

УДК 669.182

А. Н. СМІРНОВ (д-р техн. наук, проф.), **И. Н. САЛМАШ,**
Е. В. ОШОВСКАЯ (канд. техн. наук, доц.)
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СТАЛИ В КОВШЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведена последовательность этапов, выполняемых при компьютерном моделировании процессов перемешивания стали в ковше при продувке инертным газом с использованием прикладного пакета ANSYS. Представлены результаты решения задачи моделирования в двумерной постановке для ковшей разной вместимости. Дана классификация режимов перемешивания стали при продувке через одно и два продувочных устройства.

сталеразливочный ковш, сталь, перемешивание, продувка, аргон, математическое моделирование

Общий анализ публикаций, посвященных изучению гидродинамических явлений, происходящих в сталеразливочном ковше, показывает, что разработанные математические модели базируются на уравнениях Навье–Стокса, включающих уравнение неразрывности (закон сохранения массы); уравнение импульса (закон сохранения импульса); уравнение энергии (закон сохранения энергии) [1–5]. Эти законы, представленные в виде дифференциальных уравнений в частных производных, решаются методом конечных элементов с применением стандартных пакетов для компьютерного моделирования движения жидкости (PHOENICS, FLOW, CFX, Fluent, ANSYS) или с помощью самостоятельно разрабатываемых программ, реализующих этот метод. Особо следует обратить внимание на то, исследователями применяются различные подходы для учета турбулентности движения расплава. Чаще всего применяется стандартная $k-\epsilon$ модель [6].

Цель настоящей работы заключалась в идентификации основных характерных зон гидродинамического перемешивания жидкости в ковше в зависимости от условий продувки и геометрических параметров ковшей на основе математического моделирования.

Процесс моделирования перемешивания стали при продувке инертным газом в сталеразливочном ковше выполнялся в следующей последовательности.

1. Создание геометрической модели расчетной области.

В качестве расчетной области при создании геометрической модели принят внутренний объем ковша, занимаемый жидкой сталью.

2. Задание типа конечного элемента.

В модуле Flotran предусмотрено два типа конечных элементов: двумерные 4-хузловые – 2D FLOTRAN 141 и трехмерные 8-миузловые – 3D FLOTRAN 142, соответственно применяемые в двумерной и трехмерной постановках задачи.

3. Генерация конечно-элементной сетки.

Для каждой линии, образующей расчетную область, в ручном режиме задавалось количество делений, соответствующих числу элементов. В результате формировалась конечно-элементная модель расчетной области.

4. Выбор типа решаемой задачи.

Проведенные исследования выполнялись в постановке термической, нестационарной задачи для несжимаемой жидкости с турбулентным течением. Интервал времени, для которого осуществлялся поиск решения, составлял 600 с.

5. Задание свойств жидкой стали.

В рассмотренной постановке задачи учитывались такие свойства стали: плотность вязкость, теплопроводность и теплоемкость. Применительно к жидкой стали, находящейся в ковше, были подобраны такие выражения:

– плотность, кг/м^3

$$\rho = 7700 - 95.7 \cdot 10^{-3} (T - 293) - 15.471 \cdot 10^{-6} (T - 293)^2, \quad (1)$$

– вязкость, $\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$

$$\mu = 0.0035 \exp \left[10699.32 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{1473} \right) + 3.8 \cdot 10^{-11} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{1473} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где T – температура, К.

– теплоемкость $c = 840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;

– теплопроводность $\lambda = 27 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

6. Задание нагрузок и граничных условий.

В качестве нагрузок и граничных условий для задач гидродинамики могут выступать: скорости (м/с), температуры (К), тепловые потоки (Вт/м^2), источники энергии (Вт/м^3), коэффициенты конвективной теплоотдачи (передачи) (Вт/м^2), давление (Па).

В рассмотренной постановке задачи исследования использовались следующие нагрузки и граничные условия, задаваемые для расчетной об-

ласти жидкой стали: 1) составляющие скорости на линиях, соответствующих слоям, прилегающим к стенкам ковша, равны нулю; 2) вертикальная составляющая скорости на линии, соответствующей продувочному отверстию равнялась значению, рассчитанному через расход газа и диаметр отверстия, остальные составляющие равнялись нулю; 3) на линиях, соответствующих слоям, прилегающим к стенкам и дну ковша, задавалось значение теплового потока; 4) на верхней границе области, контактирующей со шлаком, задавалась постоянная температура; 5) кроме того, во всех узловых точках задавалась начальная температура расплавленной стали.

7. Выполнение расчета.

Для каждого из рассчитываемых параметров (составляющие скорости, давление, температура и др.) задавались методы решения системы уравнений и погрешность для поиска их сходимости. Далее автоматически выполнялось решение систем уравнений для каждого временного шага.

8. Просмотр результатов расчета.

Результатами расчета являлись значения векторов скорости и суммарной скорости, температуры жидкой стали в каждой узловой точке расчетной области для каждого временного шага, которые можно было представить в табличной и графической форме (в виде векторных или контурных).

Описанная последовательность этапов была реализована при математическом моделировании для 6 типов сталеразливочных ковшей (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры ковшей

№	Вместимость ковша, т	Диаметр, м		Высота металла H, м	H / D _н
		нижний D _н	верхний D _н		
1	60	2,270	2,270	2,120	0,93
2	75	2,250	2,560	2,365	1,05
3	130	2,550	2,990	2,94	1,15
4	135	2,420	2,980	2,96	1,22
5	160	2,852	3,080	3,20	1,12
6	300	2,520	3,680	4,44	1,76

Для каждого типа ковша создавалось несколько геометрических и конечно-элементных моделей, учитывающих различное количество (один и два) продувочных устройств и положение продувочного отверстия, которое характеризовалось расстоянием r от вертикальной оси ковша до центра отверстия. Диапазон расположения продувочного отверстия принят $r/R_n = 0.3 \dots 0.95$, где R_n – внутренний радиус дна ковша. В моделях с двумя продувочными отверстиями принималось их симметричное расположение

относительно вертикальной оси ковша. Задача решалась в двумерной постановке.

Установлено, что для любого типоразмера ковша процесс перемешивания жидкой стали проходит в несколько стадий: начальная, промежуточная и установившаяся (рис. 1). На начальной стадии (рис. 1 а, г), соответствующей началу продувки, наблюдается формирование потока, движущегося от продувочного отверстия вверх к свободной поверхности расплава. Максимальные скорости потока отмечаются в зоне продувочных отверстий, основная часть расплава только начинает приходить в движение. Далее по ходу продувки восходящий поток развивается, увлекая в движение все большие слои жидкой стали во всем объеме ковша и формируя циркуляционные зоны. Максимальные скорости движения характерны для восходящего потока расплава. Такое состояние можно рассматривать, как промежуточную стадию процесса (рис. 1 б, д). Приблизительно через 250-300 с после начала продувки в ковше наблюдается стабилизация картин перемешивания расплава, что можно считать установившейся стадией процесса (рис. 1 в, е). Здесь отмечаются установившиеся траектории движения расплава и стабильные циркуляционные зоны.

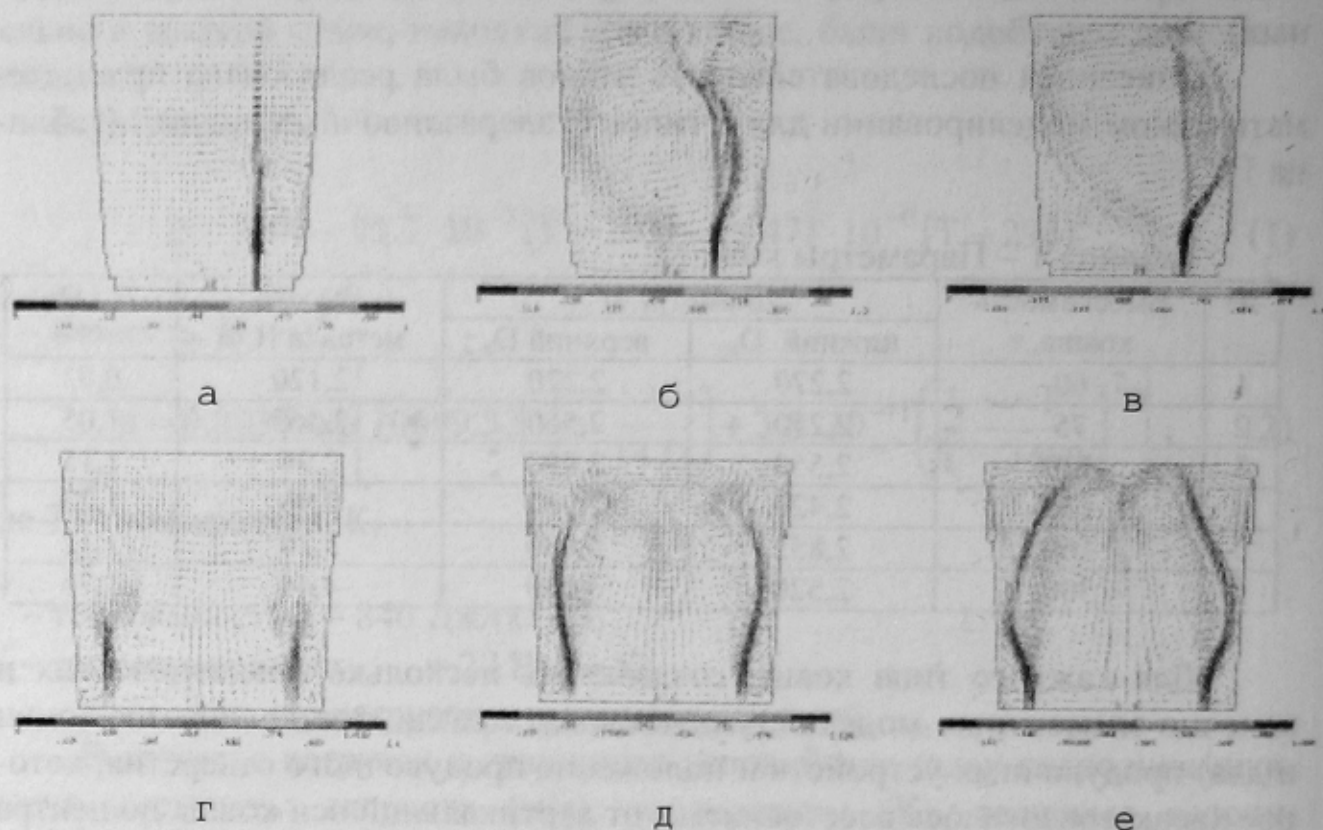


Рисунок 1 - Развитие потоков при перемешивании жидкой стали в процессе продувки инертным газом через: а, б, в – одно продувочное отверстие; г, д, е – два продувочных отверстия

На рис.2 показаны расчетные поля скоростей в ковше 130 т через при центральном расположении продувочного отверстия. Как видно из рисунка, в объеме расплава образуется две симметричные зоны циркуляции. Основной поток поднимается вверх к границе сталь-шлак и расходится к стенкам ковша, опускаясь вниз. При этом в зоне футеровки шлакового пояса потоки ударяются в стенку и направляются вниз к продувочному отверстию. В зоне дна потоки снова расходятся к стенкам ковша и поднимаются вверх, образуя еще две малые зоны циркуляций. Такая картина характерна для ковшей любой вместимости. И, несмотря на то, что в реальных промышленных ковшах такое расположение продувочного отверстия, как правило, не используется, полученные результаты хорошо согласуются с результатами физического моделирования, что можно считать подтверждением адекватности и достоверности математического моделирования изучаемым физическим процессам.

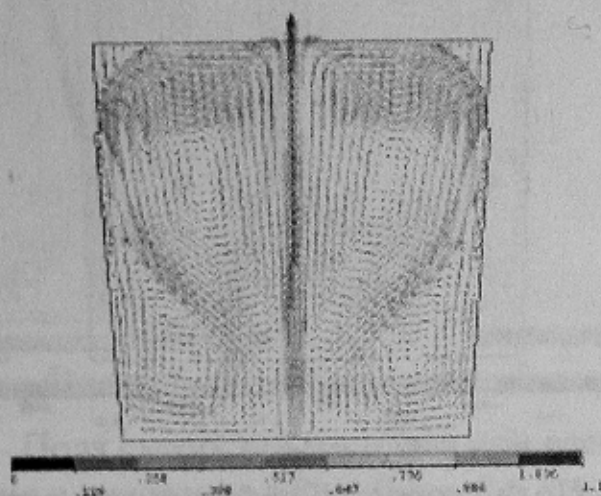


Рисунок 2 - Поля скоростей в ковше 130 т при центральном расположении продувочного отверстия

На рис.3 для ковшей разной вместимости приведены поля скоростей расплава при расположении продувочного устройства в диапазоне $r/R_n = 0,3 \dots 0,4$. В этом случае восходящий поток поднимается вверх и, отклоняясь к стенкам ковша, образует в объеме расплава две основные (занимающие большую часть объема ковша и более высокоскоростные) зоны циркуляции, но эти зоны имеют разные размеры, что связано со смещением продувочного отверстия. В нижней, придонной, части ковша слева и справа от восходящего потока формируются малоскоростные зоны. Можно сказать, что для этого случая характер циркуляционных зон имеет анало-

гии с картиной, полученной при центральном расположении продувочного отверстия. Отличия заключаются, в форме и размерах образующихся зон.

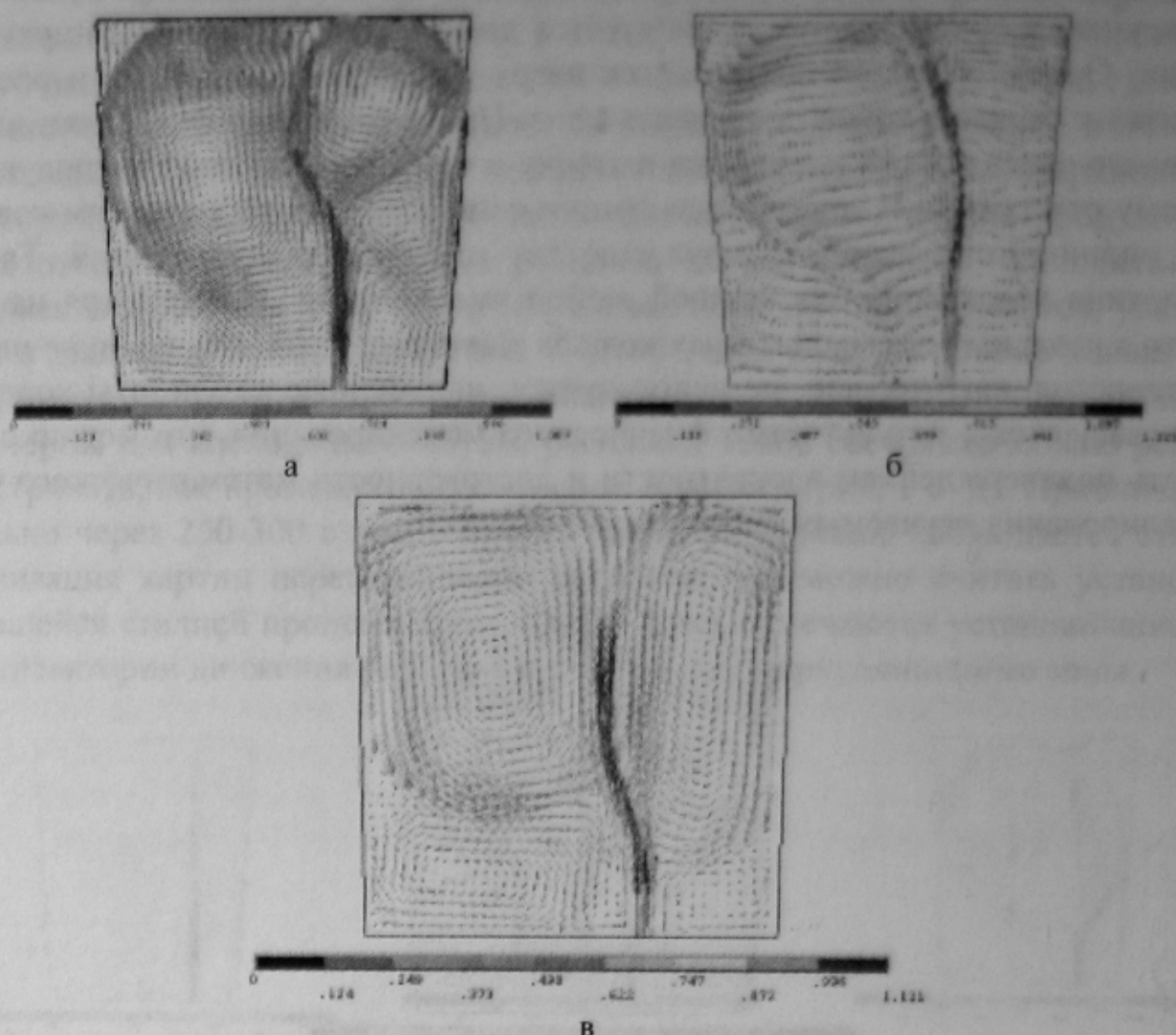


Рисунок 3 - Поля скоростей расплава при расположении продувочного устройства в диапазоне $r/R_n = 0,3 \dots 0,4$ для ковшей вместимостью: а) 130 т; б) 135 т; в) 160 т

На рис.4 приведены поля скоростей расплава через при расположении продувочного отверстия в диапазоне $r/R_n = 0,4 \dots 0,6$. При таком расположении продувочного отверстия восходящий поток, разделяясь на две части и отклоняясь к стенкам ковша, формирует три зоны циркуляции – основную, которая занимает около $\frac{3}{4}$ объема ковша и располагается по всей высоте расплава; среднескоростную, занимающую приблизительно половину оставшегося объема ковша и располагающуюся в верхней части ковша в области шлакового пояса футеровки; и малоскоростную, расположенную возле днища ковша. Для ковша 300 т отмеченные зоны выделяются менее четко и характеризуются меньшими скоростями, области расплава, расположенные в верхней части ковша слабо ох-

вачены циркуляціями. Это можно объяснить более высоким соотношением H/D_n в данном ковше.

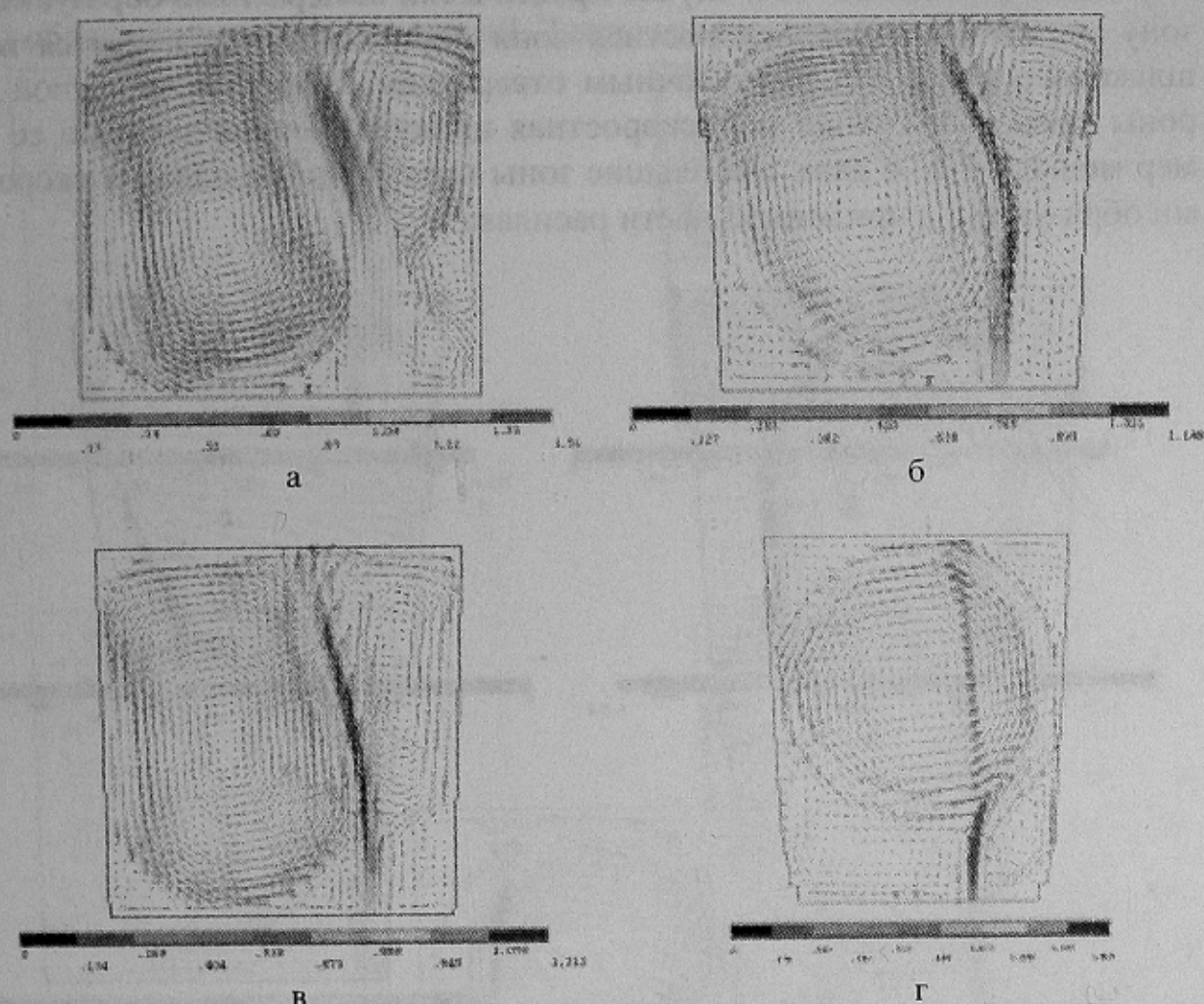


Рисунок 4 - Поля скоростей расплава при расположении продувочного отверстия в диапазоне $r/R_n = 0,4 \dots 0,6$ для ковшей вместимостью: а) 60 т; б) 75 т; в) 160 т; г) 300 т

На рис.5 для разных ковшей показаны поля скоростей расплава при расположении продувочного устройства в диапазоне $r/R_n = 0,6 \dots 0,8$. Для представленного диапазона расположения продувочного отверстия в картинах полей скоростей можно отметить следующее. Практически весь объем расплава вовлекается в циркуляцию (особенно это заметно для ковша 135 т). В пристеночных областях шлакового пояса футеровки, а также в нижней части ковша, образуются малоскоростные зоны циркуляции. Для ковша 300 т (с высоким соотношением H/D_n) нижняя придонная малоскоростная зона занимает около 20% объема ковша, а для ковша 75 т (у которого $H/D_n \approx 1$) пристеночные малоскоростные зоны тоже занимают около 20% объема ковша.

Рис.6 иллюстрирует поля скоростей расплава при расположении продувочного отверстия в диапазоне $r/R_n = 0,8 \dots 0,95$ для исследуемых ковшей. Как видно, в этом случае практически весь расплав образует одну зону циркуляции. Малоскоростная зона циркуляции наблюдается возле шлакового пояса над продувочным отверстием, с противоположной стороны также образуется малоскоростная циркуляционная зона, но ее размер меньше в 2...4 раза. Небольшие зоны циркуляций с малыми скоростями образуются в придонной части расплава.

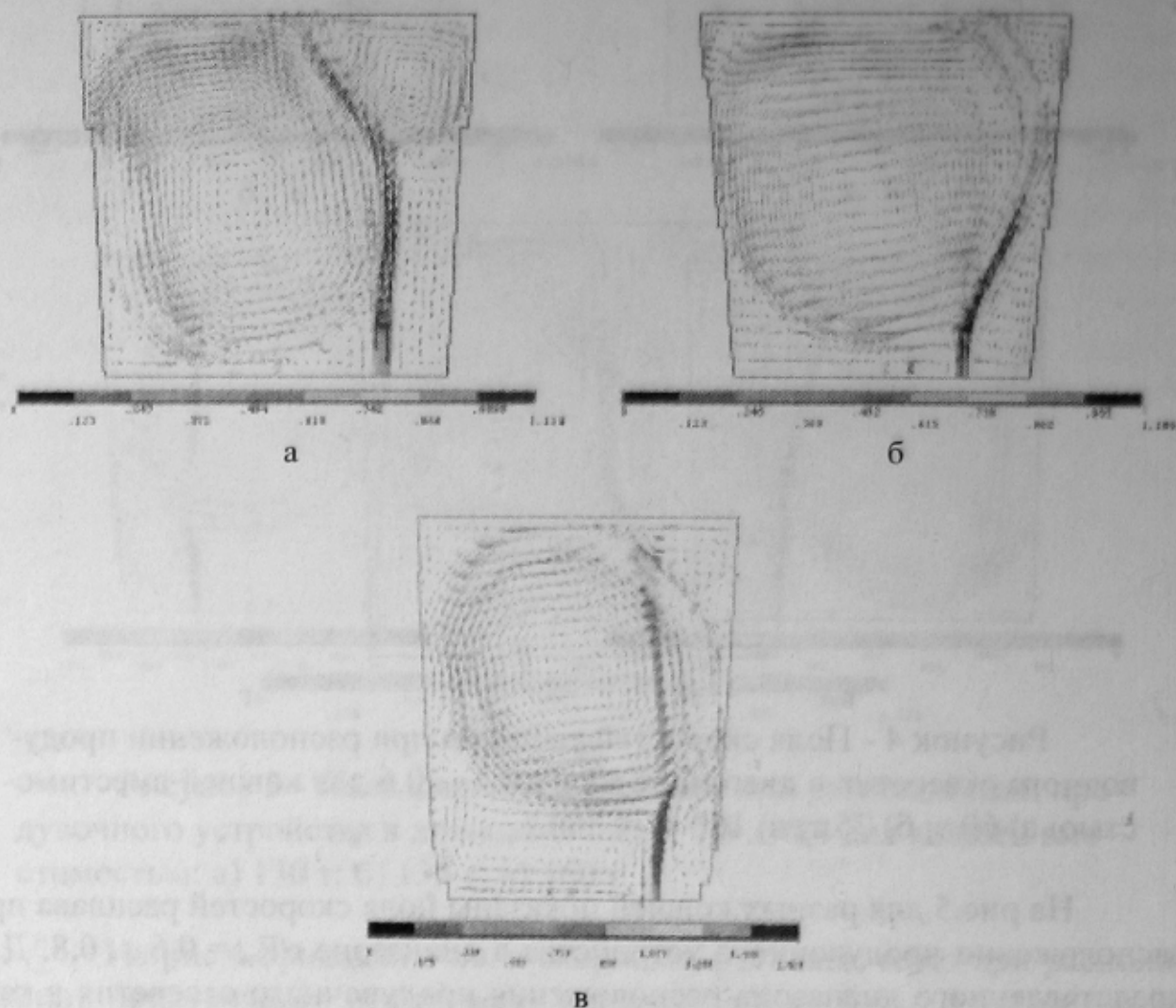


Рисунок 5 - Поля скоростей расплава при расположении продувочного устройства в диапазоне $r/R_n = 0,6 \dots 0,8$ для ковшей вместимостью: а) 75 т; б) 135 т; в) 300 т

Обобщение полученных результатов позволило сформировать характерные схемы перемешивания расплава при продувке через одно продувочное отверстие.

Рассмотрим результаты моделирования перемешивания жидкой стали в ковше при продувке через два продувочных устройства. На рис. 7 для

ковшей различной вместимости показаны поля скоростей расплава при расположении продувочных отверстий в диапазоне $r/R_n = 0,3 \dots 0,4$, наблюдаемые в начале процесса продувки (60...180 с). Представленные картины обладают осевой симметрией. Здесь четко выделяются два

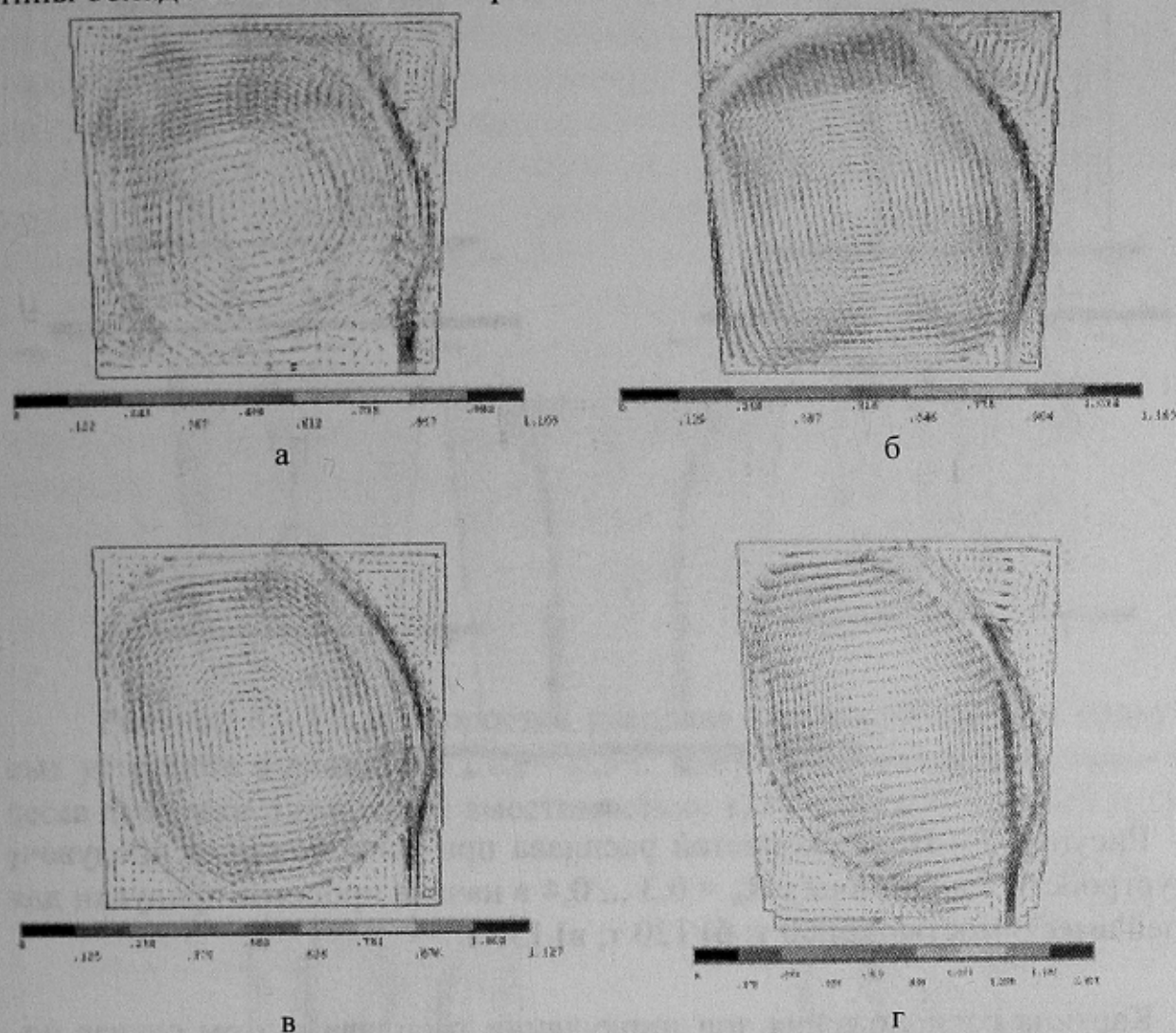


Рисунок 6 - Поля скоростей расплава при расположении продувочно-го устройства в диапазоне $r/R_n = 0,8 \dots 0,95$ для ковшей вместимостью: а) 75 т; б) 130 т; в) 160 т; г) 300 т

восходящих потока, которые делят весь объем расплава на четыре зоны циркуляции. Размеры зон, расположенных слева и справа от восходящих потоков, несколько больше, чем у зон, образовавшихся в центральной части ковша (для ковша 130 т отмечается обратная тенденция). Скорости движения потоков расплава во всех зонах циркуляции практически одинаковы.

Интересно отметить тот факт, что далее по ходу продувки происходит видоизменение зон циркуляций за счет того, что восходящие потоки в

средней части ковша сливаются и образуют единый поток (более мощный) (рис.8).

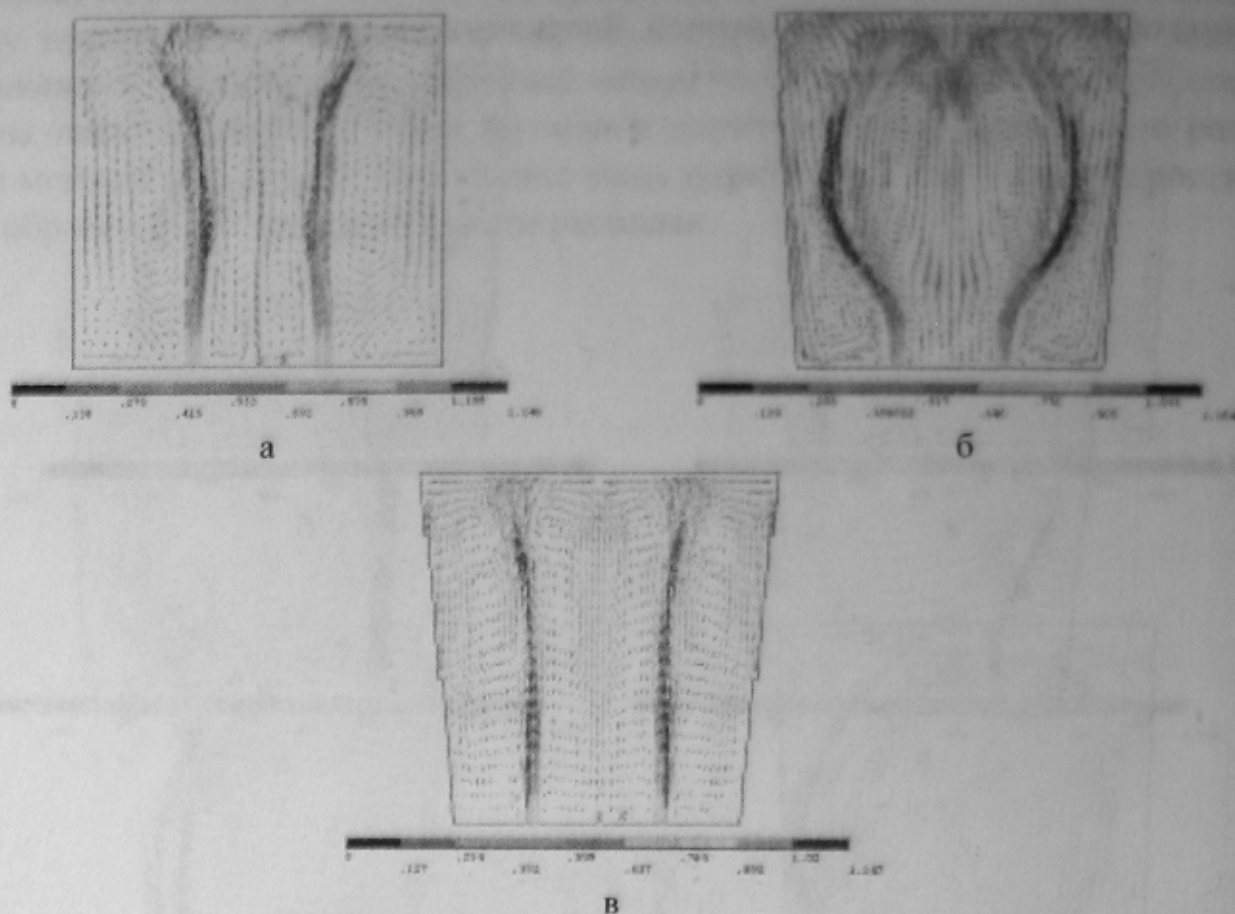


Рисунок 7 - Поля скоростей расплава при расположении продувочных устройств в диапазоне $r/R_n = 0,3 \dots 0,4$ в начале процесса продувки для ковшей вместимостью: а) 60 т; б) 130 т; в) 135 т

Картина расположения зон циркуляции расплава в этом случае подобна той, которая наблюдается при центральном расположении одного продувочного устройства (рис.2). Отличие заключается в том, что в нижней придонной части расплава с внутренней стороны восходящих потоков образуются две небольшие симметричные зоны циркуляции. Нисходящие потоки основных циркуляционных зон соударяются с футеровкой нижней части шлакового пояса и движутся к днищу ковша, активно взаимодействуя с верхней частью рабочей футеровки, расположенной под шлаковым поясом. Это, несомненно, будет способствовать ускоренному разрушению футеровки в указанных местах.

Рис.9 иллюстрирует поля скоростей расплава при расположении продувочных отверстий в диапазоне $r/R_n = 0,4 \dots 0,6$ для ковшей разной вместимости. Движение потоков расплава для этого случая подобно рассмотренным выше картинам. В объеме ковша формируется четыре одина-

ковые зоны циркуляций. Более высокие скорости потоков отмечаются в верхних областях циркуляционных зон, контактирующих с футеровкой шлакового пояса и верхней части рабочей футеровки.

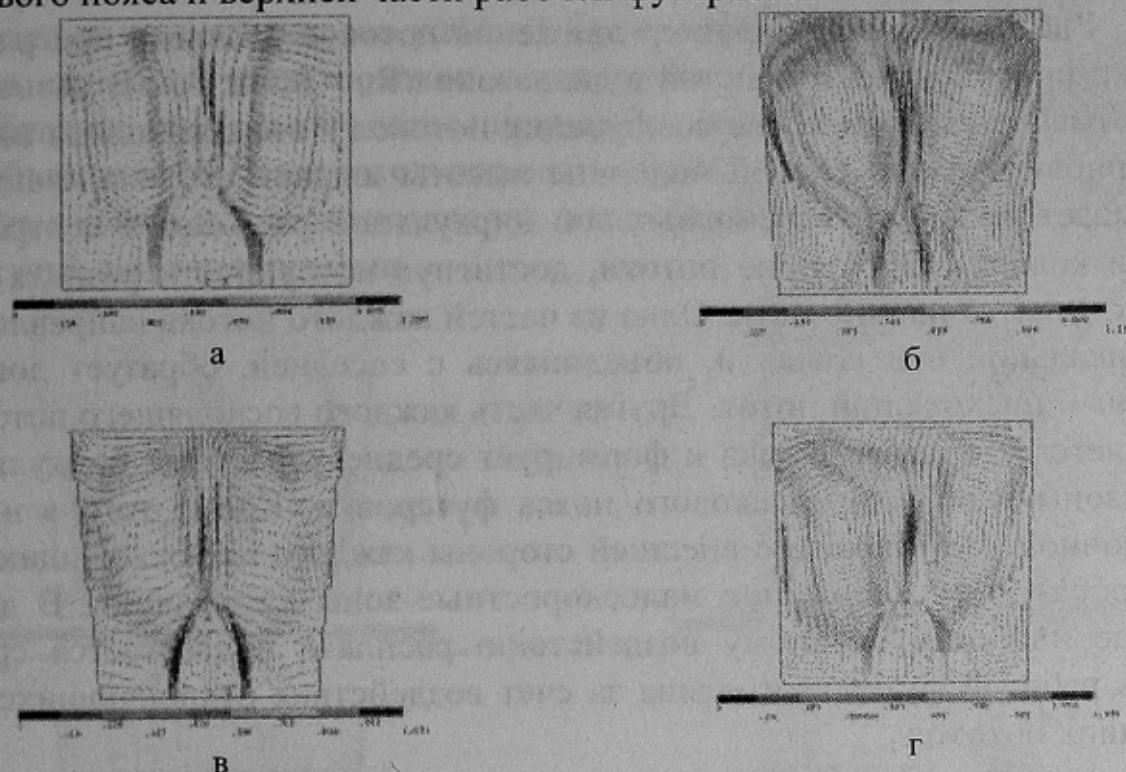


Рисунок 8 - Поля скоростей расплава при расположении продувочных устройств в диапазоне $r/R_n = 0,3 \dots 0,4$ в установившейся стадии процесса продувки для ковшей вместимостью: а) 60 т; б) 130 т; в) 135 т; г) 160 т

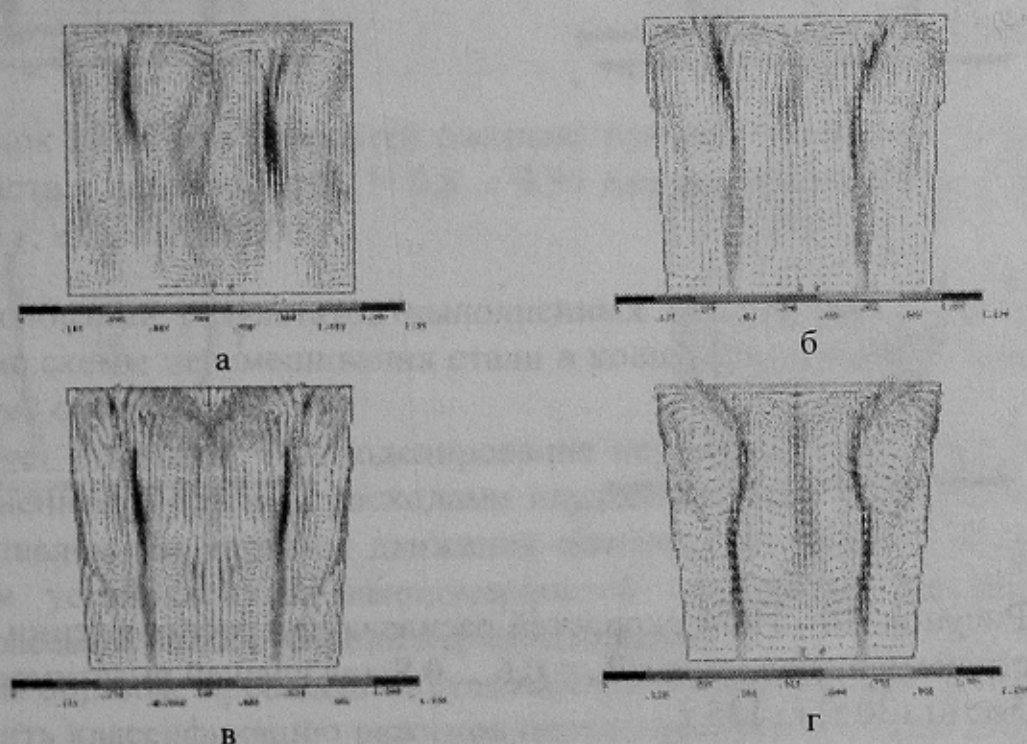


Рисунок 9 - Поля скоростей расплава при расположении продувочных отверстий в диапазоне $g/R_n = 0,4 \dots 0,6$ для ковшей вместимостью: а) 60 т; б) 75 т; в) 130 т; г) 135 т

Рис.10 отражает характер движения потоков расплава при расположении продувочных отверстий в диапазоне $g/R_n = 0,6 \dots 0,8$. В данном случае отмечается отклонение восходящих потоков к стенкам ковша на высоте приблизительно равной половине высоты жидкой стали в ковше. Это вызывает расширение основных зон циркуляций расплава в центральной части ковша. Восходящие потоки, достигнув поверхности раздела сталь-шлак, делятся на две части. Одна из частей каждого потока направляется к вертикальной оси ковша и, объединяясь с соседней, образует довольно мощный нисходящий поток. Другая часть каждого восходящего потока отклоняется к стенкам ковша и формирует среднескоростные циркуляционные зоны в области шлакового пояса футеровки. Кроме того в нижней придонной части ковша с внешней стороны каждого из восходящих потоков образуются небольшие малоскоростные зоны циркуляции. В данном случае наиболее сильному воздействию расплава подвергается средняя часть рабочей футеровки ковша за счет воздействия отклоняющихся восходящих потоков.

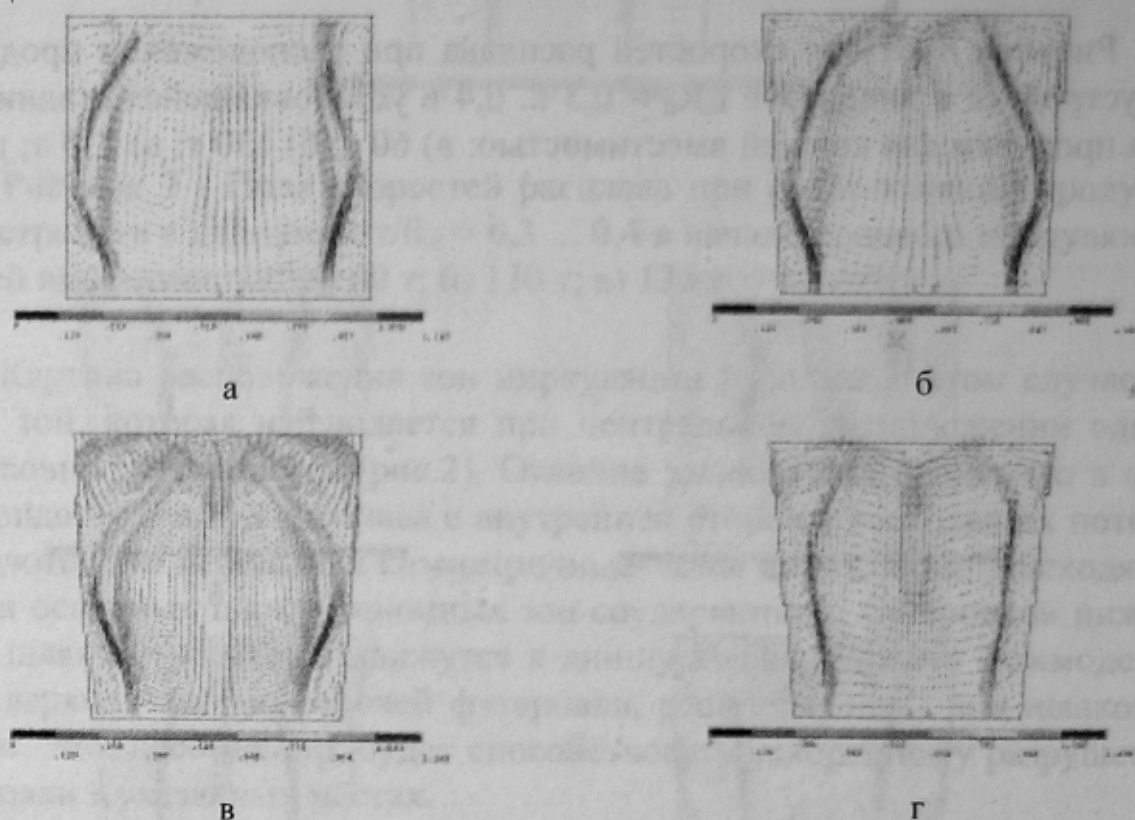


Рисунок 10 - Поля скоростей расплава при расположении продувочных устройств в диапазоне $g/R_n = 0,6 \dots 0,8$ для ковшей вместимостью: а) 60 т; б) 75 т; в) 130 т; г) 135 т

При расположении продувочных отверстий в диапазоне $r/R_n = 0,8 \dots 0,95$ для разных ковшей получены поля скоростей расплава, представленные на рис. 11. Восходящие потоки расплава движутся вдоль стенок ковша, практически по всей высоте рабочей футеровки. Достигнув поверхности раздела, основная часть потоков отклоняется к оси ковша, и, опускаясь вниз образует две большие зоны циркуляции, охватывающие почти полностью объем ковша. Незначительная часть восходящих потоков отклоняется к стенкам ковша и в зоне шлакового пояса формирует небольшие средне-скоростные зоны циркуляции.

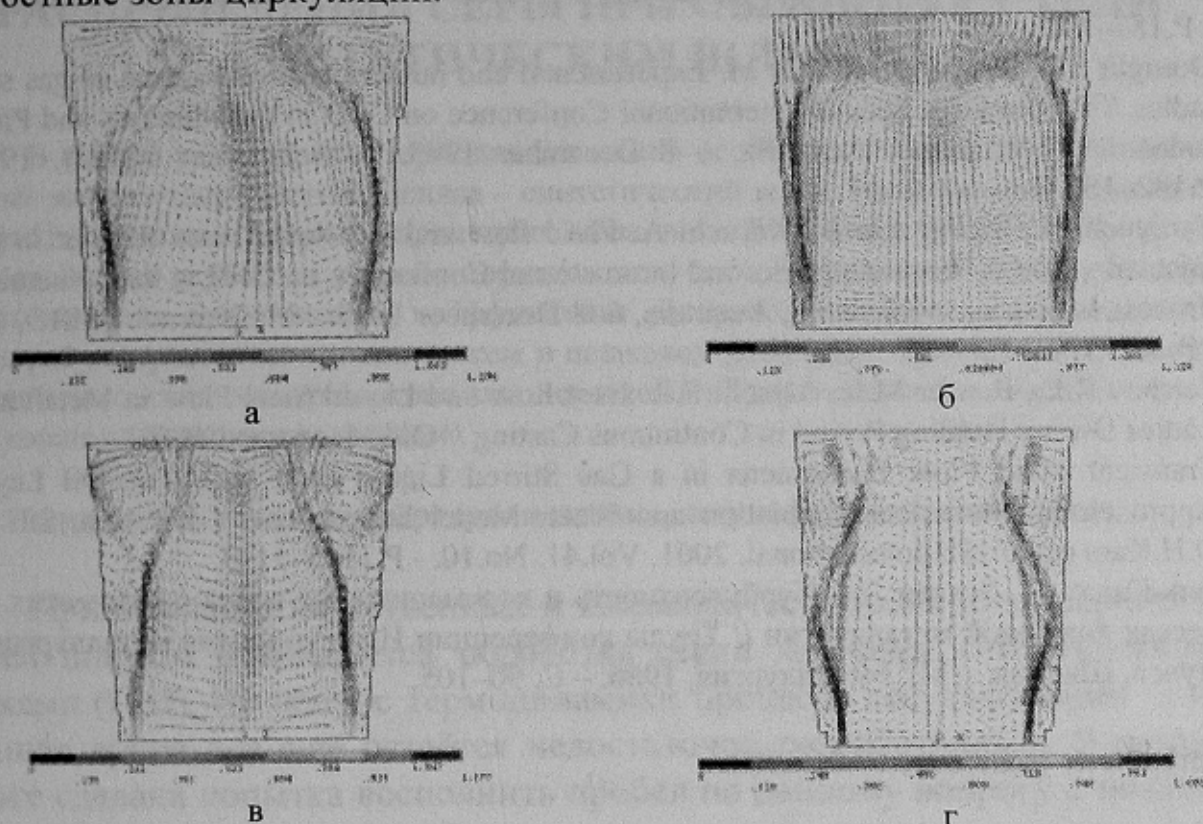


Рисунок 11 - Поля скоростей расплава при расположении продувочных устройств в диапазоне $r/R_n = 0,8 \dots 0,95$ для ковшей вместимостью: а) 75 т; б) 130 т; в) 135 т; г) 300 т

На основании результатов выполненных исследований составлены характерные схемы перемешивания стали в ковше при продувке через два продувочных отверстия.

Следует отметить, что моделирование перемешивания стали в ковше, выполненное с другими расходами вдуваемого газа, показало подобные представленным картины движения потоков, что свидетельствует о типичности установленных закономерностей перемешивания расплава стали для рассмотренных условий перемешивания.

Таким образом, проведенное компьютерное моделирование позволило выполнить классификацию режимов перемешивания стали в ковше при

продувке инертным газом, выявить типичные схемы движения потоков, а также отработать методику проведения подобных исследований. Наличие информации о зонах интенсивного перемешивания позволяет прогнозировать тепловую работу футеровки ковша и локальные зоны ее износа.

Список литературы

1. Xia J.L., Ahokainen T., Holappa L. Modelling of flow in a ladle with gas stirred liquid wood's metal // Proceedings Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Melbourne, Australia, 6–8 December 1999. – Melbourne: CSIRO, 1999. – P.187–192.
2. Domgin J.F., Gardin P., Brunet M. Experimental and numerical investigation of gas stirred ladles // Proceedings Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Melbourne, Australia, 6–8 December 1999. – Melbourne: CSIRO, 1999. – P.182–186.
3. Taniguchi S., Kawaguchi S., Kikuchi A. Fluid flow and gas-liquid mass transfer in gas – injected vessel // Proceedings Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Melbourne, Australia, 6–8 December 1999. – Melbourne: CSIRO, 1999. – P.193–198.
4. Ferreira R.E., Bauzer M.E., Minelli F.R. Heat Loss and Liquid Steel Flow in Metallurgical Ladles During Holding Period in Continuous Casting // Old Meetings: CHT97.
5. Transient Fluid Flow Phenomena in a Gas Stirred Liquid Bath with Top Oil Layer— Approach by Numerical Simulation and Water Model Experiments / J.W.Han, S.H.Heo, D.H.Kam e.a. // ISIJ International. 2001. Vol.41. No.10. – P.1165–1173.
6. Эль-Кадах Н., Зекели Дж. Турбулентность и перемешивание в технологических процессах ковшовой металлургии // Труды конференции Инжекционная металлургия'83. Лулеа, Швеция. – М.: Металлургия, 1986. – С. 90–105.

Надійшла до редколегії 07.06.2009.

**О. М. СМІРНОВ, І. М. САЛМАШ,
О. В. ОШОВСЬКА**

ДВНЗ «Донецький національний
технічний університет»

**O. N. SMIRNOV, I. N. SALMASH,
E. V. OSHOVSKAYA**

SHSI «Donetsk National Technical Univer-
sity»

**Класифікація режимів перемішування
сталі в ківші з використанням матема-
тичного моделювання.** За допомогою
прикладного пакету ANSYS виконано ма-
тематичне моделювання процесів перемі-
шування сталі в ківші.

*сталерозливний ківш, сталь, пе-
ремішування, продувка, аргон*

**Classification of Steel Mixing Conditions
in the Ladle with Mathematical Simula-
tion.** With ANSYS program the mathemati-
cal simulation of steel mixing processes in
the ladle was carried out.

*casting ladle, steel, mixing, stirring, ar-
gon*

© А. Н. Смирнов, И. Н. Салмаш,
Е. В. Ошовская, 2009