

11. Развитие бескоксовой металлургии / Н.А.Тулин, В.С.Кудрявцев, А.С.Пчелкин и др. - М.: Металлургия, 1987.-328 с.
12. Искусственный графит / В.С.Островский, Ю.С. Вигрильев, В.И.Костиков и др. - М.: Металлургия, 1986.-272 с.

Поступила в редакцию 07.12.2009

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.Н. Смирнов

© Григорьев Д.С., 2010

УДК 669.2/8

**С.Г. Егоров, И.Ф. Червоный, А.И. Шульга**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА АЛЮМИНИЯ В КОВШЕ ПРИ ТЕПЛОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

На основе компьютерного моделирования установлено, что при нагревании и охлаждении расплава алюминия в ковше, осуществляется его перемешивание в результате возникновения тепловой конвекции. Рассчитаны параметры зон перемешивания жидкого металла - температура и скорость движения расплава.

Ключевые слова: жидкий алюминий, ковш, тепловое воздействие, перемешивание расплава, характеристики перемешивания

### **Введение**

Для описания гидродинамических явлений, происходящих в металлическом расплаве, используют математические модели, которые базируются на уравнениях Навье-Стокса в приближении Буссинеска, учитывающее изменение плотности расплава в неоднородном температурном поле. Эти уравнения включают в себя: уравнение неразрывности (закон сохранения массы) и уравнение импульса (закон сохранения импульса). Как правило, совместно с уравнениями Навье-Стокса решаются уравнения тепло- и массопереноса [1-3]. Эти законы, записанные в виде дифференциальных уравнений в частных производных, решаются методом конечных элементов с применением стандартных пакетов для компьютерного моделирования движения жидкости (ANSYS, FEMINA, Comsol и др.) или с помощью самостоятельно разрабатываемых программ, реализующих этот метод [3,4,5].

### **Цель работы**

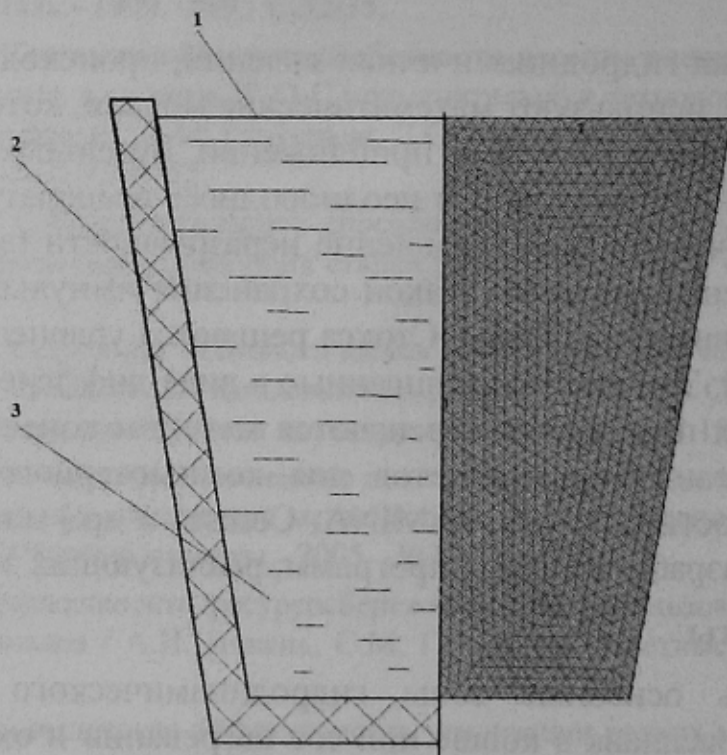
Определить основные зоны гидродинамического перемешивания алюминиевого расплава в ковше при его нагревании и охлаждении на основе математического моделирования.

## Основная часть

При производстве алюминия, алюминиевых сплавов и катанки одной из ключевой операцией является транспортирование расплава алюминия, извлекаемого из электролизеров, в ковшах к металлургическим печам или миксерам, в которых осуществляется его доводка по химическому составу [6]. При этом в ковше происходит как охлаждение расплава, так и его нагрев для поддержания заданной температуры. В работе изучалась область расплава, находящегося в ковше (рис. 1), которая на первом этапе исследований подвергалась боковому нагреву, а на втором – охлаждению.

Моделирование движения расплава в ковше в зависимости от тепловых условий осуществлялось с помощью программы Comsol. При работе в этой программе сначала была задана осесимметричная система координат (переменные  $r$  и  $z$ ), затем выбраны прикладные режимы Heat Transfer in Fluids и Laminar Flow, которые позволяют решить совместно уравнения Навье-Стокса и теплопереноса. Режим расчета – нестационарный, зависящий от времени. Интервал времени, для которого осуществлялся поиск решения, составлял 1800 с.

При решении задачи были заданы следующие свойства расплава алюминия: теплоемкость – 1086 Дж/(кг·К); теплопроводность – 95 Вт/(м·К); динамическая вязкость – 0,012 Па·с; коэффициент теплового расширения – 0,0001 1/К. Зависимость плотности расплава от температуры была задана следующим образом: при 933 К – 2368 кг/м<sup>3</sup>, при 973 К – 2357 кг/м<sup>3</sup>, при 1173 К – 2304 кг/м<sup>3</sup>.



1) свободная поверхность расплава; 2) ковш; 3) расплав алюминия

Рисунок 1 – Схема ковша с алюминиевым расплавом (слева) и изучаемой области с нанесенной сеткой конечных элементов (справа)

В качестве расчетной области при создании геометрической модели был принят внутренний объем ковша, занимаемый расплавом алюминия (рис.1). В качестве конечного элемента был выбран треугольник. Количество конечных элементов после автоматического разбиения изучаемой области составило 2070 шт.

Для учета влияния температуры на движение расплава, а движение расплава на распределение температуры в расплаве была задана объемная сила  $F_y$  в секции Laminar Flow / Volume Force:

$$F_y = g \cdot \rho \cdot \beta \cdot (T - T_{нач}), \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\rho$  – плотность алюминиевого расплава, зависящая от температуры и заданная выше;  $\beta$  – коэффициент теплового расширения;  $T$  – переменная температуры, К;  $T_{нач}$  – начальная температура расплава,  $T_{нач} = 933 \text{ К}$ .

При решении поставленной задачи использовались следующие граничные условия: 1) составляющие скорости на границах, соответствующих контакту расплава алюминия со стенками ковша, принимались равными нулю; 2) на боковой границе задана постоянная температура  $T = 973 \text{ К}$  или условие охлаждения за счет теплопроводности огнеупорного материала ковша (шамота); 3) на свободной поверхности расплава задано условие естественного конвективного охлаждения; 4) на дне расплава задано условие охлаждения за счет теплопроводности шамота.

После задания начальных и граничных условий осуществлялось решение поставленной задачи для заданного временного диапазона. Результатами расчета были вектор скорости движения и температуры расплава алюминия.

На рисунке 2 представлен процесс распространения тепла в расплаве при его нагреве. Видно, что на начальном этапе нагретые у боковой стенки порции расплава поднимаются к свободной поверхности (рис. 2 а). Здесь они охлаждаются и опускаются на дно. Через определенное время (рис.2 б) прогревается верхняя область расплава, при условии преобладания скорости подвода тепла над теплоотдачей со свободной поверхности. При поддержании заданного режима нагрева достигается полный прогрев расплава в ковше (рис. 2 в, г).

Нагрев расплава вызывает движение расплава, формируя восходящие потоки (рис. 3 а), скорость которых тем больше, чем больше перепад температуры между нагреваемой и холодной областями. В расплаве формируется поток, имеющий максимальную скорость движения на оси симметрии (рис.3 б). Однако при дальнейшем нагреве и перераспределении тепла в объеме расплава перепад температуры уменьшается, что приводит к разрушению основного течения и дроблению его на несколько течений, и снижению скорости движения расплава (рис. 3 в, г).

Температура и скорость движения расплава изменяются не только во времени, но и вдоль радиуса ковша (рис.4).

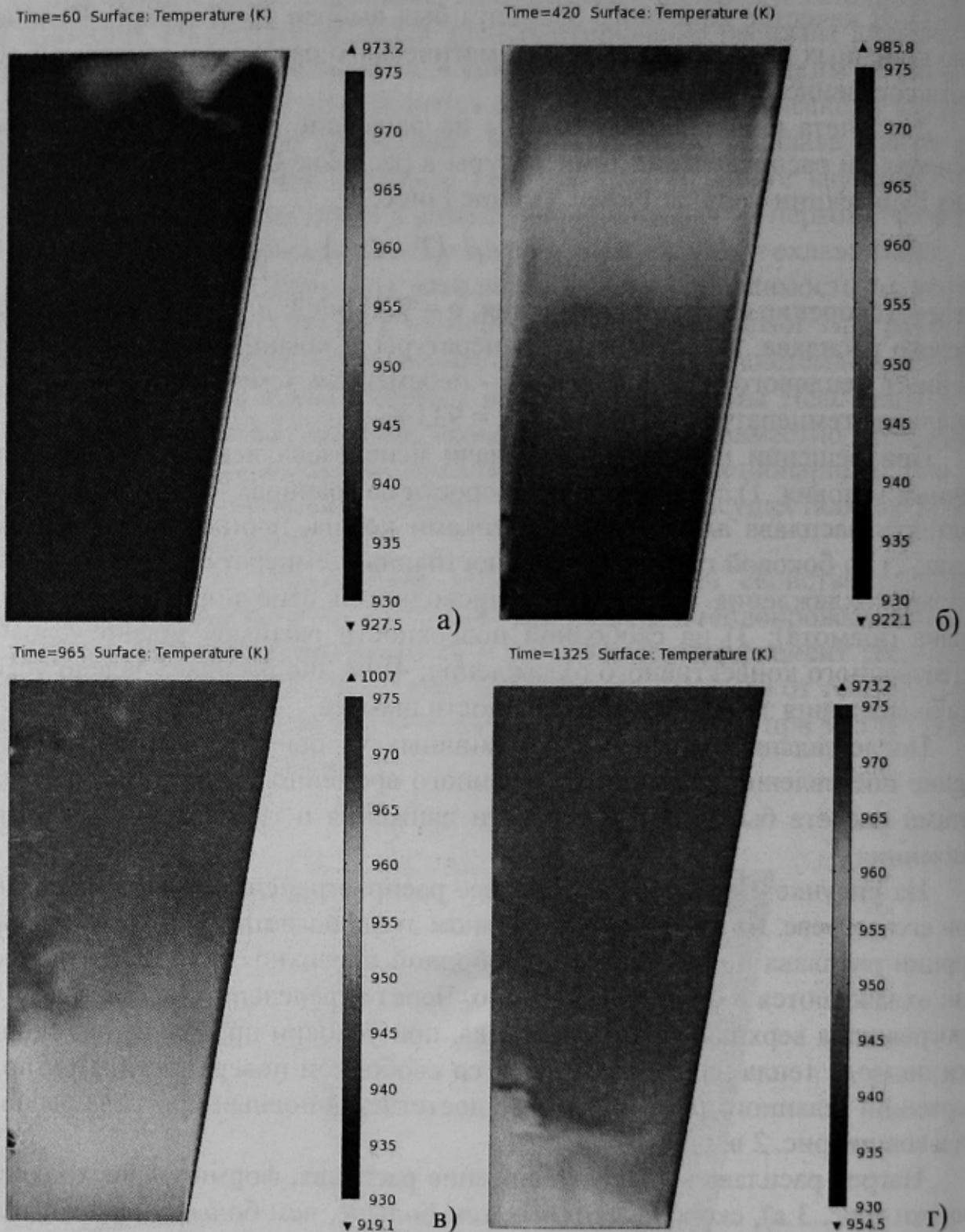


Рисунок 2 – Распределение температуры в расплаве при его нагревании через 60 (а), 420 (б), 965 (в) и 1325 секунд (г)

Наблюдается постепенное повышение температуры во всем объеме расплава и ее выравнивание (рис.4 а), однако видны температурные минимумы и максимумы температуры, вызванные колебаниями скорости движения расплава (рис.4 б).

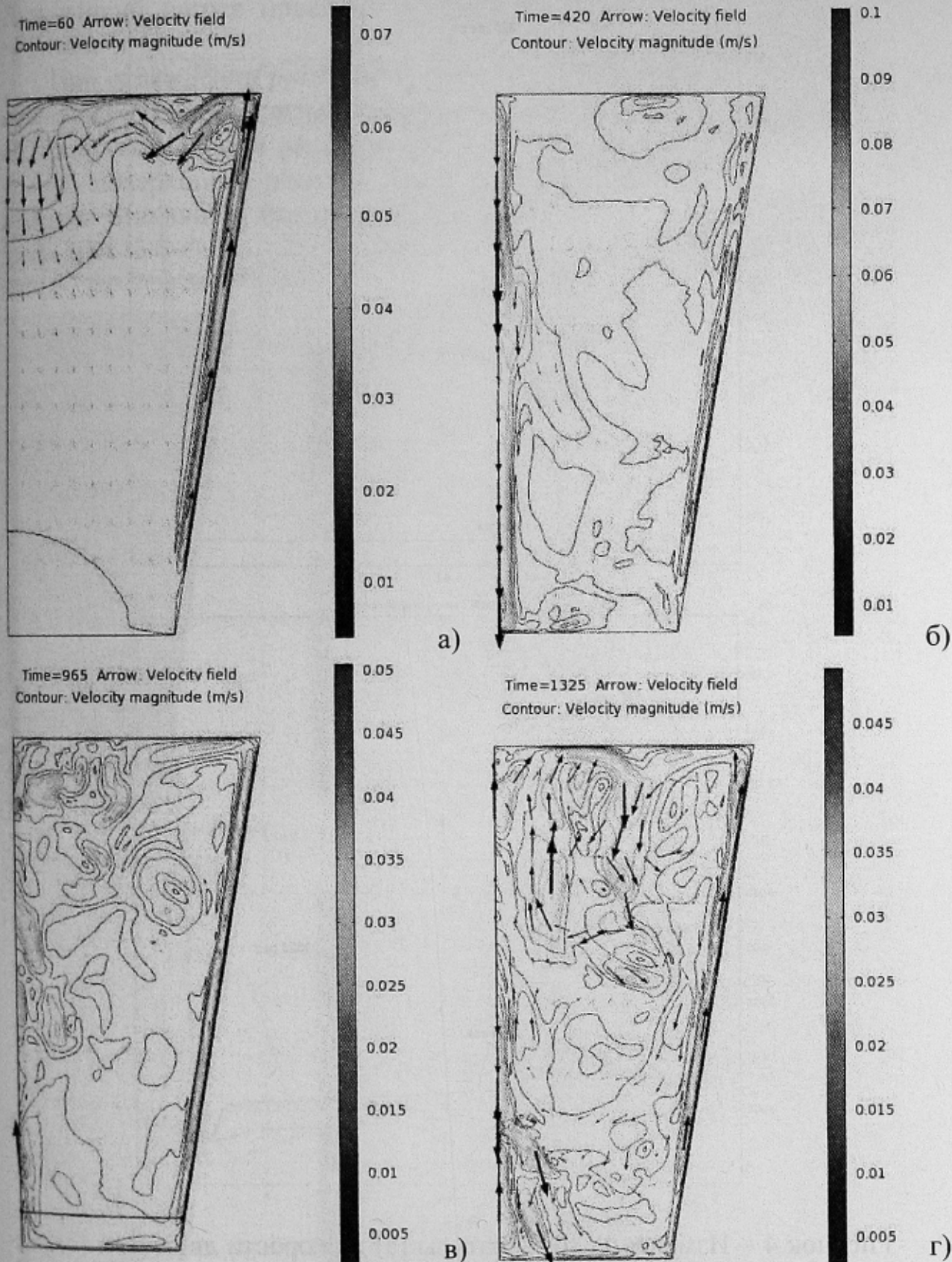


Рисунок 3 – Траектории движения расплава при его нагревании через 60 (а), 420 (б), 965 (в) и 1325 (г) секунд

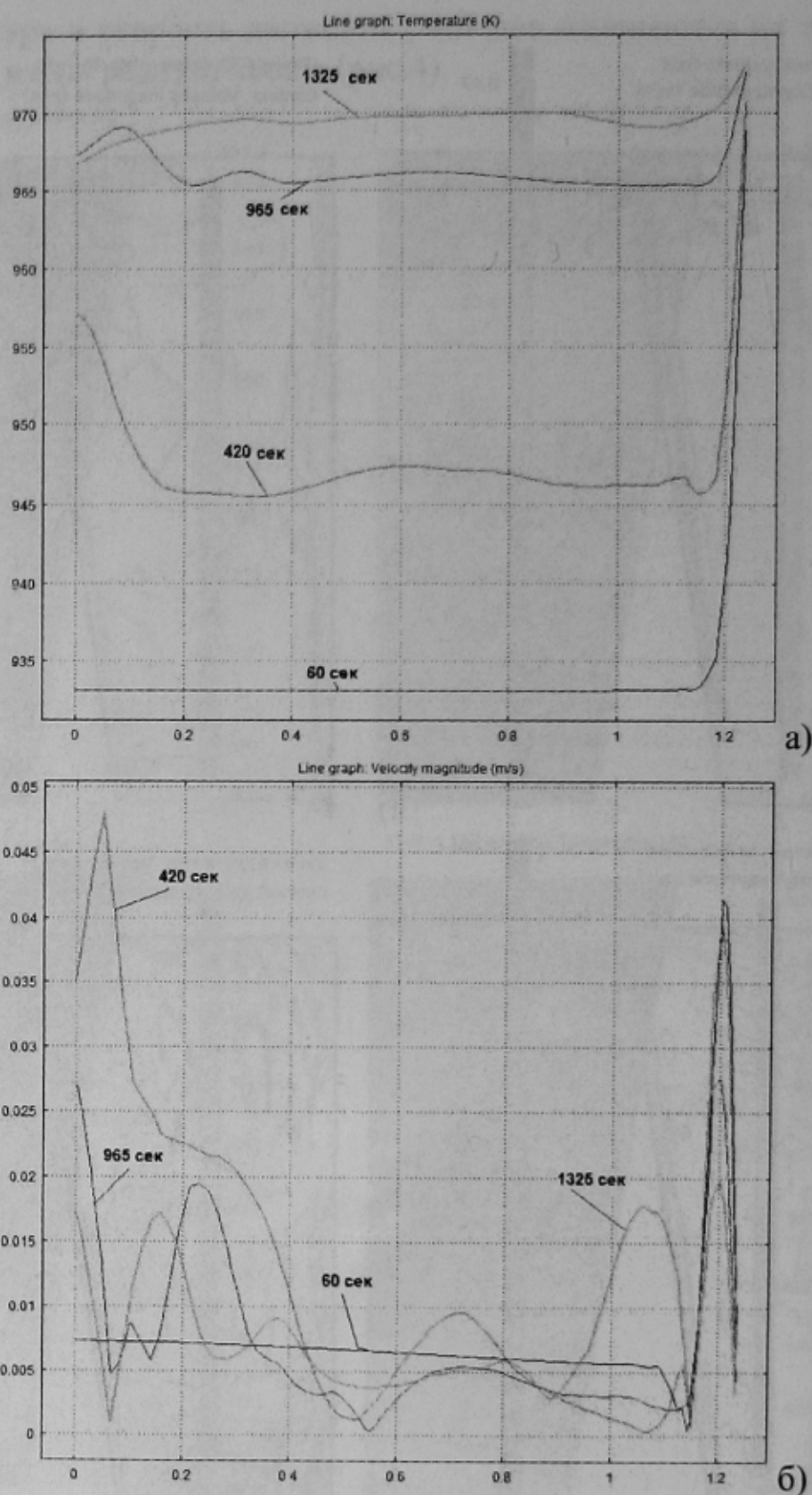


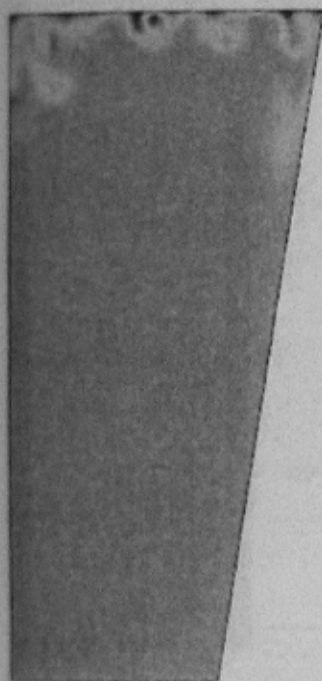
Рисунок 4 – Изменение температуры (а) и скорости движения (б) расплава вдоль радиуса в средней по высоте части ковша при нагреве

Максимальная средняя скорость движения расплава в расчетах наблюдалась через 420 с после нагрева. Что соответствует установившемуся движению расплава в ковше при перепаде температуры 20 градусов.

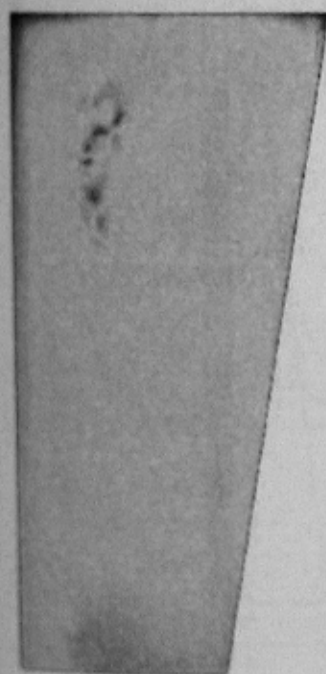
Дальнейший нагрев приводит к снижению средней скорости движения расплава.

При охлаждении расплава в ковше основной теплообмен осуществляется с окружающей средой со свободной поверхности расплава (рис. 5). Охлажденные порции расплава начинают опускаться на дно со всей свободной поверхности расплава (рис. 5 а). Постепенно порций холодного расплава становится больше и происходит охлаждение всего объема расплава (рис. 5 б-г).

Time=120 Surface: Temperature (K)



Time=965 Surface: Temperature (K)



Time=420 Surface: Temperature (K)



а)

б)

Time=1325 Surface: Temperature (K)



в)

г)

Рисунок 5 – Распределение температуры в расплаве при его охлаждении через 120 (а), 420 (б), 965 (в) и 1325 секунд (г)

Опускаясь на дно, охлажденные порции расплава формируют устойчивое течение (рис. 6). На начальном этапе течение только формируется и поэтому устойчивая траектория движения отсутствует (рис. 6 а). При установившемся режиме теплоотдачи стабилизируется перепад температуры между нагретыми и холодными областями расплава, что приводит к формированию основного течения на оси симметрии от свободной поверхности к дну (рис. 6 б-г). Кроме основного течения в расплаве формируются вторичные течения, размер и число которых зависит от высоты и диаметра ковша.

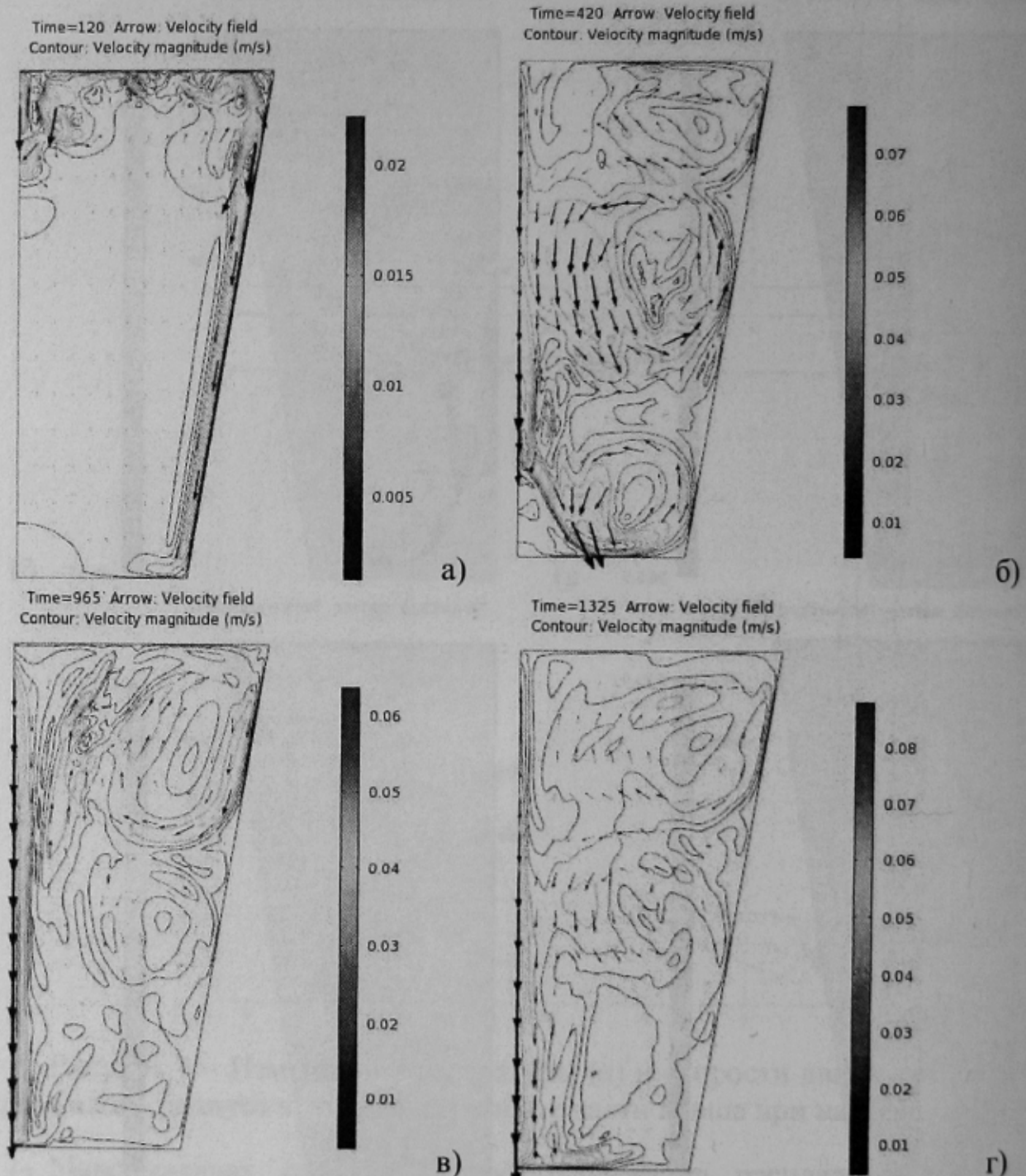
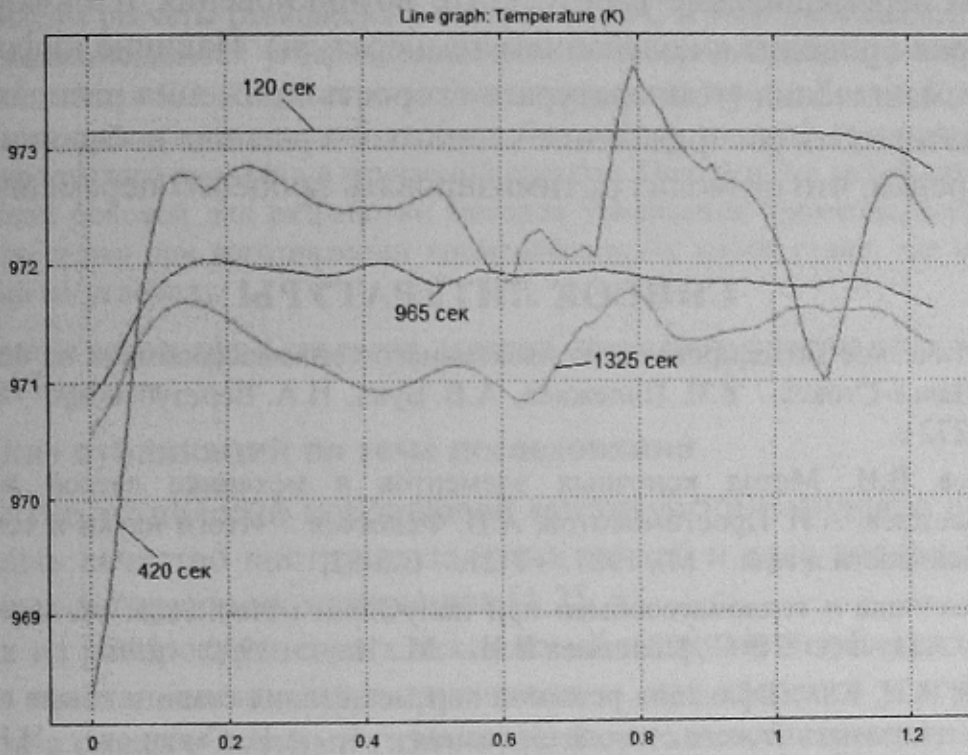


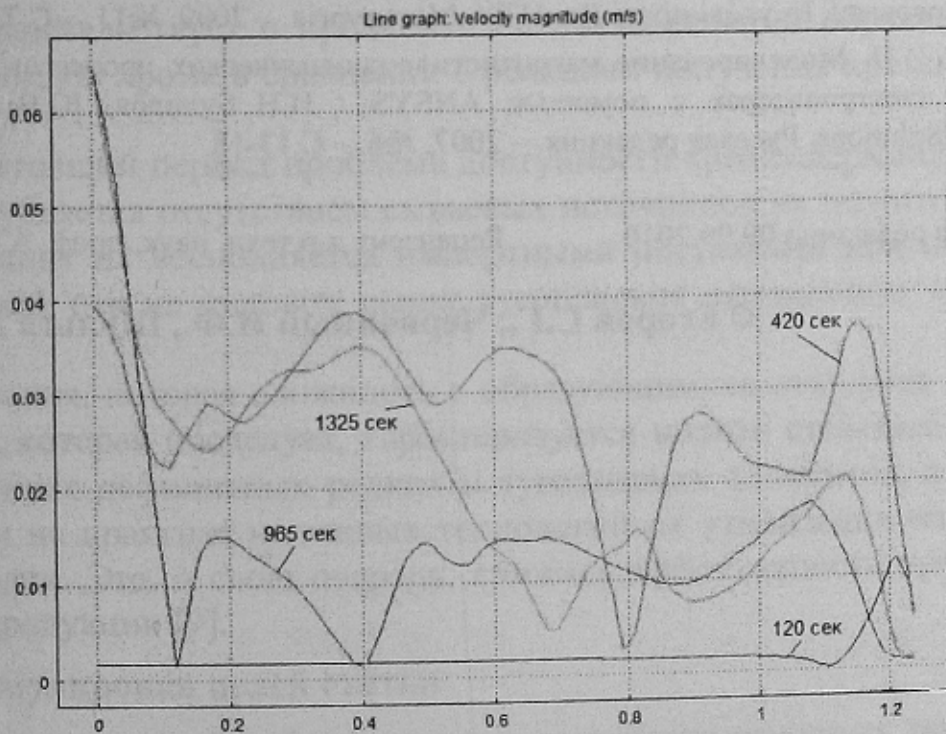
Рисунок 6 – Траектории движения расплава при его охлаждении через 120 (а), 420 (б), 965 (в) и 1325 (г) секунд



При охлаждении расплава, как и при его нагреве, также формируется течение расплава, которое влияет на распределение температуры (рис. 7). Однако в данном случае наблюдается более низкие колебания температуры и скорости, обусловленные тем, что при естественной теплоотдаче перепад температуры составил не более 10 градусов. Средняя скорость движения расплава при его охлаждении снизилась незначительно в сравнении с нагреванием расплава (рис. 4 б, 7 б).



а)



б)

Рисунок 7 – Изменение температуры (а) и скорости движения (б) расплава вдоль радиуса в средней по высоте части ковша при охлаждении

На основании результатов выполненных исследований были определены траектории движения расплава и распределение температуры расплава алюминия в ковше при нагревании и охлаждении.

### **Выводы**

Проведенное компьютерное моделирование позволило установить, что при нагревании и охлаждении расплава алюминия в ковше, осуществляется его перемешивание в результате возникновения тепловой конвекции, которая приводит к колебаниям температуры. Наличие информации о зонах перемешивания (температура и скорость движения расплава) позволит прогнозировать распределение вводимых в расплав добавок и скорость их растворения, что позволит оптимизировать процессы перемешивания.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В.И. Полежаев, А.В. Бунэ, Н.А. Везеуб и др. – М.: Наука, 1987. – 272 с.
2. Полежаев В.И. Метод конечных элементов в механике вязкой жидкости / В.И. Полежаев, А.И. Простомолотов, А.И. Федосеев // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. – М., 1987. – Т.21. – С.3-92.
3. Гидромеханика и теплообмен при получении материалов: сб. науч. трудов / отв. ред. Авдеевский В.С., Полежаев В.И. – М.: Наука, 1990. – 296 с.
4. Смирнов А.Н. Классификация режимов перемешивания стали в ковше с использованием математического моделирования / А.Н. Смирнов, И.Н. Салмаш, Е.В. Ошовская // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. – 2009, №11. – С.73-86.
5. Будилов И.Н. Моделирование магнитногидродинамических процессов в промышленных электролизерах с помощью ANSYS / И.Н. Будилов, Ю.В. Лукашук // ANSYS Solutions. Русская редакция. – 2007, №6. – С.13-18.

Поступила в редакцию 09.09.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.Н. Смирнов

© Егоров С.Г., Червонный И.Ф., Шульга А.И., 2010