

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

КАФЕДРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Володин Алексей Михайлович

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ НА  
ГИДРОДИНАМИКУ ПЕЧЕЙ С БАРБОТАЖНЫМ СЛОЕМ ТИПА  
ПЕЧЕЙ ВАНЮКОВА И РОМЕЛТ С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ  
ПОВЫШЕНИЯ ИХ УДЕЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Специальность 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов»

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
д.т.н., проф. Сборщиков Г.С.

Москва – 2019

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Парк печей, действующих в настоящее время в металлургии, и в том числе, плавильных ванн и шахтных печей, морально устарел. Во всем мире активно разрабатываются новые технологии плавильных процессов и печи для их реализации. Заметное место в этих работах занимают процессы в барботажном слое и печи для реализации этих процессов. Одной из задач, решаемых при создании новых технологических процессов и аппаратов, является достижение предельных значений технико-экономических показателей их работы. Этим определяется актуальность представленной работы.

### **Цель работы**

Исследование влияния свободной конвекции на гидродинамику ванны печей Ванюкова и Ромелт для выяснения возможности использования этого механизма для повышения удельной производительности указанных печей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучение особенностей процессов тепломассообмена в ванне печей Ванюкова и Ромелт и выявление роли гидродинамики в этих процессах.
2. Изучение влияния свободной конвекции на гидродинамику ванны указанных печей в сравнении с известными механизмами ее перемешивания.
3. Изучение возможностей управления работой печей путем воздействия на свободную конвекцию в ванне.
4. Разработка рекомендаций по оптимизации гидродинамического режима ванны печей Ванюкова и Ромелт.

### **Практическая значимость работы**

1. Создана программа, позволяющая на компьютере анализировать гидродинамику ванны печей Ванюкова и Ромелт и вносить необходимые коррективы в режим продувки.
2. Установлено, что при работе печей на реализуемых в настоящее время режимах продувки: пузырьковом и переходном, вдуваемый в ванну через боковые фурмы газ, покидает ее в пределах узкого пристеночного слоя, создавая в нем высокоскоростные восходящие потоки и избыточную концентрацию реагентов, восстановителя или окислителя. Остальная часть ванны слабоподвижна и не участвует в обменных процессах. Форсирование продувки при работе в указанных режимах не приводит к интенсификации перемешивания ванны, а приводит к повышению уноса из слоя.

3. Показано, что после перехода на струйный режим продувки по мере ее форсирования гидродинамика ванны приближается к режиму идеального смешения. Застойные зоны в объеме ванны сокращаются и исчезают. Одновременно исчезают высокоскоростные вертикальные контуры циркуляции. У фурменной стенки образуются слабоподвижные зоны. Это приводит к сокращению уноса из слоя и снижению механического, химического и теплового воздействия ванны на стенку.

4. Результаты работы переданы потребителю, о чем имеется соответствующий акт.

#### **Научная новизна результатов исследования**

1. Подтверждена гипотеза о решающем влиянии свободной конвекции на гидродинамику ванны печей с барботажным слоем типа печи Ванюкова или Ромелт.

Независимо от режима продувки средняя скорость перемешивания ванны за счет свободноконвективного движения имеет величину от 1 до 3 м/с, в то время как средняя скорость, генерируемая динамическим воздействием на ванну газового потока или всплывающих газовых пузырей – от 0,01 до 0,2 м/с.

2. Установлено, что перемешивание ванны происходит в основном за счет свободной конвекции в фурменной зоне слоя.

При пузырьковом режиме продувки удельная мощность перемешивания в вертикальной плоскости в фурменной зоне имеет порядок 2 кВт/т, а в зоне квазистационарного слоя для того же режима 0,3 кВт/т.

Для струйного режима эта величина составляет соответственно 46 кВт/т для фурменной зоны и 2 кВт/т для квазистационарного слоя.

3. Сформулирован механизм гравитационного перемешивания. Установлена анизотропия перемешивания в вертикальном и продольном направлениях.

Интенсивность перемешивания за счет свободной конвекции зависит от характера распределения газа в фурменной зоне.

4. Создана математическая модель гидродинамики барботажного слоя с учетом нестационарности плотности и динамического коэффициента вязкости.

В представленной математической модели впервые учтена неравномерность распределения газа по объему барботажного слоя. Это обстоятельство обуславливает возникновение переменного поля сил тяжести. Переменными также являются сила вязкого трения и сила давления. Перечисленные уточнения позволяют анализировать гидродинамику ванны не только в интегральной форме, но и в дифференциальной.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях

1. Научно-практическая конференция «Творческое наследие Б.И. Китаева», 2009, г. Екатеринбург;
2. 64-е Дни науки студентов и молодых специалистов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции, 2009, г. Москва (НИТУ «МИСиС»);
3. VI Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», 15-20 октября, 2012, г. Москва (НИТУ «МИСиС»);
4. VII Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», 15-17 октября, 2014, г., Москва (НИТУ «МИСиС»);
5. VIII Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», 10-12 октября, 2016, г. Москва (НИТУ «МИСиС»);
6. IX Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», 12-14 декабря 2018, г. Москва (НИТУ «МИСиС»).

### **Структура и объем работы**

Диссертация изложена на 142 страницах и содержит введение, 4 главы, 72 рисунка, 3 таблицы, 1 приложение. Список цитируемой литературы состоит из 97 наименований.

### **Публикации**

По результатам диссертационной работы опубликовано 11 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

### **Достоверность научных результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием фундаментальных законов природы при построении математической модели, большим числом итераций, реализуемых при получении каждого результата численного эксперимента, а также хорошим согласованием этих результатов с данными физических экспериментов других авторов.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\vec{w}$  – локальное значение вектора скорости, м/с.

$u, v, w$  – проекции вектора скорости на оси  $OX, OY, OZ$ , м/с.

$t$  – время, с.

$\vec{g}$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

$\beta$  – зависимость эффективной плотности от концентрации газовой фазы:

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho_{\text{эф}}}{\partial \varphi} \right), \text{ где } \rho_0 \approx 0,6\rho_{\text{ж}}.$$

$\varphi$  – локальное истинное газосодержание, доли от единицы.

$X = \frac{x}{d_0}; Y = \frac{y}{d_0}; Z = \frac{z}{d_0}$  – безразмерные координаты, где  $d_0$  – диаметр выходного отверстия

фурмы, м.

$\rho_{\text{эф}}$  – эффективное локальное значение плотности барботажного слоя, кг/м<sup>3</sup>.

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

$\nu_{\text{эф}}$  – эффективное локальное значение кинематического коэффициента вязкости, м<sup>2</sup>/с;

$$\nu_{\text{эф}} = \frac{\mu_{\text{эф}}}{\rho_{\text{эф}}},$$

где  $\mu_{\text{эф}}$  – эффективное локальное значение динамического коэффициента вязкости, Па·с.

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

$D_{\text{г}}$  – коэффициент молекулярной диффузии газа в ванне, м<sup>2</sup>/с.

### Критерии подобия

$Gn$  – критерий подобия Глинкова, физический смысл – отношение динамического давления газового потока к статическому давлению ванны на выходе из фурмы:

$$Gn = \frac{\rho_{\text{г}} u_0^2}{\rho_{\text{ж}} g h_{\text{ж}}}.$$

$H$  – относительная высота слоя, критерий подобия параметрического типа

$$H = \frac{h_{\text{ж}}}{d_0},$$

где  $h_{\text{ж}}$  – высота слоя жидкости над продольной осью фурмы при отсутствии продувки, м.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика работы. Изложены цели и задачи исследования.

**В первой главе** проанализированы особенности процессов теплообмена в ваннах печей с барботажным слоем. Показано, что в любом процессе межфазного обмена,

а также при переносе теплоты или массы целевого компонента в объеме ванны интенсивность переноса зависит от локального значения скорости перемешивания ванны в степени, большей единицы. В связи с этим сделан вывод, что для решения поставленной задачи необходимо научиться управлять гидродинамикой ванны рассматриваемых печей. Анализ существующих моделей гидродинамики барботажного слоя показал, что все они основаны на рассмотрении динамического взаимодействия в ванне газовой фазы с жидкой. Существует два подхода при описании этого взаимодействия – термодинамический и гидродинамический. Подход с позиции термодинамики необратимых процессов определяет величину удельной мощности перемешивания расплава, которая остается одинаковой, как при струйной продувке, так и при пузырьковом барботаже, равной 32 Вт/т расплава. При этом расчетное значение средней скорости циркуляции ванны составляет 0,117 м/с.

Гидродинамический подход, рассматривающий процесс передачи газом жидкости своего импульса, определяет предельное значение скорости перемешивания ванны величиной 0,2 м/с. Вместе с тем по данным В.Г.Здановской, изучавшей процессы массообмена на промышленных печах с барботажным слоем, эта величина на действующих агрегатах не должна быть меньше 0,8 м/с. На основании этого сделан вывод о том, что помимо механического взаимодействия газа с жидкостью гидродинамика слоя в рассматриваемых печах формируется под воздействием еще одного механизма. В качестве такого механизма решено было рассмотреть гравитационное перемешивание ванны. В пользу этой гипотезы говорят следующие факты. В печах Ванюкова и Ромелт газ подается в расплав через боковые фурмы относительно большого диаметра, расположенные на значительном расстоянии друг от друга. В связи с этим в фурменной зоне печи имеет место неравномерное распределение газа по объему расплава, что создает неравномерное поле силы тяжести и таким образом генерирует свободную конвекцию. В связи с тем, что высота слоя над фурменной зоной относительно невелика, свободная конвекция может охватывать либо часть объема слоя, либо весь слой. Исходя из этой гипотезы были сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** представлены математическая модель свободной конвекции в ваннах печей Ванюкова и Ромелт и программа для ее реализации на ЭВМ\*.

Окончательно в векторной форме система главных уравнений модели имеет вид:

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

---

\* В разработке программы реализации математической модели принимали участие профессор д.ф.-м.н. Н.Ф. Вельтищев и профессор д.т.н. С.А. Крупенников.

$$\frac{\partial \rho_{\text{эф}}}{\partial t} + \text{div} (\rho_{\text{эф}} \vec{w}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \vec{w} \text{ grad } \varphi = D_r \nabla^2 \varphi. \quad (3)$$

Первые два уравнения выражают законы сохранения импульса и массы в барботажном слое с учетом изменяющегося в пространстве и во времени локального газосодержания и, как следствие этого, эффективных значений плотности и кинематического коэффициента вязкости. Последнее уравнение выражает закон сохранения массы для газовой фазы.

Для конкретизации задачи сформулировали условия однозначности.

Представили рабочее пространство печи в форме параллелепипеда, на боковой стенке которого установлена горизонтальная фурма. Поместили начало прямоугольной системы координат в центр выходного отверстия сопла фурмы. Ось ОХ направили по продольной оси фурмы. Ось ОУ направили по поперечной оси выходного отверстия сопла фурмы. Ось ОZ – по вертикальной оси выходного отверстия сопла фурмы. В качестве фурменной плоскости принимали горизонтальную плоскость, на которой располагается продольная ось фурмы.

Система главных уравнений в совокупности с условиями однозначности представляет собой замкнутую математическую модель процесса свободной конвекции, возникающей в ванне прямоугольного сечения при вдувании в жидкость газа через горизонтальную фурму, установленную под уровнем жидкости.

Задача решается численно с использованием метода расщепления, в котором дифференциальные операторы в системе главных уравнений разбиваются на два конечно-разностных оператора. В первом операторе на каждом шаге по времени учитываются только процессы конвекции и диффузии и вычисляются вспомогательные скорости без учета силы давления. Эти скорости используются при численном решении второго оператора. Далее с помощью итерационной процедуры определяется поле давления, а затем – поле окончательных значений скоростей.

Общая схема численного интегрирования состоит из нескольких последовательно выполняемых процедур:

- расчет поля концентраций газа,
- расчет эффективных значений плотности и вязкости бинарной смеси,
- расчет вспомогательных скоростей,
- расчет давления,
- расчет поля окончательных значений скоростей,

– расчет осредненных характеристик перемешивания.

Для выполнения расчетов с заданной точностью потребовалось реализовывать до 200 000 итераций в каждой исследуемой точке объема ванны.

Разработанная программа получила государственную аккредитацию. Свидетельство № 2016663532 от 12.12.2016 года.

**В третьей главе** представлены результаты численного исследования свободной конвекции, возникающей в ваннах изучаемых печей.

При продувке ванны через боковую фурму, установленную под уровнем барботажного слоя, газ распределяется в объеме ванны по-разному. Наиболее неравномерное распределение газа имеет место в фурменной зоне – области барботажного слоя, расположенной вокруг продольных осей боковых фурм. Размер фурменной зоны по высоте равен диаметру фурмы. Над фурменной зоной располагается переходная зона, в пределах которой происходит выравнивание концентраций газа по объему ванны и стабилизация этой величины во времени. Ее размер – пять диаметров фурмы. Над переходной зоной располагается зона квазистационарного слоя. В этой зоне концентрация газа близка к удерживающей способности слоя (40% от общего объема квазистационарного слоя) и практически постоянна по объему.

Исследование структуры барботажного слоя, полей скоростей в нем, определение средних значений скорости циркуляции ванны, локальных и средних значений удельной мощности перемешивания под влиянием свободной конвекции проводились для системы «вода-воздух». Это связано с тем, что имеющиеся результаты лабораторных исследований гидродинамики и массообмена на физических моделях, которые проводились с использованием в качестве рабочих сред воды и воздуха, использовались в данной работе для проверки адекватности созданной модели. В дальнейшем все расчеты были повторены для системы воздух – металлургический расплав при температуре 1450 °С.

В ходе численных экспериментов реализовывались два режима продувки: пузырьковый ( $0,18 \leq Gn \leq 1$ ) и струйный ( $3 \leq Gn \leq 13,3$ ).

Каждый режим реализовывали для двух значений высоты слоя:  $H=11$  и  $H=19$ .

**Проверку адекватности математической модели** выполняли путем сравнения расчетного распределения эффективной плотности слоя в фурменной плоскости и на выходе из него, а также распределения газа по объему слоя с соответствующими экспериментальными данными Г.Т. Альмусина.

Результаты представлены на рисунке 1 и свидетельствуют о хорошем согласовании расчетов с экспериментальными данными.

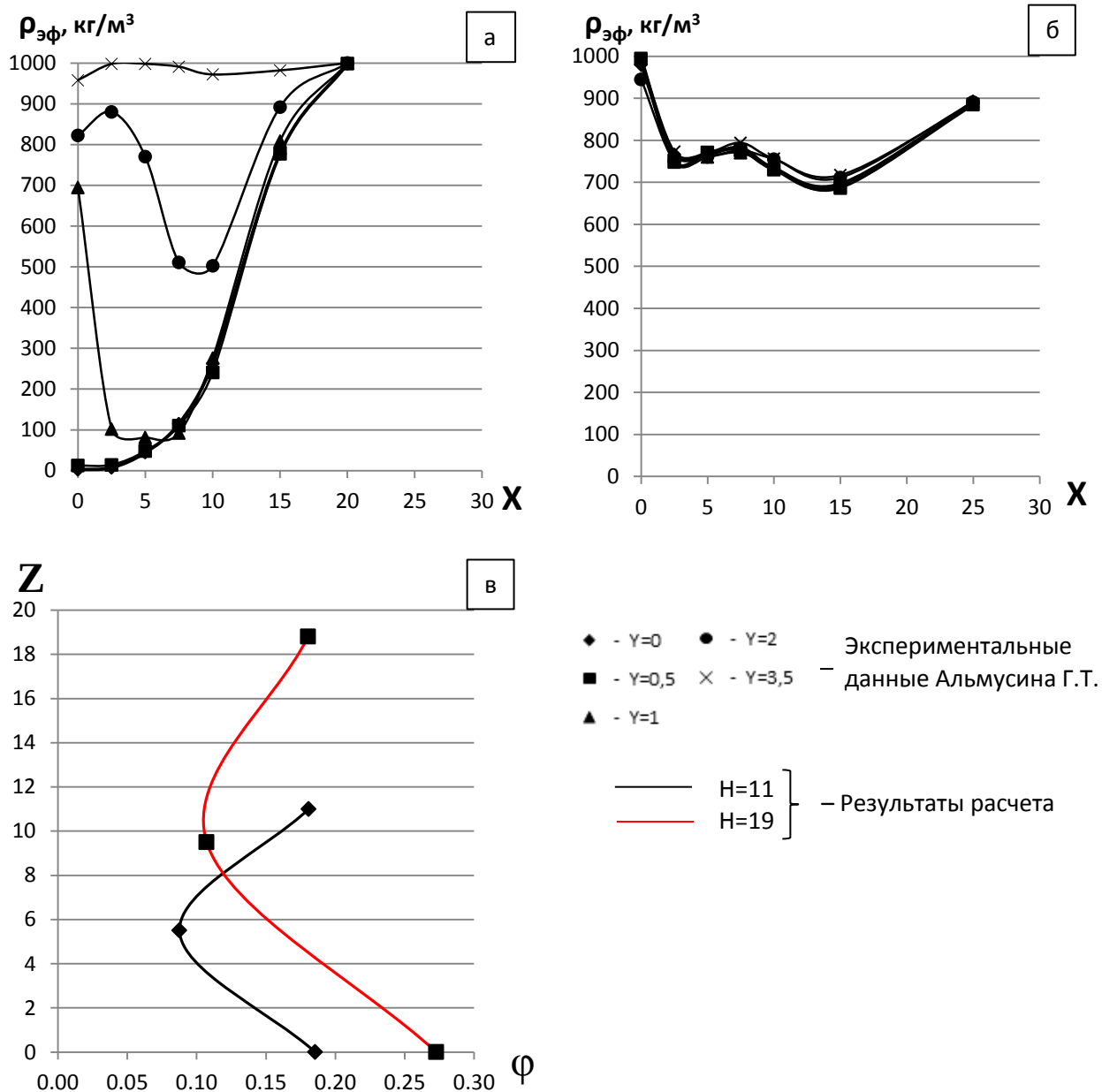


Рисунок 1 – Изменение локальных значений эффективной плотности барботажного слоя в фурменной плоскости при его продувке в струйном режиме на уровнях  $Z=0$  (а) и  $Z=19$  (б) при  $Gn=13,3$  и  $H=19$ , а также осредненного в плоскости газосодержания (в) по высоте барботажного слоя (доли единицы) при  $Gn=13,3$  для высот слоя  $H=11$  и  $H=19$

### Кинематика барботажного слоя

Результаты численного исследования структуры и кинематики свободноконвективного движения в барботажном слое представлены графически. Области в объеме ванны, где имеется газовая фаза, выделяются более светлым тоном. Линиями обозначены изотакси, контуры течения с постоянной скоростью, значение которой обозначены соответствующими цифрами от 0,1 м/с и более. Области с более низкими скоростями движения ограничены изотаксами с темным тоном.

На рисунках 2÷4 представлены схемы свободной конвекции ванны при пузырьковом режиме продувки ( $Gn = 0,18$  и  $0,61$ ,  $H=11$  и  $19$ ).

Выбранные режимы интересны тем, что в подобных режимах работают все горизонтальные конвертеры цветной металлургии и аппараты внепечной обработки металла в черной металлургии.

На рисунке 2 видно, что в вертикальной плоскости формируется контур циркуляции. Восходящая ветвь контура примыкает к фурменной стенке, нисходящая – к противоположной ей стенке. Восходящая ветвь характеризуется высокими скоростями движения. Максимальные значения вертикальной составляющей локальной скорости достигают значений 10-12 м/с. Нисходящая ветвь – слаборазвита. Внутри контура циркуляции за исключением небольших вихревых зон у поверхности ванны восходящее движение отсутствует.

У поверхности ванны формируется горизонтальная ветвь контура циркуляции, движение в которой направлено в положительном направлении оси ОХ. На границе переходной зоны формируется нижняя горизонтальная ветвь, движение в которой направлено в отрицательном направлении оси ОХ, т.е. к фурменной стенке. Продольная составляющая скорости потока в этой ветви по абсолютному значению примерно на порядок меньше, чем в верхней ветви. Внутри контура циркуляции жидкость движется вдоль оси ОХ в отрицательном направлении с постоянной скоростью, равной 0,5 м/с.

Возникновение продольного движения внутри контура циркуляции, его направление и постоянство скорости практически по всему объему объясняется постоянной величиной разности плотностей ванны у фурменной и противоположной ей стенок. Эта величина, отнесенная к единице длины вдоль оси ОХ определяет интенсивность свободной конвекции в продольном направлении.

При увеличении значения критерия Глинкова до 0,61 несмотря на то, что скорость истечения воздуха возросла в 1,84 раза, абсолютные значения скоростей движения ванны не изменились. Таким образом, механическая энергия газового потока, которая по сравнению с первым режимом ( $Gn = 0,18$ ) возросла в 3 раза, не оказывает заметного влияния на характер свободной конвекции в ванне.

При пузырьковом режиме продувки в фурменной зоне свободная конвекция в поперечном направлении практически отсутствует. Вблизи от поверхности слоя, при  $Z=10$ , поперечное движение имеет место практически по всей площади ванны. Скорость этого движения невелика, за исключением зоны над выходным отверстием фурмы.

Влияние изменения высоты барботажного слоя на свободную конвекцию в нем демонстрируется на рисунке 3.

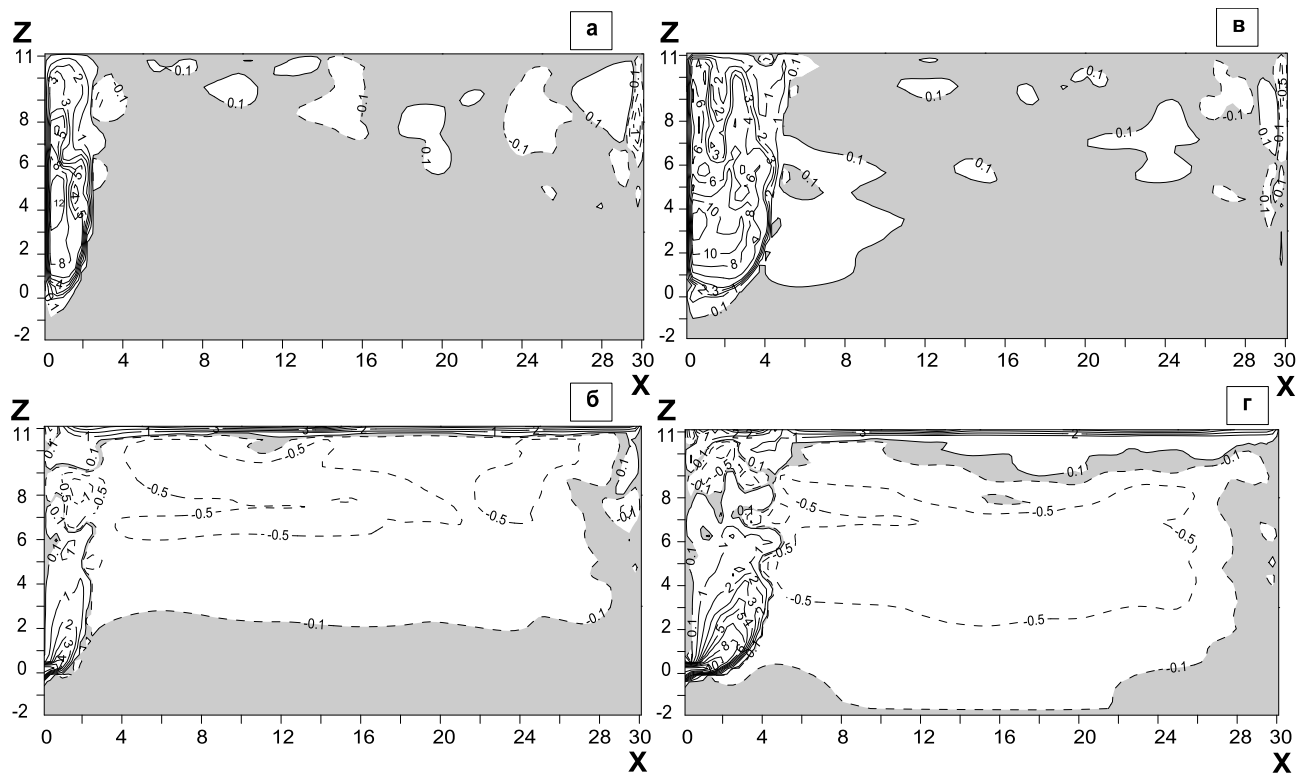


Рисунок 2 – Схема свободной конвекции ванны в плоскости  $XOZ$  для  $H=11$  в вертикальном (а, в) и продольном (б, г) направлениях при пузырьковом режиме продувки при  $Gn = 0,18$  (а, б) и  $Gn = 0,61$  (в, г)

Увеличение высоты слоя при постоянном режиме продувки приводит к заметному расширению восходящего контура циркуляции и насыщению газом верхней части барботажного слоя. При этом скоростной режим ванны не изменяется.

Таким образом, кинематика свободной конвекции барботажного слоя при пузырьковом режиме продувки практически не зависят от скорости истечения газа в слой и от относительной высоты слоя. Она определяется не величиной кинетической энергии

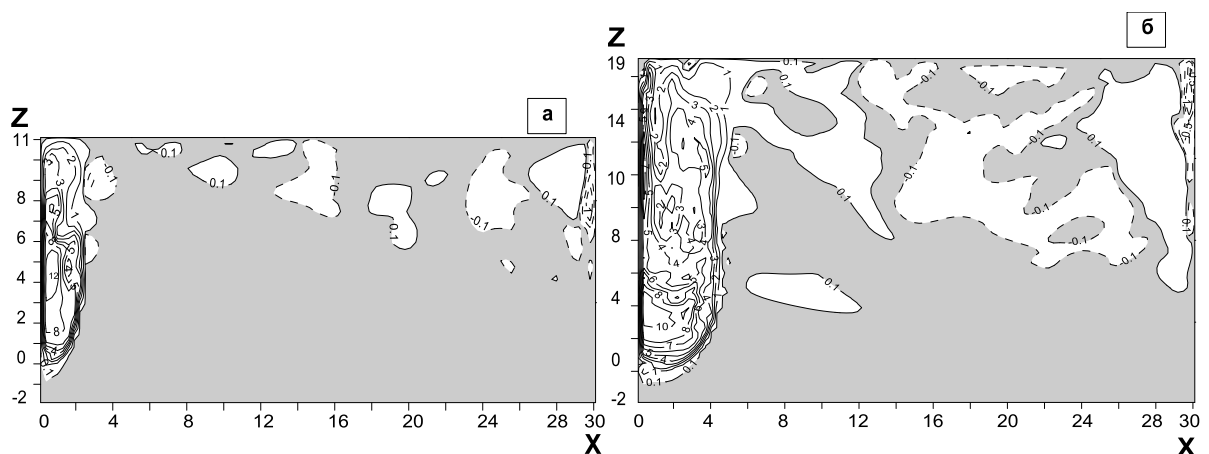


Рисунок 3 – Схема свободной конвекции ванны в плоскости  $XOZ$  в вертикальном направлении при пузырьковом режиме продувки при  $Gn = 0,18$  для высоты слоя  $H=11$ (а) и  $H=19$  (б)

газа на входе в слой и не его расходом, а характером его распределения в объеме ванны. В пределах пузырькового режима продувки характер распределения газа в ванне не меняется при изменении его расхода и высоты слоя. В связи с этим не может измениться и характер свободной конвекции.

Во всех исследованных режимах локальные значения скоростей циркуляции ванны, как в продольном, так и в вертикальном направлениях оказались больше значений скоростей, возникающих в ванне в результате механического взаимодействия газа с расплавом. Это свидетельствует о решающем влиянии гравитации на гидродинамику ванны при продувке в рассматриваемом режиме.

На рисунках 4(а, б) представлена схема свободной конвекции в ванне при струйном режиме продувки с минимально возможным для этого режима значением критерия Глинкова. Сопоставляя данные рисунков 2 и 4 можно отметить следующее. Изменилась структура контура циркуляции. Его размеры значительно увеличились. В циркуляцию вовлечена определенная часть подфурменной зоны. Возле выходного отверстия фурмы появилась устойчивая газовая полость конечных размеров. Изменилась кинематика фурменной зоны. Вертикальная составляющая скорости ванны уменьшилась по сравнению с пузырьковым режимом, а продольная – возросла почти на порядок. При этом зона с интенсивным продольным движением сместилась вглубь слоя. Скорость продольного движения и ее направление внутри контура циркуляции остались неизменными, что еще раз подтверждает, что кинематика свободной конвекции не зависит от динамики газового потока.

При интенсификации струйного режима продувки (рис. 4(в, г)) область восходящего движения с высокой скоростью переместилась от фурменной стенки и локализована в глубине фурменной зоны. У фурменной стенки образовалась слабо подвижная область. Весь объем ванны участвует в восходящем движении. В восходящее движение вовлечена также жидкость в подфурменной зоне.

В продольном направлении, вдоль оси ОХ, характер движения также изменился. В зоне квазистационарного слоя исчезла область движения к фурменной стенке с постоянной скоростью. В этой зоне вся ванна за исключением самой верхней части движется в положительном направлении оси ОХ со скоростью большей, чем при  $Gn = 3$ .

В фурменной и переходной зонах по ширине всей ванны располагается область с повышенными скоростями продольного движения. Она не затрагивает пространство, расположенное у фурменной стенки. В продольное движение вовлечена жидкость в подфурменной зоне. Здесь движение направлено к фурменной стенке. К фурменной стенке направлено также движение ванны на поверхности слоя.

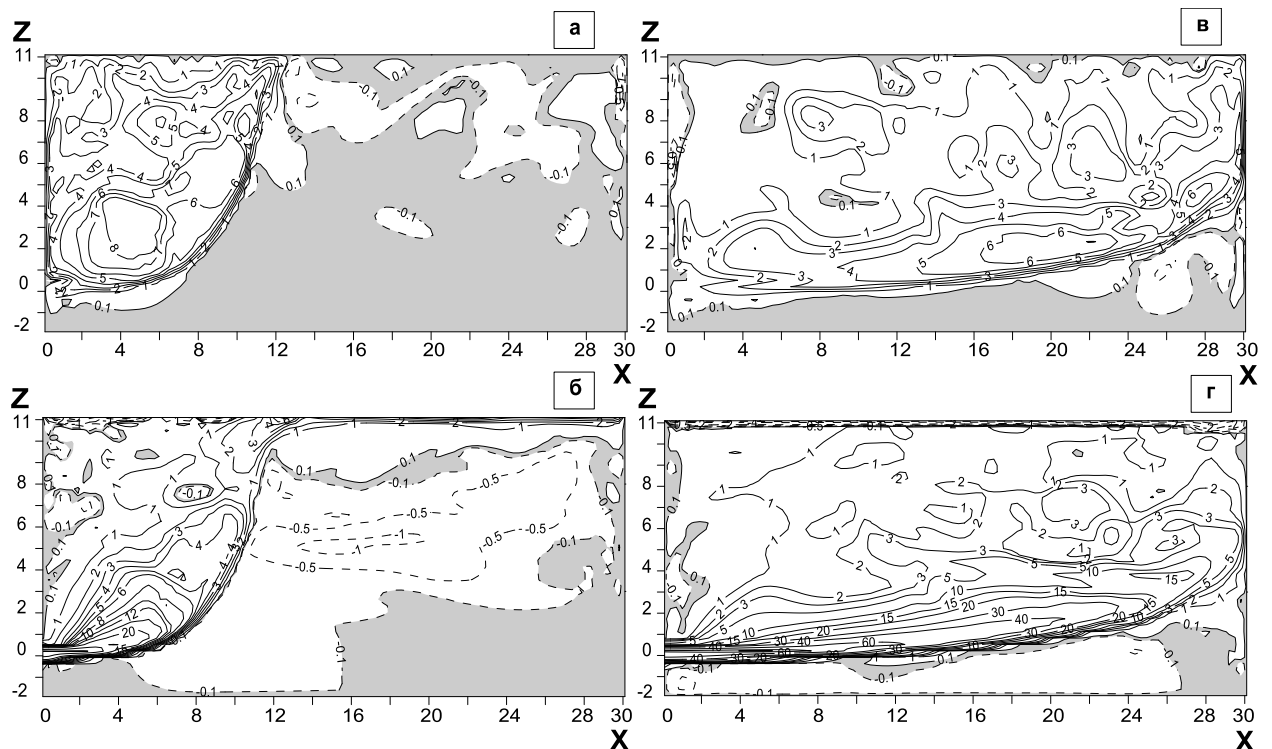


Рисунок 4 – Схема свободной конвекции ванны в плоскости  $XOZ$  для  $H=11$  в вертикальном (а, в) и продольном (б, г) направлениях при струйном режиме продувки при  $Gn=3$  (а, б) и  $Gn=13,3$  (в, г)

В целом же по ванне локальные значения скорости снижаются, и кипение становится не очаговым, как при пузырьковом режиме, с интенсивным брызгоуносом, а более равномерным и спокойным.

#### Интегральная оценка кинематики свободноконвективного движения ванны

В качестве интегральных кинематических характеристик барботажного слоя приняли осредненные значения скоростей в фиксированных по высоте плоскостях ванны,  $\bar{w}_z$ , и осредненную по объему ванны скорость,  $\bar{w}$ .

Скорость ванны в сечении,  $\bar{w}_z$ , определяли как среднеарифметическое значение всех проекций скоростей в каждой точке «i» фиксированного сечения  $z$ .

На рисунках 5(а, б) представлены результаты численных исследований изменения  $\bar{w}_z$ , по высоте слоя в зависимости от режима продувки. Как следует из рисунка максимальные скорости при пузырьковом и переходном режимах продувки имеют место в фурменной зоне и на выходе из слоя. В зоне квазистационарного слоя она остается величиной практически постоянной и небольшой по абсолютному значению. При изменении критерия Глинкова в интервале от 0,18 до 2,7 скорость ванны в фурменной зоне изменяется от 1 м/с до 1,5 м/с. В зоне квазистационарного слоя она равна соответственно 0,4 м/с и 0,8 м/с. На выходе из слоя скорость для всех реализованных режимов продувки при  $Gn < 3$  постоянна и составляет 4 м/с.

При увеличении высоты слоя характер изменения скорости по высоте слоя и ее абсолютные значения в зоне квазистационарного слоя остались практически неизменными. Однако, в фурменной зоне она возросла. Максимальное значение скорости в этой зоне достигает 2,6 м/с.

При переходе к струйному режиму продувки в фурменной зоне и на выходе из слоя  $\bar{w}_z$  резко возрастает: при  $Gn = 13,3$  до 6 м/с в фурменной зоне и до 5,2 м/с на выходе из слоя. В зоне квазистационарного слоя скорость не меняется по высоте, но ее абсолютное значение зависит от значения критерия Глинкова: при  $Gn = 13,3$   $\bar{w}_z = 1,75$  м/с, а при  $Gn = 5$   $\bar{w}_z = 0,75$  м/с. При увеличении высоты слоя сужаются пределы изменения скорости в зоне квазистационарного барботажного слоя: от 1 м/с при  $Gn = 5$ , до 1,75 м/с при  $Gn = 13,3$ . В фурменной зоне скорость возрастает до 9,8 м/с при  $Gn = 13,3$ . Минимальное значение этой величины в фурменной зоне имеет место при  $Gn = 5$  и равняется 3,9 м/с. В подфурменной зоне возникает контур циркуляции. Он охватывает объем, глубиной два калибра выходного отверстия фурмы. Скорость  $\bar{w}_z$  в нем весьма высока и зависит от значения критерия Глинкова. Для  $Gn = 13,3$  она превышает 6 м/с. В выходном сечении слоя скорость практически не изменилась по сравнению с низким слоем.

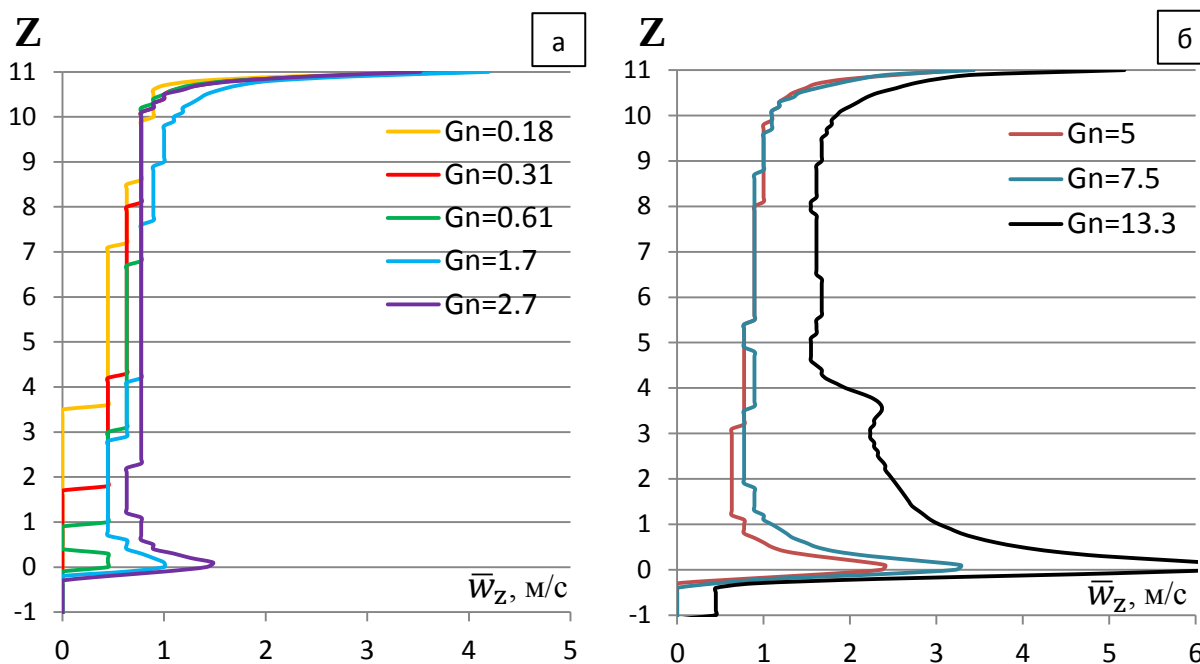


Рисунок 5 – Изменение скорости ванны по высоте слоя при пузырьковом (а) и струйном (б) режимах продувки при  $H=11$  от режима продувки,  $\bar{w}$ , м/с

### Перемешивание барботажного слоя

Процесс перемешивания изучали путем анализа изменений значения удельной мощности, затрачиваемой гравитационными силами в соответствующей точке ванны в вертикальном и продольном направлениях, кВт/т. Локальное значение удельной

мощности перемешивания в вертикальном направлении обозначили  $N_z$ , локальное значение удельной мощности перемешивания в продольном направлении обозначили через  $N_x$ . Интенсивность перемешивания в отдельных зонах ванны оценивали путем определения среднего значения удельной мощности перемешивания для этих зон: для вертикальных сечений  $\bar{N}_z$ , для горизонтальных сечений  $\bar{N}_x$ .

$$\bar{N}_z = \frac{\sum_0^n N_z}{n} \text{ при } x = \text{const}; \bar{N}_x = \frac{\sum_0^n N_x}{n} \text{ при } z = \text{const}$$

В автореферате в качестве примера представлены графически результаты расчетов перемешивания ванны при работе на самых низких режимах при пузырьковой и струйной продувках:  $Gn = 0,18$  и  $Gn = 3$  при  $H=11$  (рис. 6 и 7).

**Перемешивание ванны при пузырьковом режиме продувки** в вертикальном направлении крайне локализовано. Расчёты  $N_z$  проводились для шести сечений ванны вдоль оси  $OX$ . Только при  $X=1$  зафиксировано наличие перемешивания. При этом удельная мощность перемешивания возрастает по высоте и в переходной зоне ( $Z \geq 2$ ) достигает своего максимума. В начале зоны квазистационарного слоя ( $Z \geq 6$ ) удельная мощность перемешивания резко падает до нуля на поверхности слоя.

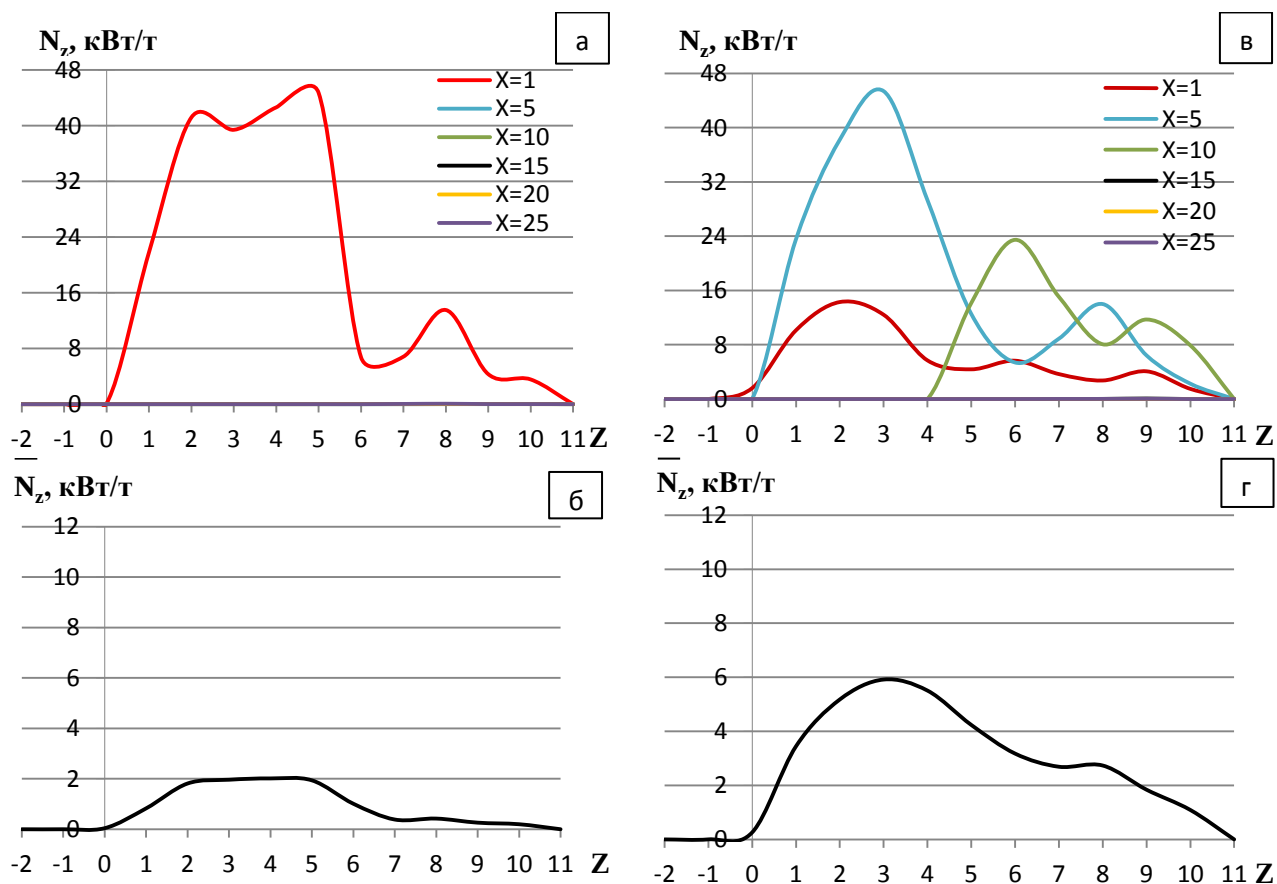


Рисунок 6 – Изменение актуальной и средней по плоскости  $XOZ$  удельной мощности перемешивания слоя в вертикальном направлении при  $Gn = 0,18$  (а, б) и  $Gn = 3$  (в, г),  $H=11$

Среднее для ванны значение этой величины отличается от нуля в фурменной и переходной зонах при  $1 \leq Z \leq 6$ . В остальной части слоя перемешивание вдоль оси  $OZ$  практически отсутствует. При этом среднее значение удельной мощности перемешивания в вертикальной плоскости за счет свободной конвекции больше мощности перемешивания за счет динамического взаимодействия газа с расплавом: на порядок согласно данным М.А. Глинкова и на два порядка согласно данным А.А. Варенцова. Таким образом, еще раз подтверждается решающая роль свободной конвекции в процессе перемешивания ванны.

Продольное перемешивание наиболее активно также в фурменной зоне и на поверхности ванны (рис. 7а). При  $Z=0$  и  $X < 1$  удельная мощность перемешивания в продольном направлении достигает максимума. Однако, эта величина падает до нуля при  $X=2$ . Заметное продольное перемешивание наблюдается также вблизи фурменной стенки в переходной зоне ( $Z \geq 1$ ). Однако уже при  $X=2$   $N_x=0$ . На поверхности слоя, при  $Z=11$ , наблюдается относительно равномерное перемешивание всего слоя в продольном направлении. Пиковое значение  $N_x$  имеет место в середине поверхности ванны.

Среднее значение удельной мощности перемешивания ванны в продольном направлении заметно только до координаты  $X=3$ .

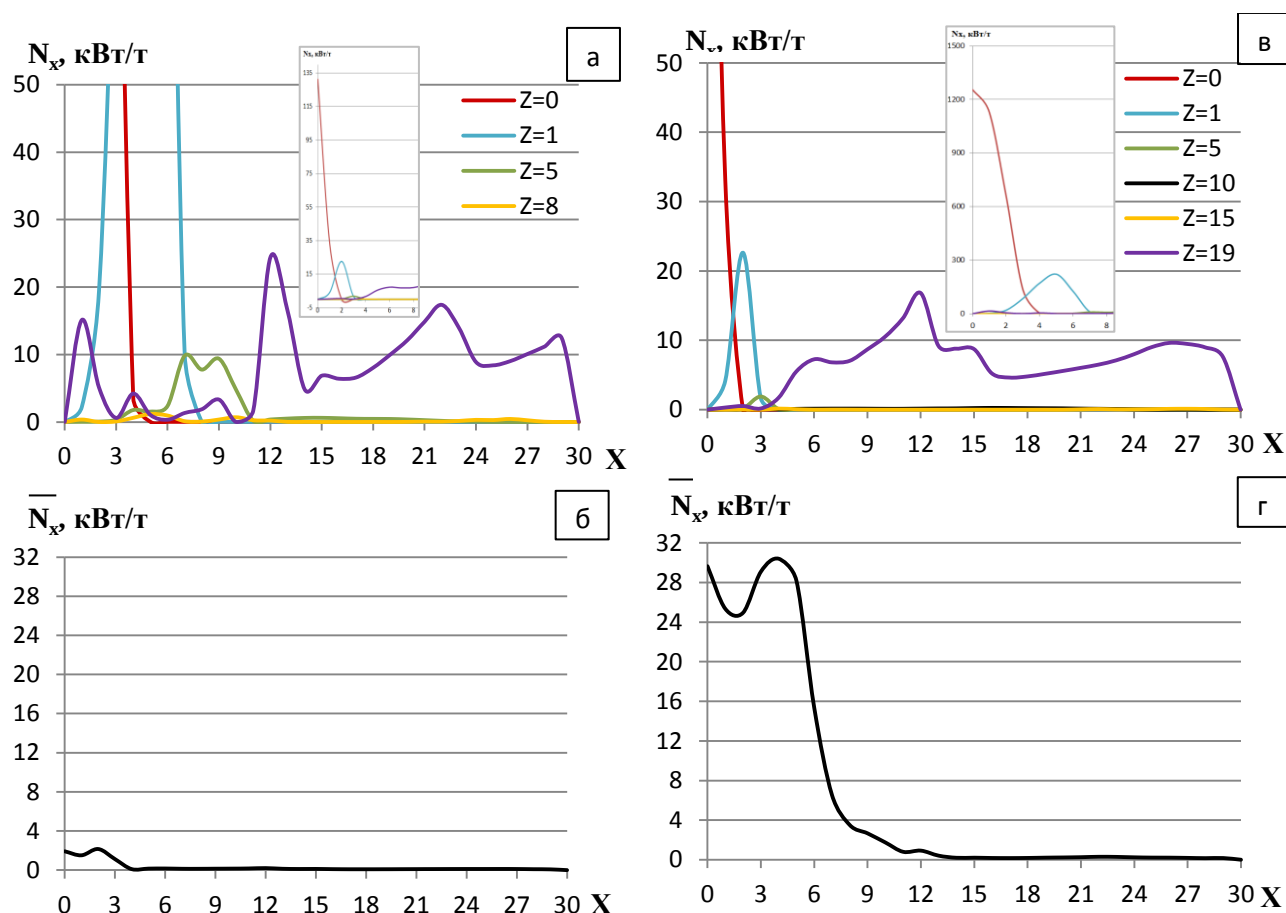


Рисунок 7 – Изменение актуальной и средней по плоскости  $XOZ$  удельной мощности перемешивания слоя в продольном направлении при  $Gn = 0,18$  (а, б) и  $Gn = 3$  (в, г),  $H=11$

Таким образом, при работе в пузырьковом режиме продувки активное перемешивание ванны как в вертикальном, так и в продольном направлениях происходит в фурменной и переходной зонах, т. е. в нижней части ванны, и на ее поверхности. Удельная мощность перемешивания анизотропна. Ее локальные значения зависят от значения критерия Глинкова и высоты слоя. Однако, средняя по объему ванны удельная мощность слабо изменяется при изменении указанных параметров, и большая часть объема ванны практически не участвует в процессе перемешивания.

**Перемешивание ванны при струйном режиме продувки** исследовалось при  $Gn = 3$  и  $Gn = 5$  для  $H=11$  и  $H=19$ . Расчеты выполняли в точках ванны с теми же координатами, что и для пузырькового режима. Результаты исследований представлены графически на рисунках 6(в, г) и 7(в, г).

Как и раньше наиболее активное перемешивание в вертикальном направлении происходит в фурменной и переходной зонах барботажного слоя. Абсолютное значение максимальной удельной мощности перемешивания практически не изменилось, но, если при пузырьковом режиме это было в сечении с продольной координатой  $X=1$ , то при струйном режиме – при  $X=5$ , т.е. значительно дальше от фурменной стенки.

В пристеночной зоне, при  $X \leq 1$  интенсивность перемешивания ванны в вертикальном направлении существенно снизилась. В то же время возросли осредненные значения этой величины. Втрое возросло абсолютное значение максимальной удельной мощности перемешивания и, что особенно важно, за пределами  $Z=6$  удельная мощность перемешивания не обращается в нуль практически до поверхности ванны. Это свидетельствует о том, что активное перемешивание в вертикальной плоскости происходит не только в фурменной и переходной зонах, но и в зоне квазистационарного слоя, чего не наблюдалось при пузырьковом режиме продувки.

Максимальная интенсивность продольного перемешивания ванны (рис. 7(в, г)) по-прежнему у фурменной стенки при  $Z=0$ . Продольное перемешивание наблюдается также на верхней границе фурменной зоны  $Z=1$  и на поверхности ванны. График изменения осредненного по вертикальным сечениям значения удельной мощности продольного перемешивания (рис. 7г) показывает, что зона активного перемешивания, располагающаяся у фурменной стенки, расширилась до 12 калибров выходного отверстия фурмы против 3 калибров при пузырьковом режиме, а максимальное значение этой величины возросло в 17 раз.

Увеличение высоты слоя до  $H=19$  (рис. 8а) при неизменном значении критерия Глинкова  $Gn = 3$  привело к двукратному сокращению максимального значения удельной мощности перемешивания в вертикальном направлении. Еще сильнее сократилась

интенсивность перемешивания непосредственно у фурменной стенки (при  $X \leq 1$ ). В глубину слоя от фурменной стенки сместилось сечение с максимальной интенсивностью перемешивания. Это сечение располагается на расстоянии 10 калибров выходного отверстия фурмы. Практически весь объем ванны участвует в перемешивании в вертикальной плоскости.

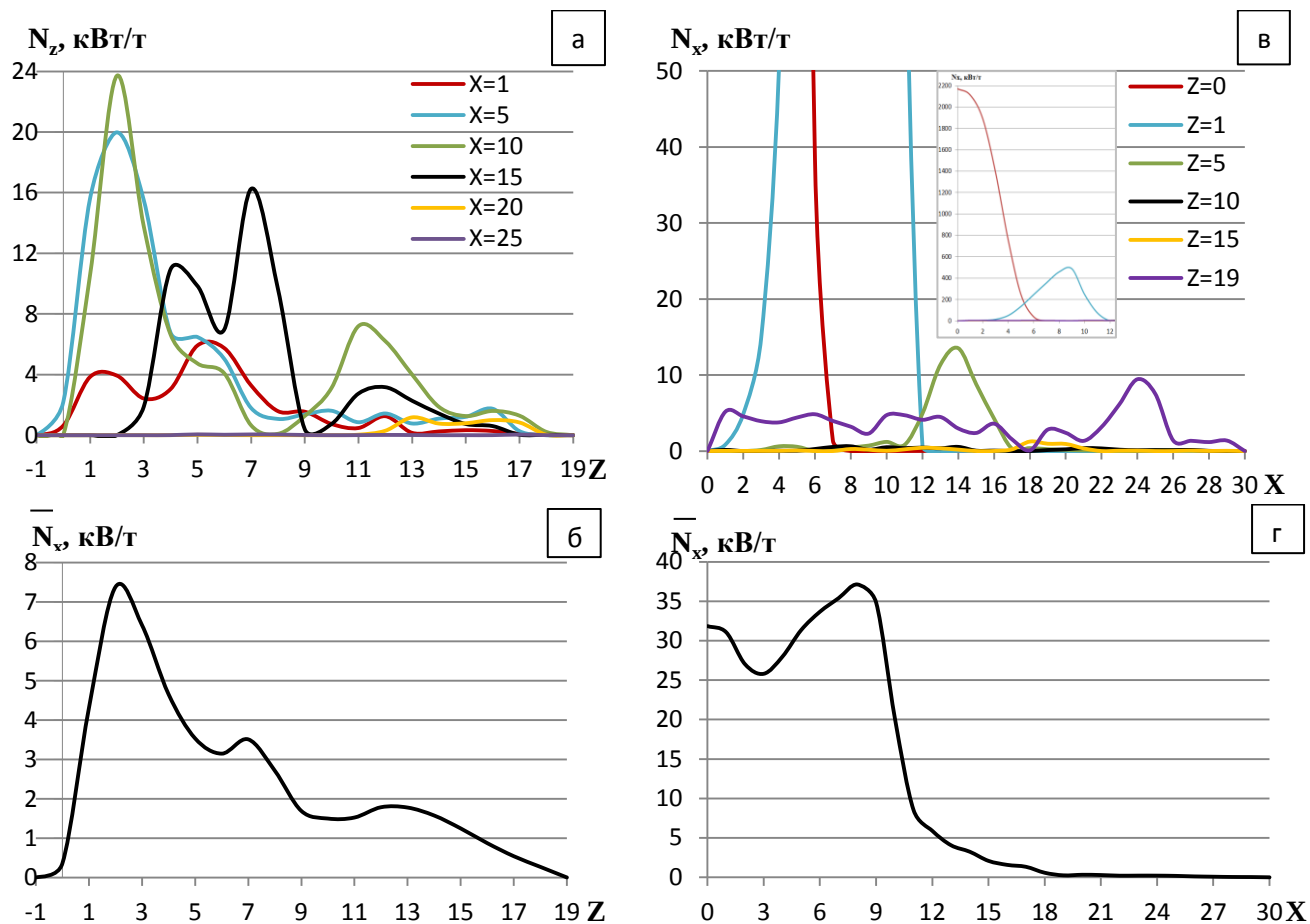


Рисунок 8 – Изменение актуальной и средней по плоскости  $XOZ$  удельной мощности перемешивания слоя в вертикальном (а, б) и продольном (в, г) направлениях при  $Gn = 3$ ,  $H = 19$

Увеличение высоты слоя привело к локализации по высоте зоны наиболее интенсивного перемешивания в вертикальной плоскости. В зоне квазистационарного слоя по всей ее ширине интенсивность перемешивания заметно снизилась.

На рисунке 8(в, г) представлены графики изменения удельной мощности перемешивания вдоль оси  $OX$  на разных уровнях барботажного слоя.

Из графиков видно, что, как и прежде, наиболее интенсивное продольное перемешивание имеет место в фурменной плоскости. Весьма активное перемешивание имеет место на верхней границе фурменной зоны при  $Z = 1$  и  $1 \leq X \leq 12$ . Достаточно заметно продольное перемешивание на всех уровнях квазистационарного барботажного слоя.

Вместе с тем резко снизилась интенсивность продольного перемешивания на поверхности слоя.

На рисунке 8г представлен график изменения осредненной по высоте удельной мощности продольного перемешивания ванны в зависимости от координаты  $X$ . Из графика видно, что ширина зоны активного перемешивания в указанном направлении заметно расширилась и занимает пространство  $0 \leq X \leq 12$  против  $0 \leq X \leq 7$  при  $H=11$ .

Таким образом, переход к струйному режиму продувки позволяет вовлечь в активное перемешивание большую часть ванны. При этом абсолютные значения локальных удельных мощностей перемешивания уменьшаются. Параметры перемешивания сильнее реагируют на изменения режима продувки (значения  $Gn$ ) и высоты слоя ( $H$ ). У фурменной стенки образуется зона с пониженной интенсивностью перемешивания.

## **ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

### **Обоснование выбора основного механизма перемешивания ванны печи с барботажным слоем при боковой продувке**

Процесс перемешивания ванны в печах с барботажным слоем в существующих публикациях рассматривается с одной из двух точек зрения: термодинамической или гидродинамической. При этом в качестве движущего механизма во всех случаях принимается процесс динамического взаимодействия газового пузыря или газожидкостного потока с гомогенной жидкой средой. В данной работе также использован гидродинамический подход, однако движение ванны рассматривается не как результат динамического воздействия газовых пузырей или газожидкостного потока на расплав, а как результат действия силы земного тяготения на среду с переменной по объему плотностью. При этом переменная плотность в ванне обусловлена не неравномерным нагревом объема, как в обычных задачах свободной конвекции, а неравномерным распределением газа в этом объеме.

Сравнение расчетных значений средней скорости циркуляции ванны, полученных для одного и того же режима продувки с помощью различных моделей перемешивания, с прогнозным значением этой величины, определенным В.Г. Здановской для печи А.В. Ванюкова медеплавильного завода НГМК представленных в таблице 1, свидетельствуют о том, что главенствующим механизмом перемешивания является гравитационный механизм.

Таблица 1 – Расчетные значения средней скорости перемешивания ванны при ее продувке в режиме  $Gn=3$

| Модель пневматического перемешивания                           |                                                                                     |                                                                         |                                                                 |                                                                                  | Эксп. данные<br>В.Г.Здановской                                                            |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| М.А.<br>Глишков<br>Термодина<br>мика<br>обратимых<br>процессов | А.А.<br>Варенцов,<br>Е.А. Капустин<br>Термодинами<br>ка<br>необратимых<br>процессов | Szekely<br>Y., El<br>Kaddah<br>N.E.<br>Теория<br>турбулент<br>ной струи | Е.К.<br>Абрамови<br>ч и др.<br>Теория<br>турбулент<br>ных струй | Г.С.<br>Сборщиков,<br>Н.Ф.<br>Вельтищев,<br>А.М.<br>Володин, С.А.<br>Крупенников | На основании<br>расчета<br>масообмена в<br>действующих<br>печах с<br>барботажным<br>слоем |
| 0,5                                                            | 0,25                                                                                | 0,12                                                                    | 0,5                                                             | 0,73                                                                             | 0,8                                                                                       |

Из данных таблицы видно, что указанный механизм без помощи других механизмов пневматического перемешивания (всплывающих пузырей, газожидкостных потоков) обеспечивает наблюдаемую на практике производительность действующих печей. Определив, как основной, гравитационный механизм перемешивания, дальнейшие исследования направили на выявление способов воздействия на него, приводящих к повышению качества и интенсивности перемешивания.

#### **Отличие созданной математической модели от существующих моделей гидродинамики барботажного слоя**

В существующих моделях описывается процесс взаимодействия одиночного всплывающего пузыря с окружающей жидкостью. Полученный результат умножается на число пузырей, определяемое различными способами. Либо взаимодействие газожидкостного потока с окружающей его гомогенной жидкостью. Поток расширяется вдоль продольной оси по законам свободной затопленной гомогенной струи. Исходя из этого, в сечениях вдоль потока изменяется содержание жидкой фазы и, как следствие, плотность потока. Двухфазный поток взаимодействует с окружающей его жидкостью вдоль всей свободной поверхности и передает ей импульс. За счет этого жидкость приходит в движение. Обе указанные модели предполагают, что основным источником движения ванны является механическая энергия, переданная жидкости при ее взаимодействии с пузырями или газожидкостным потоком. В настоящей работе представлена математическая модель, в которой источником движения слоя является сила притяжения земли. Такое движение называется свободной конвекцией. Оно возникает, если в среде имеется изменяющееся в пространстве поле плотности. В условиях действия силы притяжения в таком пространстве возникает переменное поле силы тяжести, которое вызывает движение среды. Это движение происходит в направлении, противоположном направлению градиента силы тяжести. Широко известны работы по свободной конвекции

в гомогенных средах. В таком случае переменное поле плотности возникает, например, в связи с неравномерным прогревом среды. В нашей модели переменное поле плотности возникает в связи с неравномерным распределением газа в объеме слоя.

Этот факт описывается в системе главных уравнений и в условиях однозначности. В связи с внесенными изменениями в уравнении закона сохранения импульса (уравнение Навье-Стокса) переменной величиной становится массовая плотность силы тяжести. Изменен также способ определения кинематического коэффициента вязкости  $\nu_{эф}$  барботажного слоя, что учитывает тот факт, что в движущейся среде с дисперсными частицами (в нашем случае пузыри в потоке расплава или капли расплава в потоке газа) наличие дисперсной фазы оказывает доминирующее влияние на параметры турбулентных пульсаций и подавляет их.

Перечисленные добавления, внесенные в классическую модель движения гомогенной жидкости, сделали ее чувствительной к изменению физических свойств псевдогомогенной ванны: ее плотности и вязкости, которые изменяются в объеме барботажного слоя при неизменной температуре и постоянном химическом составе расплава только из-за изменения локальных значений концентрации газа. Созданная модель позволила решить поставленные задачи исследования.

### **Особенности гравитационного перемешивания ванны с барботажным слоем при боковой продувке**

В процессе исследований выполнили 24 серии численных экспериментов: 4 серии в области пузырькового режима истечения ( $Gn < 1$ ), 4 серии в области переходного режима истечения ( $1 \leq Gn \leq 3$ ) и 4 серии при струйном режиме истечения ( $3 \leq Gn \leq 13,3$ ). Каждое исследование проводилось при  $H_0 = 11$  и  $H_0 = 19$ .

В каждом из указанных режимов газ по-разному вытекает из фурмы в расплав. При пузырьковом режиме на носике фурмы формируется пузырь, который достигнув отрывного размера, отрывается под действием силы Архимеда и всплывает вдоль фурменной стенки к поверхности слоя. При истечении в переходном режиме у носика фурмы образуется газовая полость, которая некоторое время удерживается у носика и при этом увеличивается в размерах. Достигнув определенных размеров, полость отрывается и также всплывает вдоль фурменной стенки со скоростью, меньшей, чем сферический пузырь. При струйном режиме истечения у носика фурмы образуется не исчезающая газовая полость, от поверхности которой отрываются газовые пузыри. Кроме того, от ее головной части периодически отрываются газожидкостные агрегаты, образующие газожидкостные потоки, движущиеся к поверхности слоя по криволинейным траекториям.

Установлено, что во всех режимах зона наиболее энергичного перемешивания расположена в фурменной плоскости. По высоте активное перемешивание ванны имеет место в интервале шести калибров диаметра выходного отверстия фурмы, т. е. в пределах фурменной и переходной зон. В зоне квазистационарного слоя свободная конвекция, связанная с неравномерностью распределения газа в объеме слоя, развита слабо, что объясняется относительно равномерным распределением газа по объему ванны в этой зоне.

При пузырьковом и переходном режимах продувки в зоне квазистационарного слоя движение ванны в вертикальном направлении наблюдается только вблизи фурменной стенки. Это связано с тем, что при указанных режимах только в этой зоне имеет место значительный градиент плотности ванны по высоте. Ширина пристеночной области, в которой наблюдается восходящее движение ванны зависит от относительной высоты слоя и не превышает четырех калибров выходного отверстия фурмы. При этом скорость восходящего потока высока. Ее максимальное значение достигается в конце переходной зоны и в исследованных пределах значений критерия Глинкова равнялась 16 м/с. С увеличением высоты слоя максимальное значение скорости восходящего потока уменьшается, что связано с возрастанием отрывного диаметра пузыря и его деформации, что уменьшает скорость всплытия и увеличивает ширину восходящего потока.

Помимо фурменной плоскости высокие скорости циркуляции ванны при любом режиме продувки имеют место на поверхности барботажного слоя. Толщина зоны интенсивной циркуляции не превышает половины диаметра выходного отверстия фурмы. Причина интенсивной циркуляции ванны на поверхности объясняется следующим образом. При выходе газа на поверхность ванны происходит разрыв пузырей. Часть высвободившейся энергии передается образовавшимся каплям расплава, сообщая им вертикальную скорость, а остальная энергия разрыва пузыря переходит в окружающую жидкость, заставляя ее двигаться в продольном и поперечном направлениях на поверхности слоя. Помимо этого, работает и чисто гравитационный механизм, связанный с неравномерностью распределения по поверхности ванны газа, покидающего барботажный слой. Суммарная скорость ванны на поверхности слоя складывается из продольной и поперечной проекций и составляет значительную величину. Эксперименты показали, что свободная конвекция в поперечном направлении в фурменной и переходной зонах незначительна.

Анализ гидродинамики доструйных режимов продувки показал, что в процессе циркуляции участвует в лучшем случае треть объема барботажного слоя. При этом в зоне циркуляции, расположенной у стен печи, развиваются высокие скорости восходящих

потоков, что влечет за собой недопустимо большие механические, тепловые и химические нагрузки на них, а также является причиной интенсивного брызгоуноса из слоя. В целом при доструйных режимах продувки управлять гидродинамикой ванны невозможно.

При переходе к струйному режиму продувки изменяется механизм истечения газа в расплав. Вслед за этим меняется кинематика ванны. Наличие в фурменной зоне перед выходным сечением сопла неисчезающей газовой полости конечных размеров способствует тому, что основная часть вдуваемого газа проникает в глубину слоя. Это приводит к более равномерному распределению газа по объему. Уменьшается газовая нагрузка в пристеночной зоне, а вслед за этим снижается скорость восходящих потоков у стен агрегата. С другой стороны, возникает градиент плотности в вертикальной плоскости в той части фурменной зоны, в которую проникает газовый поток. Соответственно возникает восходящее движение в объеме, расположенном над указанной частью фурменной зоны. В пределе в восходящем движении участвует весь объем ванны. Это создает предпосылки для реализации в ней режима идеального смешения. По мере увеличения критерия Глинкова возрастает интенсивность перемешивания ванны с одновременным снижением максимального значения вертикальной проекции скорости ванны и падением до нуля скорости потока в пристеночной зоне слоя.

В качестве интегральной характеристики гидродинамики слоя определили среднюю по объему скорость ванны  $\bar{w}$ , как среднеарифметическое значение локальных скоростей:

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{u_i^2 + v_i^2 + w_i^2}}{n}.$$

На рисунке 9 представлен график ее зависимости от режима продувки для двух значений высоты ванны и разных плотностей жидкой фазы. Из графика следует, что при работе в пузырьковом и переходном режимах средняя по ванне скорость сложным образом зависит от значения критерия Глинкова и высоты слоя.

При переходе к струйному режиму продувки эта зависимость становится практически линейной. При этом необходимо отметить, что с увеличением плотности жидкой фазы скорость циркуляции ванны при струйном режиме продувки соответствующим образом возрастает при постоянном значении высоты слоя и критерия Глинкова.

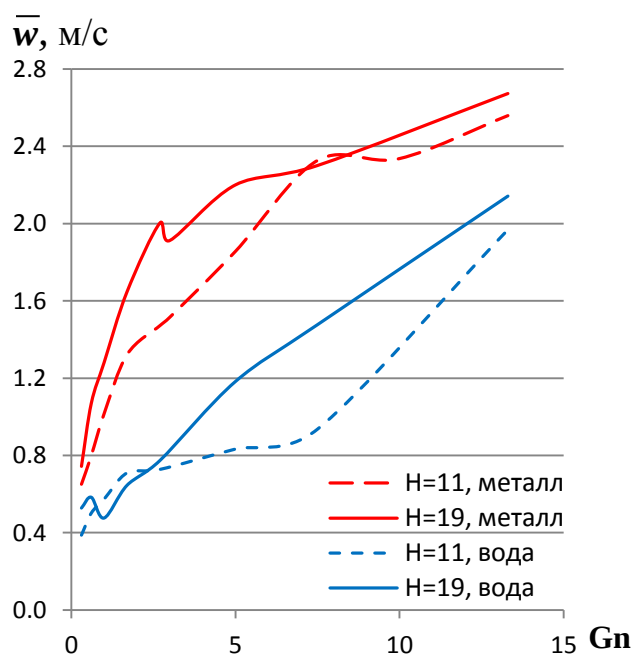


Рисунок 9 – Изменение средней скорости ванны от режима продувки, высоты слоя и плотности жидкой фазы,  $\bar{w}$ , м/с

Изучение особенностей перемешивания ванны на основании анализа распределения удельной мощности перемешивания по объему барботажного слоя показывает, что при доструйных режимах продувки интенсивное перемешивание сосредоточено в пристеночной зоне и при малых значениях критерия Глинкова растянуто по высоте слоя. С переходом на струйный режим продувки по мере увеличения числа Глинкова удельная мощность перемешивания в вертикальной плоскости уменьшается, но зона активного перемешивания увеличивается вплоть до всей ширины печи. За счет этого возрастает интегральный эффект перемешивания ванны в вертикальной плоскости.

Внешне указанный эффект выражается в том, что на поверхности ванны при увеличении критерия Глинкова бурное кипение с мощными выбросами сменяется на спокойное кипение, равномерное по всей поверхности. Указанная особенность объясняется тем, что по мере увеличения значения критерия Глинкова увеличивается размер газовой полости (зоны продувки) в фурменной зоне. Это приводит к более равномерному распределению потоков газа по объему слоя и, следовательно, к уменьшению локальных значений градиента плотности. Однако, при этом в восходящее движение оказывается вовлеченной все большая часть объема слоя. По той же причине уменьшается по высоте зона активного перемешивания и увеличивается интенсивность перемешивания в продольном направлении, особенно в фурменной плоскости.

На рисунке 10 представлены графически результаты численного исследования зависимости осреднённой по объему ванны удельной мощности перемешивания. Из графиков видно, что суммарная мощность свободноконвективного перемешивания

возрастает с ростом плотности ванны и ее высоты, а также при переходе от пузырькового к струйному режиму продувки. В металлургии практически реализуемым режимом продувки является продувка со значением критерия Глинкова не более пяти. При этом удельная мощность перемешивания может возрасти от 5 до 7 раз по сравнению с реализуемой в настоящее время при продувке в режиме  $Gn \leq 1$ .

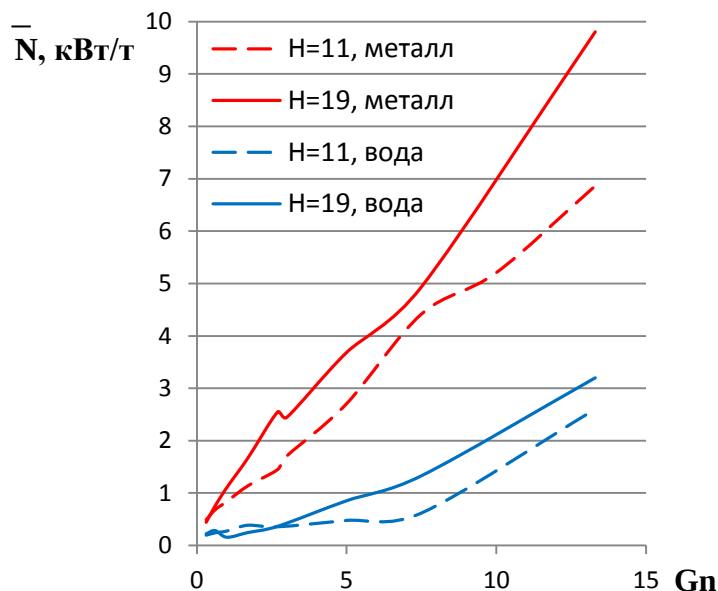


Рисунок 10 – Зависимость удельной мощности перемешивания ванны  $\bar{N}$ , кВт/т, от режима продувки, высоты слоя и плотности жидкой фазы

Резюмируя изложенное выше, можно представить механизм гравитационного перемешивания ванны печи с барботажным слоем следующим образом: при пузырьковом режиме истечения газ располагается вдоль фурменной стенки и не проникает в глубь слоя. В связи с этим градиент плотности в фурменной зоне локализован и наблюдается непосредственно в зоне нахождения газа. Поэтому переменные силы гравитации действуют также в указанной области. При струйном режиме продувки около выходного отверстия фурмы образуется газовая полость конечных размеров. Соответственно пропорционально увеличивается область действия высокого градиента силы тяжести и соответственно величина гравитационных сил. Этим и объясняется анизотропия процессов свободной конвекции.

При пузырьковом режиме продувки перемешивание ванны в основном происходит в пристеночной зоне толщиной  $2 \div 3$  калибра. При этом заметная интенсивность перемешивания распространяется на высоту до 5 калибров, остальная часть объема слоя практически не перемешивается. Максимальная удельная мощность перемешивания у фурменной стенки составляет 46 кВт/т. Такое же значение имеет максимальная удельная

мощность перемешивания в вертикальном направлении при струйном режиме продувки, но при этом в процессе перемешивания участвует практически весь объем ванны.

Интенсивность перемешивания в продольном направлении при струйном режиме продувки существенно выше интенсивности перемешивания в вертикальном направлении. В продольном направлении при том же режиме продувки удельная мощность перемешивания у фурменной стенки составляет 250 кВт/т. Эта величина обращается в нуль на расстоянии двух калибров.

При струйном режиме продувки указанное соотношение существенно изменяется. Удельная мощность перемешивания в вертикальной плоскости составляет 47 кВт/т, а удельное перемешивание в продольном направлении 2,1 МВт/т.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Впервые показана решающая роль гравитации в формировании гидродинамики ванны печей Ванюкова и Ромелт.

2. Установлено, что при существующих режимах продувки невозможно регулировать гидродинамический режим ванны печей Ванюкова и Ромелт.

3. Показано, что при струйном режиме продувки в циркуляционное движение вовлекается весь объем ванны расплава, находящийся в пределах барботажного слоя, тогда как при действующих доструйных - не более его трети.

4. Установлено, что основной механизм гравитационного перемешивания расположен в фурменной зоне барботажного слоя.

5. Для повышения интенсивности перемешивания ванны на действующих печах рекомендуется перейти на режим продувки со значением критерия Глинкова  $Gn = \frac{\rho_r w_r^2}{\rho_{жg} h_0} > 3$  при относительной высоте слоя расплава  $\frac{h_0}{d_0} \leq 20$ . Истечение газа из сопла в слой расплава должно происходить с дозвуковой скоростью  $w_r \leq 0,85a$ , где  $a$  – скорость звука в газе при параметрах истечения.

6. Результаты работы переданы для внедрения, соответствующий акт представлен в приложении к диссертации.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Сборщиков Г.С., Володин А.М. К вопросу о движении ванны в печах с барботажным слоем // «Известия ВУЗов. Черная металлургия», № 7, 2009 г., С. 55-57.
2. Сборщиков Г.С., Вельтищев Н.Ф., Володин А.М., Крупенников С.А. Модель свободной конвекции в ванне аппарата с барботажным слоем при подачи газов через фурмы, расположенные сбоку // «Известия ВУЗов. Черная металлургия», 2013 г., № 11, С. 25-27.
3. Сборщиков Г.С., Володин А.М., Валавин В.С. Свободная конвекция в ванне печи с барботажным слоем при ее продувке через боковую фурму, установленную под уровнем расплава // «Известия ВУЗов. Цветная металлургия». – 2015 г., № 2, С. 58-68.

### **Публикации в других изданиях**

4. Г.С. Сборщиков, А.М. Володин К вопросу о движении ванны в печах с барботажным слоем. Труды научно-практической конференции «Творческое наследие Б.И. Китаева », – Екатеринбург, 2009 г., с. 299-304.
5. Володин А.М. Исследование пневматического перемешивания расплава газами. 64-е Дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции.– М.: МИСиС, 2009 г.
6. Володин А.М. Программа расчета и конструкторской разработки элементов плавильных печей с барботажным слоем при боковом расположении дутьевых фурм. Труды VI Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» – Москва, 15-20 октября, 2012 г.
7. Сборщиков Г.С., Вельтищев Н.Ф., Володин А.М., Крупенников С.А. Новый подход к описанию механизма перемешивания ванны в аппаратах с барботажным слоем, Труды 4 международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности». – М.: 2012, с. 434-439.
8. Сборщиков Г.С., Володин А.М. Свободная конвекция в ванне печи с барботажным слоем при ее продувке через боковую фурму, установленную под уровнем слоя. Труды VII Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» – Москва, 15-17 октября, 2014 г.
9. Сборщиков Г.С., Володин А.М., Терехова А.Ю. Улучшение технико-экономических показателей печей с барботажным слоем за счет оптимизации их гидродинамического режима. Труды VIII Международной научно-практической

конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» – Москва, 10-12 октября, 2016 г.

10. Перемешивание ванны печи с барботажным слоем в результате свободной конвекции / Сборщиков Г.С., Крупенников С.А., Володин А.М., Терехова А.Ю.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» – № 2016663532 от 12.12.2016; зарегест. 20.10.16, заявка № 201666996. – 1 с.

11. Сборщиков Г.С., Володин А.М. Гидродинамика ванны печи с барботажным слоем при пузырьковом режиме продувки ванны через боковую фурму Труды IX Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» – Москва, 12-14 декабря, 2018 г.