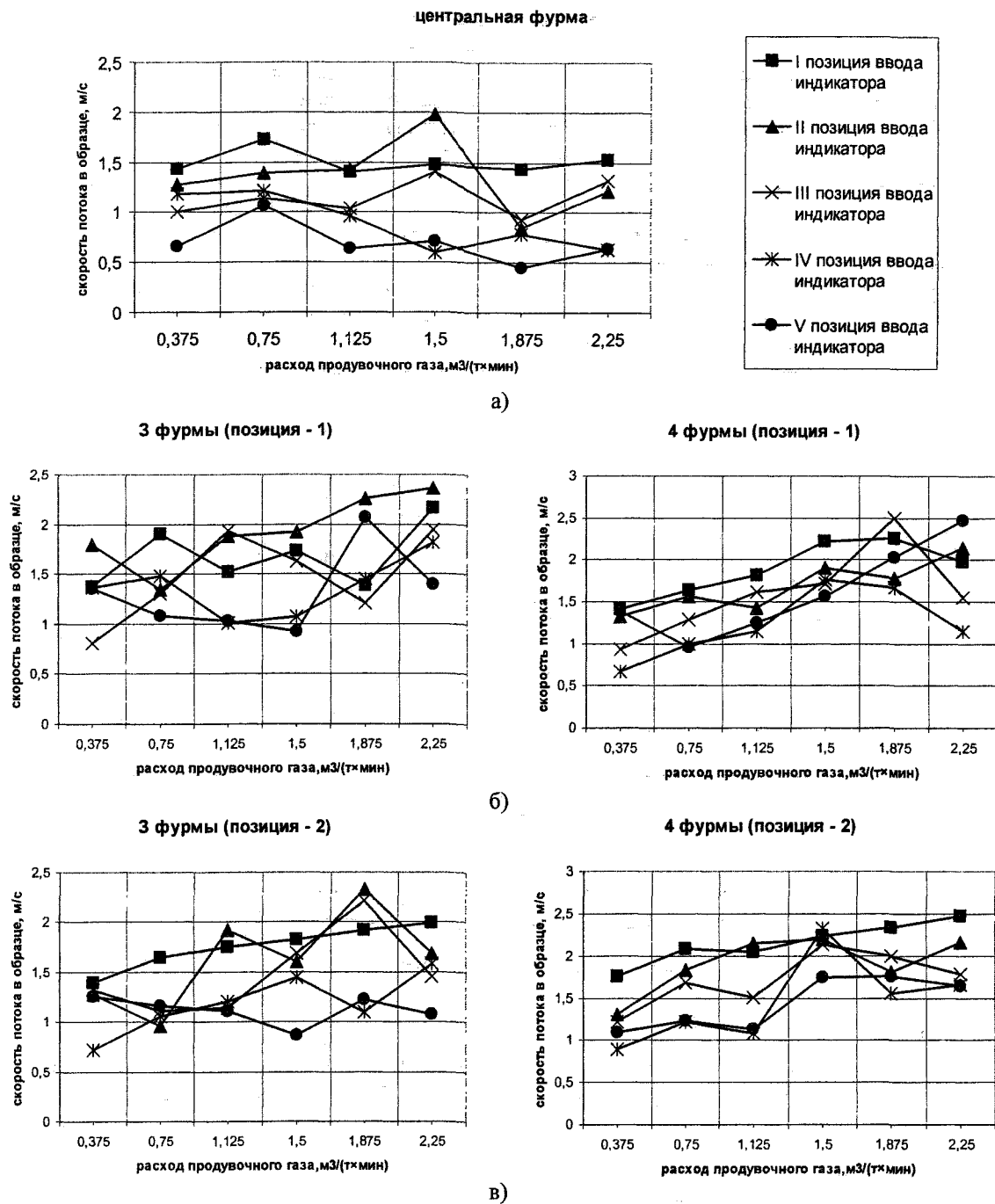


Рис. 3. Влияние расхода газа и расположения продувочных фурм на скорость перемешивания металла в ковше-печи: а – центральная фурма, б – 3 и 4 фурмы в позиции 1, в – 3 и 4 фурмы в позиции 2

Таблица

Коэффициент турбулентной диффузии в ванне ковша при продувке через донные фурмы

Количество и расположение фурм	$D_T, \text{см}^2/\text{с}$					
	Расход газа, $\text{м}^3/(\text{т}\cdot\text{мин})$					
	0,375	0,75	1,125	1,5	1,875	2,25
центральная	389	458	382	432	311	373
3 фурмы – поз. 1	469	498	516	509	586	677
3 фурмы – поз. 2	417	416	498	519	614	545
4 фурмы – поз. 1	401	451	506	641	716	651
4 фурмы – поз. 2	439	562	553	744	662	680

турбулентной диффузии существенно больше, чем через одну центральную. Причем, с увеличением расхода газа эта разница возрастает. При дополнительной продувке и через центральную фурму, без изменения общего расхода газа, коэффициент турбулентной диффузии возрастает. Это также видно на рис. 4, где приведено изменение средних значений для данного количества фурм. Такое построение на рис. 4 допустимо ввиду того, что влияние позиции ввода индикатора и направления съемки не величину  $D_T$  не выявили. Роль дополнительной продувки в повышении коэффициента турбулентной диффузии при неизменном общем расходе газа вызвана, по-видимому, главным образом ее организующим влиянием.

следует искать в другом. Возможно, при некоторой высокой интенсивности донной продувки через несколько фурм возникают достаточно мощные турбулентные пульсации, направленные поперек основного направления движения жидкости и вызывающих их смещение и торможение этому движению.

### Выводы

Методом физического моделирования установлено, что при продувке в ковше через одну центральную донную фурму скорость потоков жидкости практически не зависит от ее интенсивности. При продувке через три эксцентрично расположенные фурмы, с одновременной продувкой через четвертую центральную фурму и без нее, с

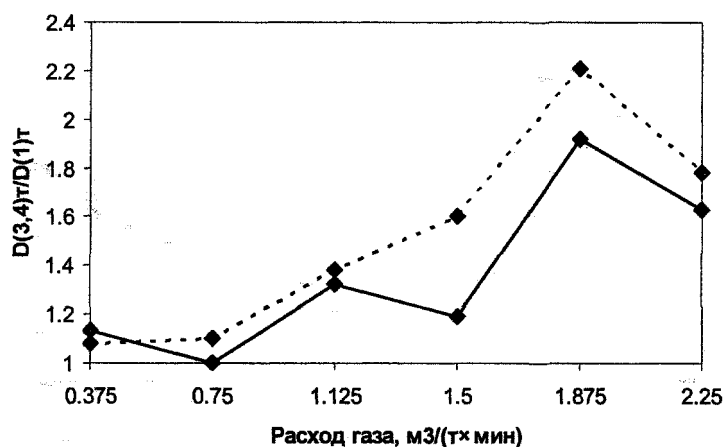


Рис. 4. Влияние расхода газа на отношение коэффициентов турбулентной диффузии через три  $(D_T^{(3)})$  и четыре  $(D_T^{(4)})$  донные фурмы и одну центральную  $(D_T^{(1)})$

Причина понижения отношения величин  $D_T$  при продувке через три эксцентрично расположенных сопла с одновременной продувкой через центральное сопло и без нее с повышением общего расхода газа более  $\sim 2 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{мин})$  требует дополнительного изучения. Проскальзыванием пузырьков газа в жидкости при большой интенсивности продувки объяснить это явление нельзя, так как такое проскальзывание более вероятно при подаче газа через одно сопло. Объяснение, по-видимому,

повышением интенсивности продувки скорость движения металла увеличивается, а также исчезает придонная застойная зона, четко наблюдаемая при продувке только через центральную фурму.

### Литература

1. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Зырянов С.В. //Металлы. -1993. -№1. - С. 26-30.
2. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Зырянов С.В. //Металлы. -1993. -№4. - С 5-11.