

УДК 669.162.28

DOI 10.17073/0021-3438-2015-2-58-68

СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ РАСПЛАВА В ПЕЧИ С БАРБОТАЖНЫМ СЛОЕМ ПРИ ЕГО ПРОДУВКЕ ЧЕРЕЗ БОКОВУЮ ФУРМУ, УСТАНОВЛЕННУЮ ПОД УРОВНЕМ СЛОЯ

© 2015 г. Г.С. Сборщиков, А.М. Володин, В.С. Валавин

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 12.11.14 г., подписана в печать 20.11.14 г.

С помощью математической модели изучена свободная конвекция шлакометаллического расплава («ванны») в печи с барботажным слоем при его продувке в пузырьковом и струйном режимах. Установлено, что средние по объему скорости движения ванны на порядки больше, чем скорости ее пневматического перемешивания потоками всплывающих пузырей и газожидкостными струями. Работа перемешивания расплава при свободной конвекции, совершаемая в основном в фурменной плоскости, анизотропна. В вертикальном направлении ее удельное значение достигает 1,25 МДж/т, а в горизонтальном — не превышает 43 кДж/т.

Ключевые слова: барботажный слой, перемешивание, математическая модель, численный эксперимент, шлакометаллический расплав.

Free convection of the slag-metal melt («bath») in a furnace with a bubble layer during its blowing in a bubble and jet modes is investigated using a mathematical model. It is established that bath motion velocities average by the bulk are larger by orders of magnitude than the velocities of its pneumatic mixing with flows for lifting bubbles and gas-liquid jets. The mixing work of the melt during the free convection, which is mainly performed in the tuyere plane, is anisotropic. Its value in the vertical bath plane reaches 1,25 MJ/t, while in the horizontal plane—does not exceed 43 kJ/t.

Keywords: bubble layer, mixing, mathematical model, numerical experiment, slag-metal melt.

Введение

Печи с барботажным слоем являются наиболее перспективными универсальными плавильными агрегатами будущего. В современной металлургии эти аппараты представлены весьма широко: все типы конвертеров, шлаковозгоночные печи, печь Ванюкова, печь Ромелт. По тому же принципу работают агрегаты внепечной обработки расплава, печи с кипящим слоем и т.д.

Высокие эксплуатационные характеристики этих печей обусловлены, прежде всего, энергичным перемешиванием шлакометаллического расплава — так называемой ванны. В барботажном слое его перемешивание осуществляется в результате одновременного действия 3 механизмов [1—3]:

- механического воздействия на ванну всплывающих газовых образований;
- механического воздействия газожидкостных потоков, распространяющихся в барботажном слое;
- свободной конвекции ванны, связанной с неравномерным распределением газа по объему слоя.

Исследование процессов перемешивания под действием газовых пузырей и струй с позиции термодинамики необратимых процессов показало, что этот процесс малоэффективен. Мощность, расходуемая на перемешивание при прохождении через ванну 1 т газа как в виде пузырей, так и струй, состав-

Сборщиков Г.С. — докт. техн. наук, профессор кафедры теплофизики и экологии металлургического производства НИТУ «МИСиС» (119094, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: g.sborshikov@mail.ru.

Володин А.М. — аспирант той же кафедры.

Валавин В.С. — докт. техн. наук, директор центра РОМЕЛТ НИТУ «МИСиС». Тел.: (495) 955-00-45.

ляет 36 Вт [4]. Расчет поля скоростей, создаваемого в ванне движущейся сквозь нее газожидкостной струей, с применением детерминированной [5] и интегральной [6] моделей привел к практически одинаковым результатам. Максимальная скорость среды, окружающей струю, имеет место на ее границе и не превышает 0,25—0,5 м/с. При этом средняя скорость циркуляции ванны в печи типа Ромелт составляет не более 0,07 м/с. Однако согласно данным [7] средняя по объему ванны скорость циркуляции должна быть не менее 0,8 м/с. Очевидно, первые 2 механизма перемешивания не обеспечивают наблюдаемой на практике интенсивности тепло- и массообменных процессов в барботажном слое.

Целью настоящей работы являлось исследование воздействия переменного поля плотности на кинематику и интенсивность перемешивания шлакометаллического расплава (ванны) за счет свободной конвекции.

Предварительные замечания и определения

При продувке ванны через боковую фурму, установленную ниже уровня слоя, газ распределяется в объеме расплава по-разному. Это обуславливает неравномерное поле плотностей в слое и инициирует в нем свободную конвекцию [8]. Наиболее неравномерное распределение газа имеет место в фурменной зоне — области барботажного слоя, расположенной вокруг продольных осей боковых фурм и имеющей толщину 1 калибр (это отношение линейного размера к диаметру выходного отверстия фурмы). Над фурменной зоной имеется переходной слой, верхняя граница которого находится на уровне 4 калибров. В его пределах происходят выравнивание концентраций газа по объему ванны и стабилизация этой величины во времени. Над переходным слоем располагается зона квазистационарного слоя, в которой содержание газа близко к удерживающей способности слоя (40 % от общего объема слоя) и практически постоянно по объему. Сквозь этот слой поднимаются газожидкостные потоки, с которыми удаляется избыточное по отношению к его удерживающей способности количество газа. Толщина зоны квазистационарного слоя зависит от общей высоты барботажного слоя:

$$H = h_{\text{ж}}/d_0,$$

где $h_{\text{ж}}$ — высота слоя жидкости над продольной осью

фурмы при отсутствии продувки, м; d_0 — диаметр выходного отверстия фурмы, м.

На характер распределения газа в объеме барботажного слоя влияет режим его истечения из отверстия фурмы, характеризуемый значением критерия Глинкова:

$$\text{Gn} = \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2}{\rho_{\text{ж}} g h_{\text{ж}}},$$

где $\rho_{\text{г}}$ и $w_{\text{г}}$ — плотность (кг/м³) и скорость (м/с) газа на выходе из фурмы; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкой фазы слоя, g — ускорение силы тяжести, м/с².

Физический смысл критерия Глинкова — отношение кинетической энергии газового потока на входе в слой к потенциальной энергии слоя на уровне продольной оси фурмы. Возможны 3 режима истечения газа.

1. При $\text{Gn} < 1$ процесс происходит в пузырьковом режиме. При этом газ формирует перед выходным отверстием газовые пузыри, которые увеличиваются до критических размеров, после чего отрываются от носика фурмы и всплывают вдоль фурменной стенки к поверхности слоя. При увеличении расхода газа через фурму в пределах пузырькового режима истечения увеличиваются частота отрыва пузырей и их количество.

2. При $\text{Gn} > 3$ наступает струйный режим истечения, при котором в фурменной зоне у носика фурмы образуется неисчезающая полость, концентрация газа в которой изменяется от 100 % вдоль продольной оси фурмы до 2 % на внешней границе полости. Эта полость названа зоной продувки. Она имеет сложную структуру. Ее центральную часть вокруг продольной оси фурмы занимает область, концентрация газа в которой изменяется от 100 % на оси до 98 % на внешней границе. Эта область называется газовой струей. Ее размер практически не изменяется по длине струи и близок к диаметру выходного отверстия фурмы (угол раскрытия составляет 3°).

Газовая струя окружена двухфазным пограничным слоем. Концентрация газа в нем изменяется от 98 % на внутренней границе до 60 % на внешней. В этой зоне жидкость находится в виде капель, которые несет газ, представляющий сплошную среду. Вокруг двухфазного пограничного слоя располагается зона пузырькового барботажа, где газ представляет собой дисперсную фазу и всплывает в жидкости в виде отдельных пузырей. От головной части зоны продувки периодически отрываются газожидкостные «снаряды» различной формы, которые обра-

зуют поток, движущийся через слой к поверхности ванны по плавно восходящей траектории и забирающий в себя весь избыточный газ, находящийся в слое, а также определенное количество жидкости.

3. При $1 < Gn < 3$ имеет место переходной режим истечения.

Математическая модель

В основу исследования положена математическая модель свободной конвекции в двухфазной среде [9]. Ванна печи принимается в виде псевдогомогенной жидкости с переменными физическими свойствами, плотностью и вязкостью. Ее перемешивание происходит за счет свободной конвекции, обусловленной наличием переменного поля силы тяжести, и описывается следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial t} + (\vec{w} \nabla) \vec{w} = \vec{g} - \frac{1}{\rho_{\text{эф}}} \text{grad } p + \nu_{\text{эф}} \nabla^2 \vec{w}, \quad (1)$$

$$\text{div}(\rho_{\text{эф}} \vec{w}) = 0. \quad (2)$$

К уравнениям движения (1) и (2) необходимо добавить закон сохранения массы для газа:

$$\rho_{\text{г}} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \rho_{\text{г}} \vec{w} \text{grad } \varphi = -\text{div} \vec{j}. \quad (3)$$

В указанных уравнениях используются следующие обозначения:

p — давление в локальной точке ванны, Па;

$\rho_{\text{эф}}$ — эффективная плотность бинарной смеси в заданной точке ванны, кг/м³;

$$\rho_{\text{эф}} = \rho_{\text{г}} \varphi + \rho_{\text{ж}} (1 - \varphi); \quad (4)$$

φ — истинное газосодержание бинарной смеси в заданной точке ванны, доли ед.;

$\nu_{\text{эф}} = \mu_{\text{эф}} / \rho_{\text{эф}}$ — эффективный кинематический коэффициент вязкости бинарной смеси, м²/с;

$\mu_{\text{эф}}$ — эффективный динамический коэффициент вязкости бинарной смеси, Па·с;

\vec{j} — плотность диффузионного потока газа, кг/(м²·с);

$$\vec{j} = -\rho_{\text{г}} D_{\text{г}} \text{grad } \varphi; \quad (5)$$

$D_{\text{г}}$ — коэффициент молекулярной диффузии газа в жидкости, м²/с.

Выражения (1)–(5) дают полное описание гидродинамики бинарной смеси газ–жидкость в «неупругой» постановке [10], согласно которой изменение плотности смеси учитывается только при расчете силы тяжести.

В предположении аддитивности течения компонентов бинарной смеси величину $\mu_{\text{эф}}$ можно считать по формуле

$$\frac{1}{\mu_{\text{эф}}} = \frac{\varphi}{\mu_{\text{г}}} + \frac{1 - \varphi}{\mu_{\text{ж}}}. \quad (6)$$

Исходя из математической модели гидродинамики бинарной смеси получим уравнения ее свободной конвекции.

Как отмечалось выше, барботажный слой можно разделить на 2 части: область с неравномерным распределением газа по объему, в которую входят фурменная и переходная зоны, и область квазистационарного слоя, где газ распределен более равномерно по объему.

Исходя из этого, введем в рассмотрение среднее значение эффективной плотности (ρ_0), равное плотности бинарной смеси при содержании в ней 40 % газа. Эта величина соответствует удерживающей способности слоя [8]. Исходя из формулы (4) и учитывая, что даже в системе вода–воздух плотность жидкости в 10³ раз превышает плотность воздуха, а в металлургических ваннах это соотношение еще больше, получим в первом приближении

$$\rho_0 = 0,6 \rho_{\text{ж}}. \quad (7)$$

Тогда в пределах допущения Буссинеска [4] изменение эффективной плотности можно выразить уравнением

$$\rho_{\text{эф}} = \rho_0 (1 - \beta \varphi'). \quad (8)$$

Здесь ρ_0 — плотность смеси, соответствующая $\varphi = 0,4$, а через φ' обозначено отклонение локального газосодержания от $\varphi = 0,4$. Коэффициент β определяет зависимость эффективной плотности смеси от концентрации в ней газа:

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_{\text{эф}}}{\partial \varphi'}.$$

Подставляя (8) в уравнение Новье–Стокса (1) и считая, что неоднородность плотности существенна лишь в силе тяжести (приближение Буссинеска), получим уравнение движения:

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial t} + (\vec{w} \nabla) \vec{w} = \vec{g} \beta \varphi - \frac{1}{\rho_0} \text{grad } p' + \nu_{\text{эф}} \nabla^2 \vec{w}, \quad (9)$$

где p' — давление, отсчитываемое от статического, соответствующего значению ρ_0 , Па.

Далее преобразуем уравнение конвективной диффузии (3): подставим в него выражение диффузион-

ного потока газа через формулу (5), заменив в ней ϕ на ϕ' , и тогда

$$\partial \phi' / \partial t + \vec{w} \operatorname{grad} \phi' = D_r \nabla^2 \phi'. \quad (10)$$

Уравнения (2), (9) и (10) описывают свободную конвекцию двухкомпонентного барботажного слоя в принятом приближении.

Для того чтобы замкнуть математическую модель изучаемого явления, сформулируем условия однозначности. Решение системы (2), (9), (10) производится в слое, имеющем форму параллелепипеда с размерами $0 \leq x \leq L_x$, $0 \leq y \leq \pm L_y$ и $0 \leq z \leq L_z$. На боковых стенках задаются следующие условия:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0 \quad u = f(y, z), \phi = \phi(y, z), v = w = 0, \\ \text{при } x = L_x \quad \phi = \phi(y, z), u = v = w = 0; \\ \text{при } y = 0 \quad u = f(x, z), \phi = \phi(x, z), v = w = 0, \\ \text{при } y = \pm L_y \quad u = v = w = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

$$(12)$$

Нижней границей расчетной области является фурменная зона, так как предполагается, что свободная конвекция возникнет в верхнем полупространстве ванны в пределах барботажного слоя. На этой «жидкой» границе ставятся следующие граничные условия:

$$\text{при } z = 0 \quad w = \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \phi'}{\partial z} = 0. \quad (13)$$

На верхней границе барботажного слоя граничные условия аналогичны:

$$\text{при } z = L_z \quad w = \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \phi'}{\partial z} = 0. \quad (14)$$

В окрестностях каждой фурмы задаются распределения концентрации газа и проекции вектора его скорости на ось OX :

$$\phi = \phi_0 \exp \left[-16,4 r_0^2 \left(\frac{\alpha_2 x}{l_1} \right) \right] \exp \left[- \left(\frac{\alpha_1 x}{l_2} \right)^n \right], \quad (15)$$

$$u = u_0 \exp(-16,4 r_0^2) \exp \left[- \left(\frac{\alpha_1 x}{l_2} \right)^n \right], \quad (16)$$

где ϕ_0 — задаваемое значение концентрации газа на границах выходного сечения фурмы; u_0 — скорость газа на оси выходного сечения фурмы, м/с; α_1 , α_2 , l_1 , l_2 и n — эмпирические коэффициенты, регулирующие начальную форму газовой полости в ванне

перед фурмой. Количество фурм на боковых гранях $x = 0$ и $x = L_x$ вдоль оси OY задается в численном эксперименте.

Расчеты выполнены для 2 режимов истечения — пузырькового и струйного. В ходе исследования определяли средние значения трех проекций вектора скорости в заданной точке объема ванны: u — вдоль оси OX , v — OY и w — OZ , а также удельную работу перемешивания (A , Дж/кг), совершаемую в заданной точке за счет наличия в ней переменной силы тяжести с учетом выталкивающей силы. Начало декартовой системы координат совместили с центром выходного отверстия фурмы, ось OX — с продольной осью фурмы, OY — нормально к продольной оси в фурменной плоскости, а OZ — вертикально вверх по отношению к фурменной плоскости. Координаты точек и высоту слоя определяли в калибрах диаметра выходного отверстия фурмы (см. рис. 1–7). Темным цветом на рисунках отмечены зоны, в которых отсутствует движение в рассматриваемом направлении, а светлым — области, где оно имеет место. Линиями на графиках показаны изотакхи.

Анализ результатов численного исследования

На рис. 1 представлена схема свободной конвекции ванны в плоскости XOZ в вертикальном и продольном направлениях при пузырьковом режиме продувки. Выбранный режим интересен тем, что в подобных условиях работают все горизонтальные конвертеры цветной металлургии и аппараты внепечной обработки металла в черной металлургии. Из рис. 1 следует, что в вертикальной плоскости формируется контур циркуляции. Его восходящая ветвь примыкает к фурменной стенке и характеризуется высокой скоростью. Нисходящая ветвь слабо развита и находится в верхней части барботажного слоя у противоположной стенки печи. Контур циркуляции располагается во всем объеме зоны квазистационарного барботажного слоя и захватывает часть переходной зоны. Внутри него, за исключением небольших вихревых зон у поверхности слоя, восходящее движение ванны отсутствует. В восходящей ветви оно происходит с переменной скоростью. Начиная от фурменной зоны до конца переходной поток разгоняется. В пределах квазистационарного слоя скорость восходящего движения падает и у поверхности обрывается в нуль.

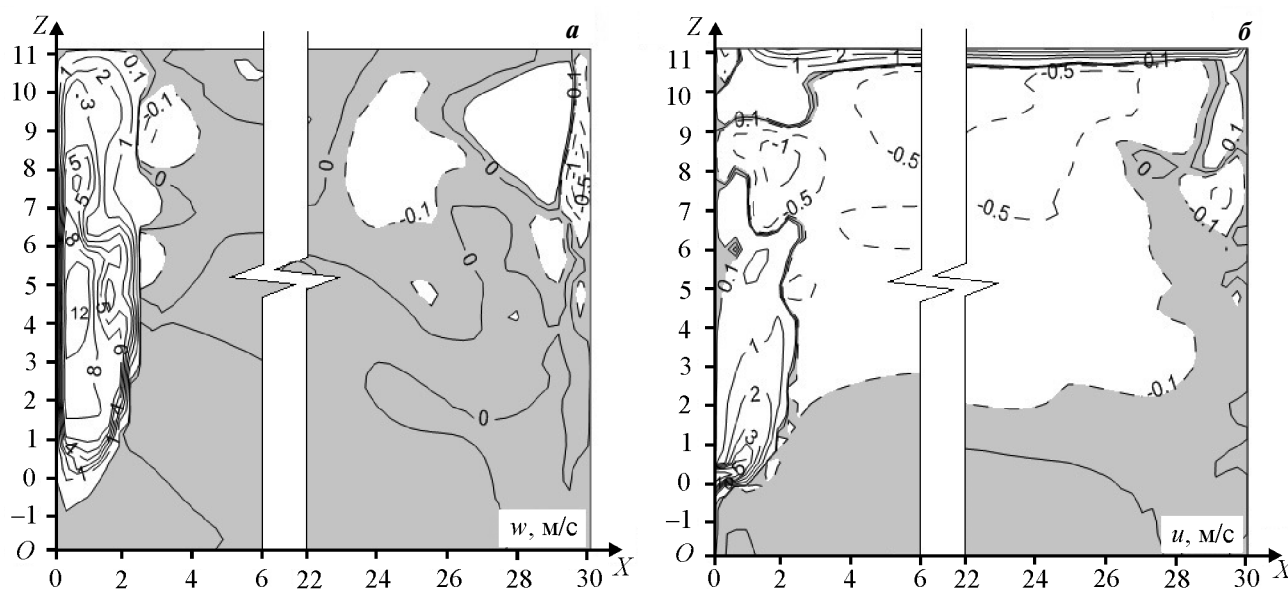


Рис. 1. Схема свободной конвекции ванны барботажного слоя в плоскости XOZ в вертикальном (*а*) и продольном (*б*) направлениях при пузырьковом режиме продувки

$Gn = 0,18$, $H = 11$, $d_0 = 0,01$ м, $Y = 0$

Цифрами указаны значения проекций скорости на заданной изотопе

У поверхности ванны формируется горизонтальная ветвь контура циркуляции, движение в которой происходит в положительном направлении оси OX (см. рис. 1, *б*). На границе переходной зоны формируется нижняя горизонтальная ветвь, движение в которой осуществляется в отрицательном направлении оси OX , т.е. к фурменной стенке. Горизонтальная составляющая скорости потока в этой ветви по абсолютному значению примерно на порядок меньше, чем в верхней ветви. Внутри объема контура циркуляции ванна движется с постоянной скоростью вдоль оси OX в отрицательном направлении. Возникновение продольного движения внутри контура циркуляции, его направление и постоянство скорости практически по всему объему объясняются постоянной величиной разности плотностей слоя у фурменной и противоположной ей стенок. Эта величина, отнесенная к единице длины вдоль оси OX , определяет интенсивность свободной конвекции в указанном направлении.

На рис. 2 представлена схема свободной конвекции ванны в поперечном направлении на различной высоте слоя, начиная от фурменной зоны ($Z = z/d_0$) при том же (пузырьковом) режиме продувки. Как следует из его данных, в фурменной зоне свободная конвекция в этом направлении практически отсутствует, небольшое движение наблюдается

непосредственно в зоне продувки. В середине слоя при $Z = 5,5$ появляются более обширные зоны поперечного движения, особенно у фурменной стенки вокруг точки, расположенной над выходным отверстием фурмы. В этой области увеличиваются площадь и скорость поперечного движения по сравнению с фурменной плоскостью. Наконец, вблизи от поверхности слоя при $Z = 10$ поперечное движение имеет место практически во всем сечении ванны. Его скорость невелика, за исключением зоны над выходным отверстием фурмы. Размеры последней больше, чем в середине слоя, и скорость поперечного движения в ней выше.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что если во всех остальных зонах на всех уровнях поперечное движение направлено к продольной оси OX , то у поверхности ванны — в обратную сторону. В фурменной зоне за пределами зоны продувки практически отсутствует изменение плотности, так как туда не попадает газ. В связи с этим в ней не возникает поперечной свободной конвекции. В переходном и квазистационарном слоях газ насыщает слой, и появляются градиенты плотности. У стенки, противоположной фурменной, такие градиенты создают нисходящую ветвь контура циркуляции, а у фурменной стенки — восходящую. Последняя увеличивается в размерах и изменяет свою структуру

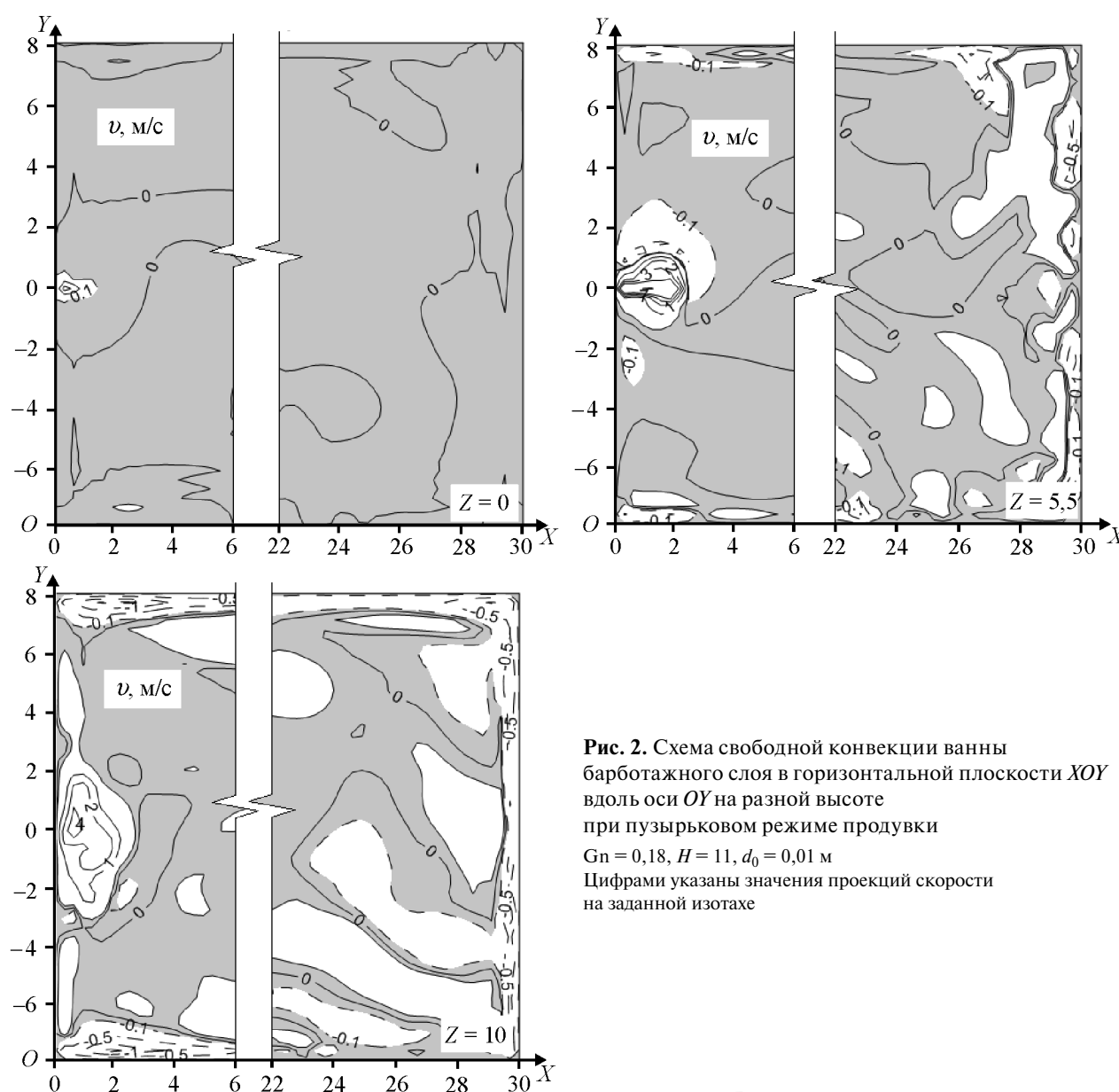


Рис. 2. Схема свободной конвекции ванны барботажного слоя в горизонтальной плоскости XOY вдоль оси OY на разной высоте при пузырьковом режиме продувки
 $Gn = 0,18$, $H = 11$, $d_0 = 0,01$ м
 Цифрами указаны значения проекций скорости на заданной изотaxe

по высоте, соответственно изменяются размеры и характер поперечного движения в зонах у фурменной стенки.

На рис. 3 представлена картина продольного и восходящего движений ванны при ее продувке в режиме $Gn = 0,61$. Принципиально она повторяет схему, показанную на рис. 1. При этом, несмотря на то что скорость истечения воздуха выросла в 1,84 раза, абсолютные значения скоростей свободной конвекции не изменились, а в восходящей ветви (в зоне разгона) даже несколько уменьшились. Размеры восходящей ветви увеличились, что связано с повышением объема ддуваемого газа.

На рис. 4 представлена схема свободной конвекции в вертикальном и продольном направлениях при увеличении относительной высоты слоя и сохранении пузырькового режима истечения. Сопоставляя данные рис. 1 и 4, можно отметить следующее. Расширилась восходящая ветвь контура циркуляции в вертикальной плоскости. При этом уменьшилось среднее значение скорости восходящего движения. Увеличилась по высоте область продольного движения ванны. Ее нижняя граница достигает фурменной зоны. В целом же характер свободно-конвективного движения ванны не изменился.

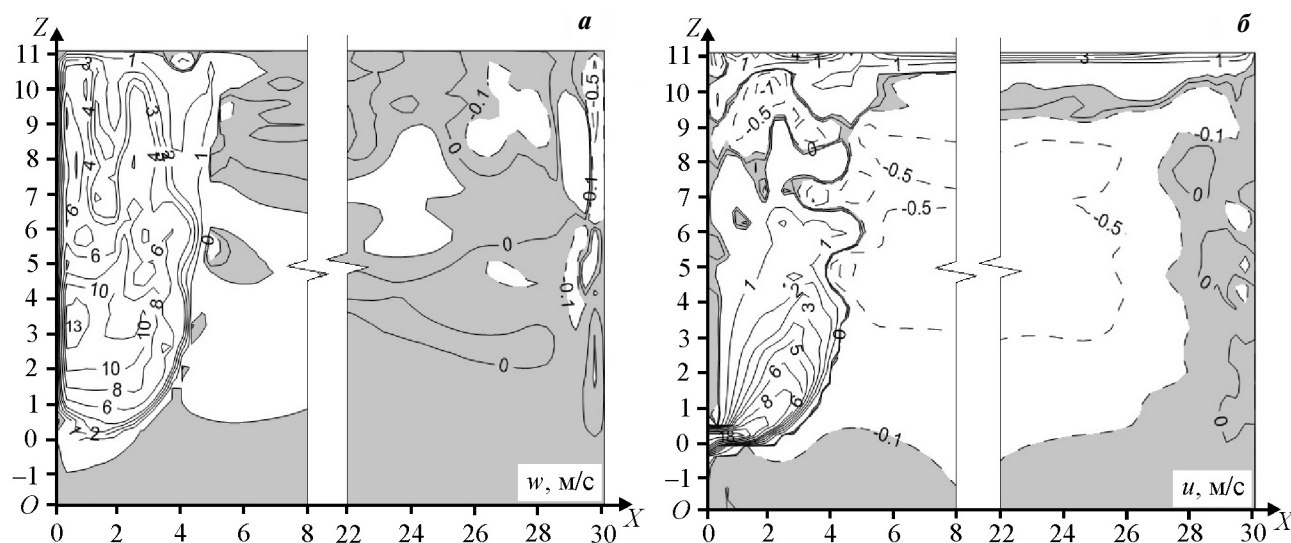


Рис. 3. Схема свободной конвекции ванны барботажного слоя в плоскости XOZ в вертикальном (а) и продольном (б) направлениях при пузырьковом режиме продувки

$Gn = 0,61$, $H = 11$, $d_0 = 0,01$ м, $Y = 0$

Цифрами указаны значения проекций скорости на заданной изотaxe

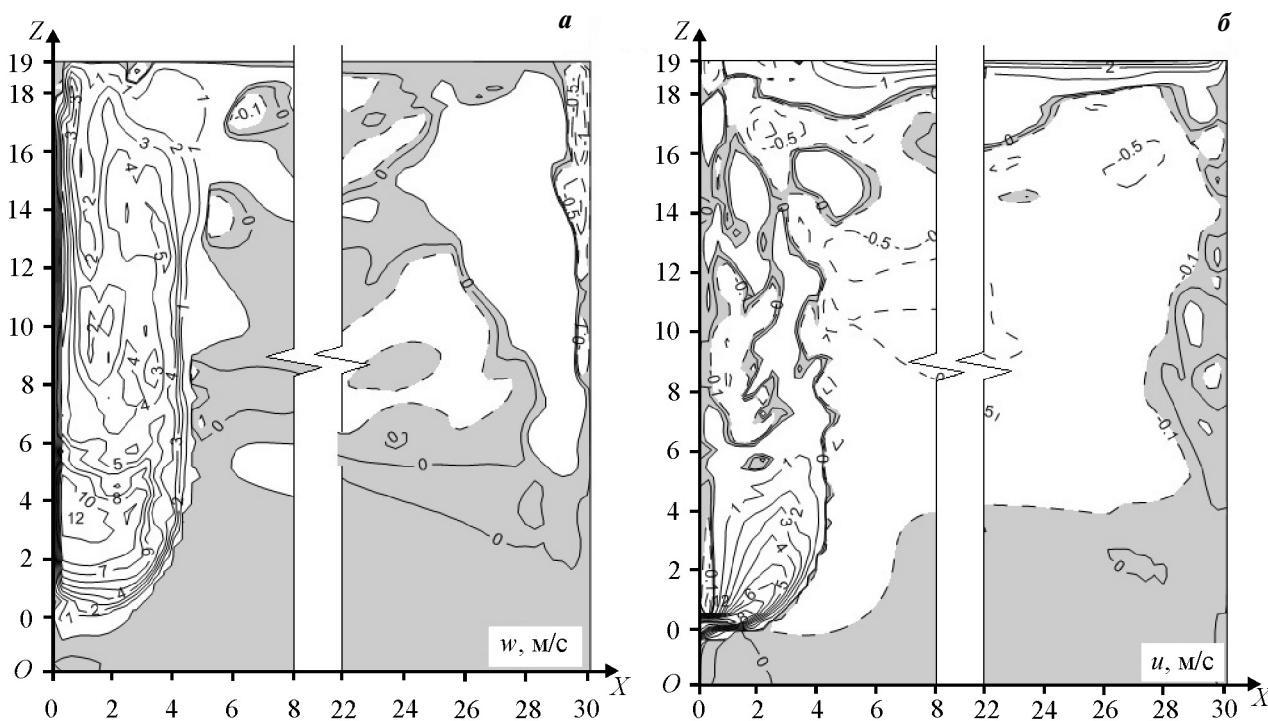


Рис. 4. Схема свободной конвекции ванны барботажного слоя в плоскости XOZ в вертикальном (а) и продольном (б) направлениях при пузырьковом режиме продувки

$Gn = 0,18$, $H = 19$, $d_0 = 0,01$ м, $Y = 0$

Цифрами указаны значения проекций скорости на заданной изотaxe

Таким образом, характер свободной конвекции барботажного слоя при пузырьковом режиме продувки практически не зависит от скорости истечения газа в слой и относительной высоты слоя. Он

определяется не величиной кинетической энергии газа на входе в слой и не его расходом, а характером распределения газа в объеме ванны, который, в свою очередь, в пределах пузырькового режима не

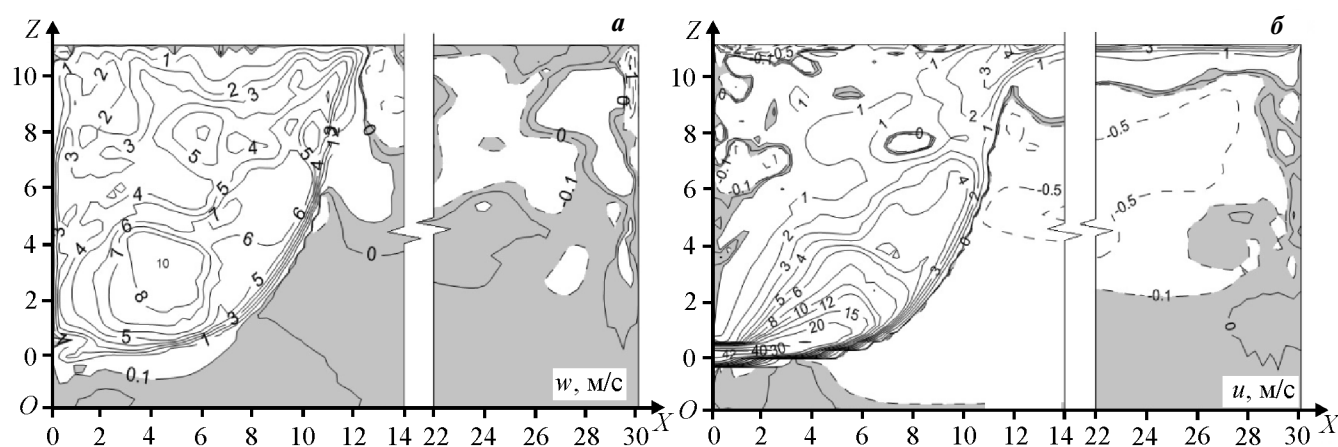


Рис. 5. Схема свободной конвекции ванны барботажного слоя в плоскости XOZ в вертикальном (а) и продольном (б) направлениях при струйном режиме продувки

$Gn = 3$, $H = 11$, $d_0 = 0,01$ м, $Y = 0$

Цифрами указаны значения проекций скорости на заданной изотaxe

меняется при изменении его расхода. В связи с этим не может измениться и характер свободной конвекции.

На рис. 5 представлена схема свободной конвекции в вертикальной плоскости в ванне при струйном режиме продувки с минимально возможным для этого режима значением критерия Глинкова. Сопоставляя данные рис. 1 и 5, можно отметить следующее. В фурменной зоне возле выходного отверстия фурмы появилась зона продувки конечных размеров. В результате этого в глубь ванны от фурменной стенки сместилась внешняя граница восходящей ветви контура циркуляции с высокими скоростями восходящего движения. Тем самым облегчились условия службы фурменной стенки. Также снизилось среднее значение вертикальной составляющей и на порядок, особенно в фурменной и переходной зонах, возросла горизонтальная компонента скорости. При этом зона с интенсивным продольным движением сместилась от фурменной стенки к внешней границе восходящего контура. Внутри контура у поверхности ванны появилась практически сплошная область с нисходящим вихревым течением. Скорость продольного движения и ее направление внутри контура циркуляции остались неизменными, что еще раз подтверждает, что кинематика свободной конвекции не зависит от гидродинамики газового потока.

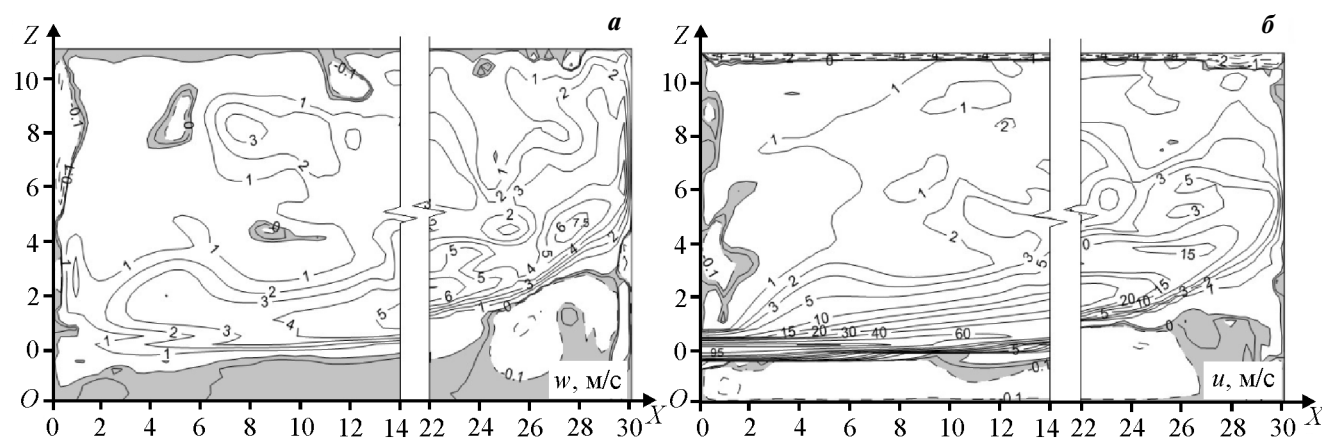
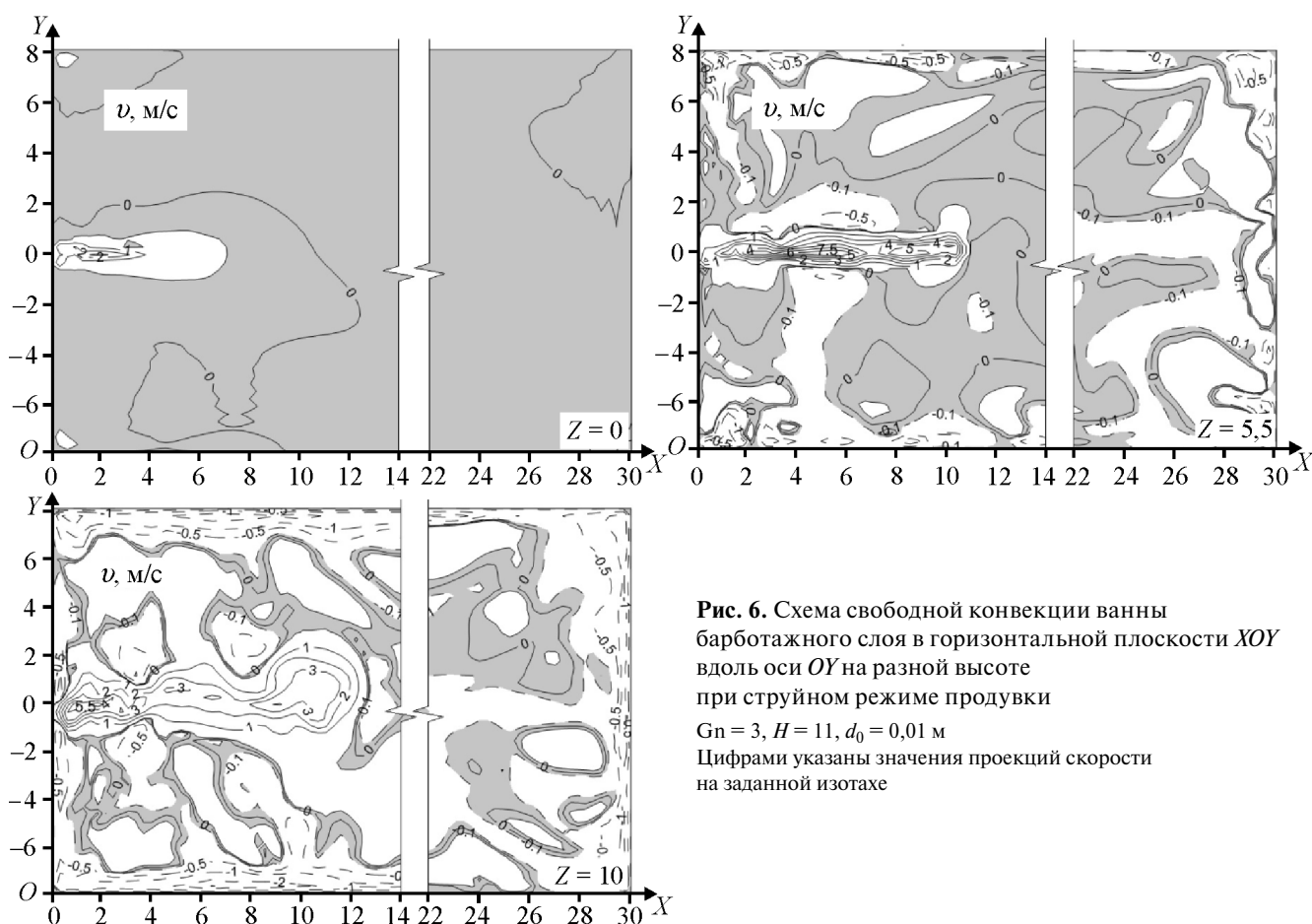
На рис. 6 представлена схема свободной конвекции в поперечном направлении на трех уровнях ванны. В фурменной зоне, как и при пузырьковом режиме истечения, поперечное движение наблюда-

ется только в зоне продувки. Увеличились размеры этой области и на порядок возросла скорость поперечного движения в ней.

На двух других уровнях поперечное движение происходит по всему сечению, в большей части которого оно имеет невысокую постоянную скорость, соответствующую постоянному полю плотностей в зоне квазистационарного слоя. Только в областях, расположенных над зоной продувки, наблюдается активное поперечное движение. Причем размеры этих зон и скорость поперечного движения в них возрастают от фурменной зоны к поверхности барботажного слоя вслед за увеличением размеров восходящего газожидкостного потока.

На рис. 7 представлена схема свободной конвекции в вертикальной плоскости при интенсификации струйного режима продувки. Как видно из рис. 7, а, исчез контур циркуляции в вертикальной плоскости, а направление движения ванны вдоль фурменной стенки изменилось на противоположное. При этом область с высокими скоростями течения удалилась от фурменной стенки к противоположной, и там образовалась слабоподвижная зона. Весь объем ванны участвует в восходящем движении с практически постоянной скоростью. В этот же поток вовлечена жидкость, находящаяся за пределами барботажного слоя — в подфурменной зоне.

В продольном направлении вдоль оси OX характер истечения также изменился (см. рис. 7, б). В зоне квазистационарного слоя исчезла область движения к фурменной стенке с постоянной скоростью, и вся



ванна, за исключением самой верхней части, движется в положительном направлении со скоростью большей, чем при $Gn = 3$.

В фурменной и переходной зонах по ширине всего слоя располагается область с повышенными

скоростями продольного движения. Она не затрагивает область, расположенную у фурменной стенки. В продольное движение также вовлечена жидкость в подфурменной зоне, движение которой направлено к фурменной стенке. Туда же движется ванна на по-

верхности слоя. Размеры этого потока малы, а скорость выше, чем была в предыдущем эксперименте.

В фурменной плоскости изменился характер поперечного движения: оно происходит по всей плоскости, везде направлено к продольной оси (OX) и имеет скорость от $-0,1$ до $-0,5$ м/с, которая возрастает в зоне продувки до 2 м/с. Отметим, что на двух других уровнях изменений не наблюдалось.

Таким образом, в отличие от пузырькового при струйном режиме продувки, варьируя значения критерия Глинкова, можно существенно изменять характер и параметры свободно-конвективного движения. При этом, что особо важно для практики, в объеме слоя исчезают малоподвижные области в объеме слоя, а у фурменной стенки — зоны с высокими скоростями восходящего потока.

Очевидно, все это является результатом изменения структуры слоя в фурменной зоне. Зона продувки при струйном режиме увеличивается, в ней появляется газовая струя, которая влияет на характер распределения газа в объеме ванны. Вслед за этим изменяется поле плотности ванны — генератор свободной конвекции. При переходе к струйному режиму облегчаются условия службы фурменной стенки: по мере интенсификации продувки около нее формируется малоподвижный слой, который защищает ее от механических, тепловых и химических воздействий ванны.

Работа перемешивания

На рис. 8 представлены результаты исследования процесса перемешивания ванны под действием свободной конвекции. Как следует из его данных, основная работа перемешивания совершается в фурменной зоне. В переходной зоне она уменьшается по высоте, а в квазистационарном барботажном слое является величиной постоянной, не зависит ни от режима продувки, ни от координаты точки, в которой определяется, и в наших расчетах составляет $A = 2,5$ кДж/т.

Перемешивание ванны — процесс анизотропный. В вертикальной плоскости оно наиболее интенсивно, в горизонтальной — активное перемешивание происходит в продольном направлении вдоль оси OX , а в поперечном оно практически отсутствует. При пузырьковом режиме продувки независимо от значения критерия Глинкова удельная работа перемешивания в вертикальной плоскости имеет постоянное значение 2,5 кДж/т. В продольном на-

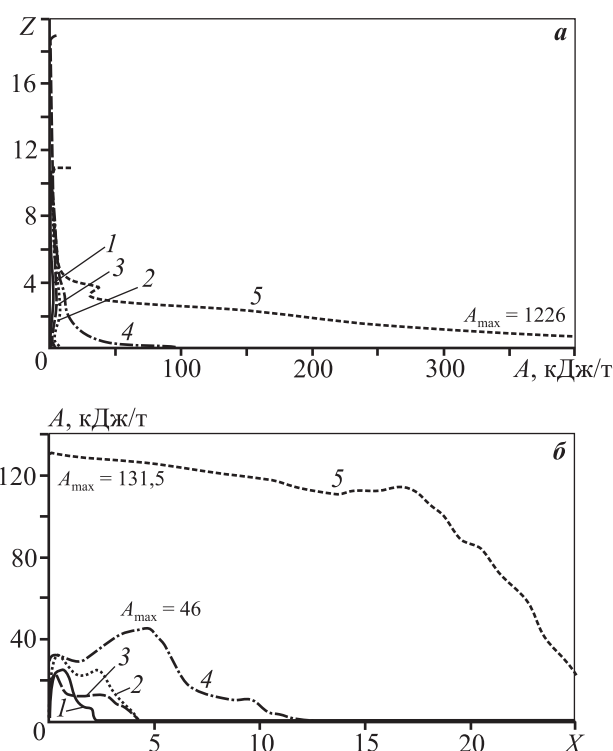


Рис. 8. Удельная работа перемешивания ванны барботажного слоя в плоскости XOZ в вертикальном (**a**) и продольном (**б**) направлениях при разных режимах продувки
 1 — $Gn = 0,18$ и $H = 11$; 2 — $0,61$ и 11 ; 3 — $0,18$ и 19 ; 4 — 3 и 11 ; 5 — $13,3$ и 11

правлении при $Gn = 0,18$ она на ограниченном расстоянии от стенки (1 калибр) возрастает до 25 кДж/т и падает до нуля на расстоянии 2,5 калибра. При интенсификации продувки до $Gn = 0,61$ предельная величина A возросла до 30 кДж/т, а область перемешивания в продольном направлении увеличилось до 5 калибров. При переходе к струйному режиму продувки удельная работа перемешивания в фурменной плоскости существенно возрастает: при $Gn = 3$ ее значение в вертикальном направлении достигает 100 кДж/т, а в продольном — 46 кДж/т. При развитом струйном режиме продувки ($Gn = 13,3$) ее величина в вертикальной плоскости составила 1226 кДж/т, а в продольном — 131,5 кДж/т, захватив область в направлении оси OX в 30 калибров.

Заключение

Выполненное исследование показало, что свободная конвекция оказывает решающее влияние на гидродинамику, а следовательно, и на интенсивность перемешивания ванны печи с барботажным

слоем. Генерируемые им поля скоростей по абсолютному значению скорости во всех направлениях больше или равны максимальным скоростям, генерируемым в ванне за счет механического взаимодействия с ней газовых пузырей и газожидкостных потоков. Мощность, затрачиваемая на перемешивание при свободно-конвективном движении, на порядок выше, чем при пневматическом перемешивании. Установлена взаимосвязь между режимом продувки и особенностями кинематики и гидродинамики ванны с барботажным слоем. Показана нецелесообразность форсирования работы печи путем постепенного увеличения скорости подачи газа в слой в пределах пузырькового и переходного режимов продувки. Это не интенсифицирует перемешивание ванны, а увеличивает брызгоунос из слоя и усиливает износ огнеупорной футеровки фурменной стенки.

Оптимизация гидродинамики ванны заключается в переходе от пузырькового или переходного режима продувки к развитому струйному. При этом область повышенных скоростей смещается в глубь ванны, удаляясь от фурменной стенки и локализуясь в фурменной зоне. Весь объем ванны участвует в движении в вертикальной плоскости с умеренными скоростями (1–3 м/с). Вблизи фурменной стенки образуется слабобподвижный слой, защищающий ее от агрессивного воздействия расплава. Мощность перемешивания в вертикальной плоскости возрастает на два порядка, а в продольном направлении — на один.

Работа поддержана Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы».

Литература

1. *Sighn V., Kumar J., Bhanu C. et al. // ISIJ International. 2007. Vol. 47, № 11. P. 1605–1612.*
2. *You-Yong Kwon, Jian Zhang, Hae-Geon Zee // ISIJ International. 2008. Vol. 48, № 7. P. 891–900.*
3. *Zhao Y.-F., Irons G.A. // Metal. Trans. B. 1990. Vol. 21B. P. 997–1003.*
4. *Варенцов А.А., Капустин Е.А. // Изв. АН СССР. Металлы. 1983. № 6. С. 23–32.*
5. *Grevet J.H., Szekely J., El-Kaddah N. // Inter. J. Heat Mass. Transfer. 1982. Vol. 25, № 4. P. 487–497.*
6. Теория турбулентных струй / Под ред. Г.Н. Абрамовича. М.: Наука, 1984.
7. *Здановская В.Г. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1980. № 11. С. 128–131.*
8. *Сборщиков Г.С., Вельтищев Н.Ф., Володин А.М., Крупенников С.А. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2013. № 11. С. 25–27.*
9. *Мастрюков Б.С., Сборщиков Г.С. Теплофизика металлургических процессов. М.: Металлургия, 1993.*
10. *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.*
11. *Chorin A.J. // Mathemat. Comput. 1968. Vol. 22, № 104. P. 745–762.*