

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОБЪЕМЕ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА ПРИ ЕГО НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ

*Запорізька державна інженерна академія*

У роботі на основі математичного моделювання вивчається коливання концентрації додавань, що вводять до розплаву, під дією конвекційних потоків розплаву. Встановлено, що при нагріванні або охолодженні в розплаві формуються різні циркуляційні течії, що сприяють або перешкоджають розповсюдженню добавок, що вводяться, у розплаві. Нестационарний розвиток течій, що утворилися, призводить до коливань розподілу добавок в об'ємі розплаву.

В работе на основе математического моделирования изучается колебание концентрации вводимых в расплав добавок под действием конвективных потоков. Установлено, что при нагревании или охлаждении в расплаве формируются различные циркуляционные течения, способствующие или препятствующие распространению в расплаве вводимых добавок. Нестационарное развитие образовавшихся течений приводит к колебаниям распределения добавок по объему расплава.

*Введение.* Изучение процессов гидромеханики и тепломассообмена с помощью вычислительного эксперимента в современных условиях необходимо для ускоренного совершенствования технологии производства металлов. Технология получения алюминия представляет собой сложный, достаточно энергоемкий и дорогостоящий процесс, что существенно затрудняет экспериментальные исследования [1,2]. В связи с этим общепризнанным является моделирование промышленных процессов с использованием компьютерных моделей. Опираясь на заложенные в модели фундаментальные законы, выраженные в виде дифференциальных уравнений в частных производных, расчетные эксперименты позволяют отслеживать тенденции в изменении параметров, а также определять направление совершенствования технологии независимо от массы случайных факторов, имеющих место в любом реальном производственном процессе. Такие возможности и преимущества математических методов необходимы как на стадии исследования физических процессов, так и на стадии становления и реализации технологии [3-5]. В пакетах прикладных программ, предназначенных для моделирования реальных физических процессов, в основном, реализуется метод конечных элементов [6,7].

В технологической линии производства алюминия обязательной операцией является транспортирование в ковшах извлекаемого из электролизеров расплава алюминия к металлургическим печам или миксерам, в которых осуществляют его доводку по химическому составу [1]. Во время транспортировки изменяются тепловые условия, в которых находится расплав, что вызывает в нем конвективное движение, которое оказывает влияние на распределение различных элементов, содержащихся в расплаве.

*Постановка задачи.* Целью работы является проведение расчетных исследований изменения во времени концентрации добавок, вводимых в расплав, с

помощью прикладной программы для моделирования физических процессов «Comsol».

© Егоров С.Г., Воляр Р.Н., 2012

*Основная часть.* Моделирование движения металлического расплава в ковше в зависимости от тепловых условий было осуществлено в работе [8]. Из данной работы были взяты расчетная область, физические свойства расплава, температурные условия и временной интервал исследований. В процессе построения модели была выбрана осесимметричная система координат с переменными  $r$  и  $z$ . К использованным ранее в работе [8] прикладным режимам «Heat Transfer in Fluids» и «Laminar Flow», обеспечивающим совместное решение уравнений теплопереноса и Навье-Стокса, добавили режим «Transport of Diluted Species», в котором решали уравнение массопереноса:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) + R, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация вещества, моль/м<sup>3</sup>;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $R$  – скорость реакции для заданного вещества, моль/(м<sup>3</sup>·с);  $u$  – вектор скорости движения металлического расплава, м/с.

При решении задачи использовали следующие граничные условия:

– составляющие скорости на границах, соответствующих контакту расплава алюминия со стенками ковша, принимали равными нулю;

– на боковой границе задавали постоянную температуру  $T = 973$  К (условие нагрева расплава) или естественное охлаждение за счет теплопроводности огнеупорного материала ковша (условие охлаждения расплава);

– на свободной поверхности расплава принимали условие естественного конвективного охлаждения;

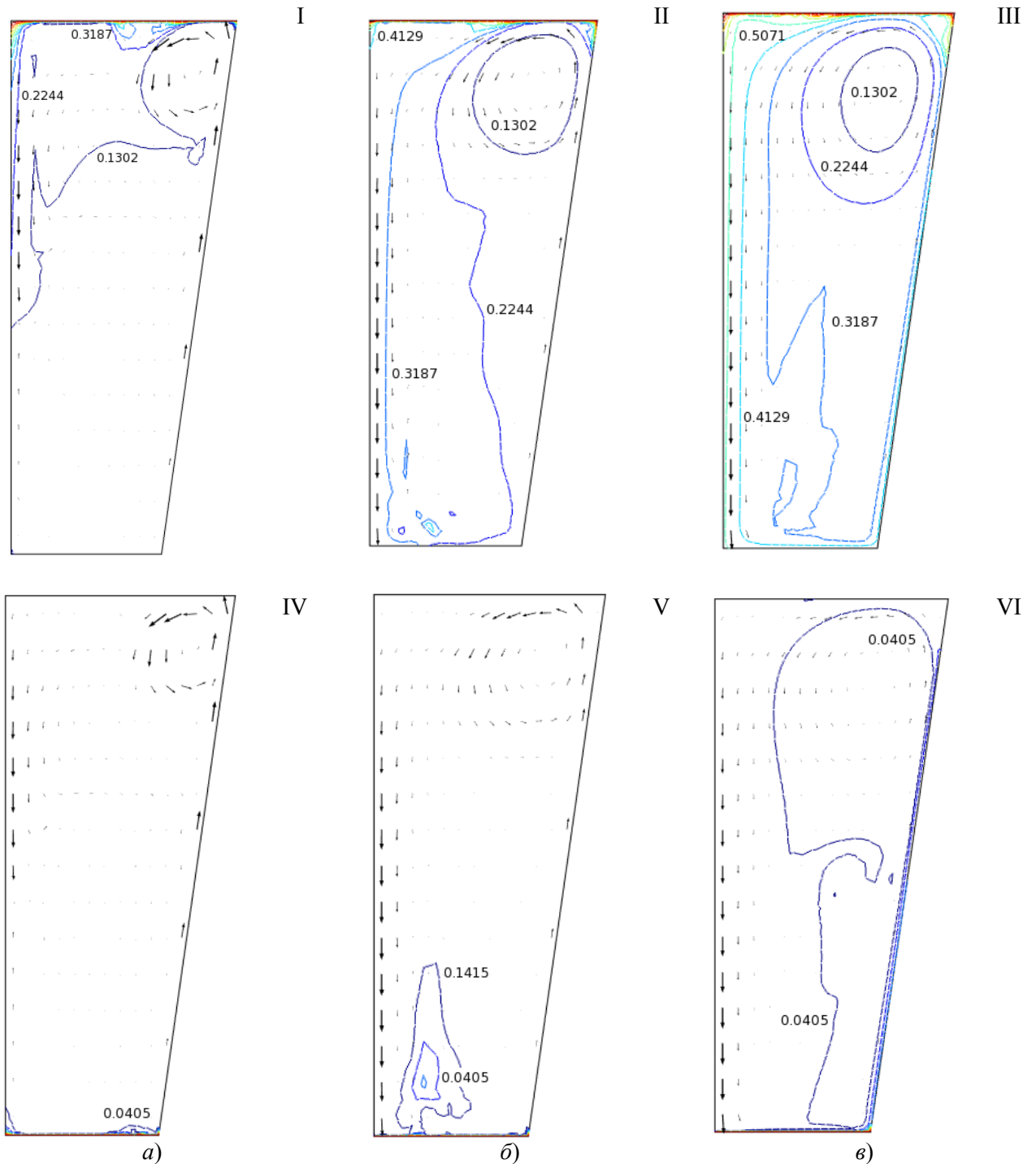
– на дне расплава задавали условие охлаждения за счет теплопроводности огнеупорного материала ковша;

– в месте ввода добавок в расплав их концентрацию принимали максимальной ( $C = 1$ ), на других границах – равной нулю.

На первом этапе исследований изучали ситуацию, когда добавки, вводимые в расплав, загружают на зеркало расплава при боковом нагреве (рис. 1, I-III). В этом случае осуществляется перенос добавки от боковой поверхности ковша к его центру за счет конвективного движения расплава (на рисунке направление движения расплава обозначено стрелками). На начальном этапе порции расплава, нагретые у боковой стенки, поднимаются к свободной поверхности (рис. 1, I), где охлаждаются и опускаются на дно ковша. Возникающие конвективные потоки участвуют в переносе не только порций расплава, но и добавок, вводимых через свободную поверхность в расплав. Поэтому проникновение добавок в расплав происходит, в основном, в центральной части ковша в направлении от свободной поверхности расплава к дну ковша (рис. 1, I). Скорость конвективных течений расплава тем больше, чем больше перепад температуры между нагреваемой и холодной областями, и поток, формирующийся в расплаве, имеет максимальную скорость движения на оси симметрии (рис. 1, I-III). Однако при дальнейшем нагреве расплава вблизи его свободной поверхности начинает формироваться вихрь с перемещением расплава против часовой стрелки, что препятствует проникновению добавок в расплав через данную область (рис. 1, II-III) и способствует дальнейшему

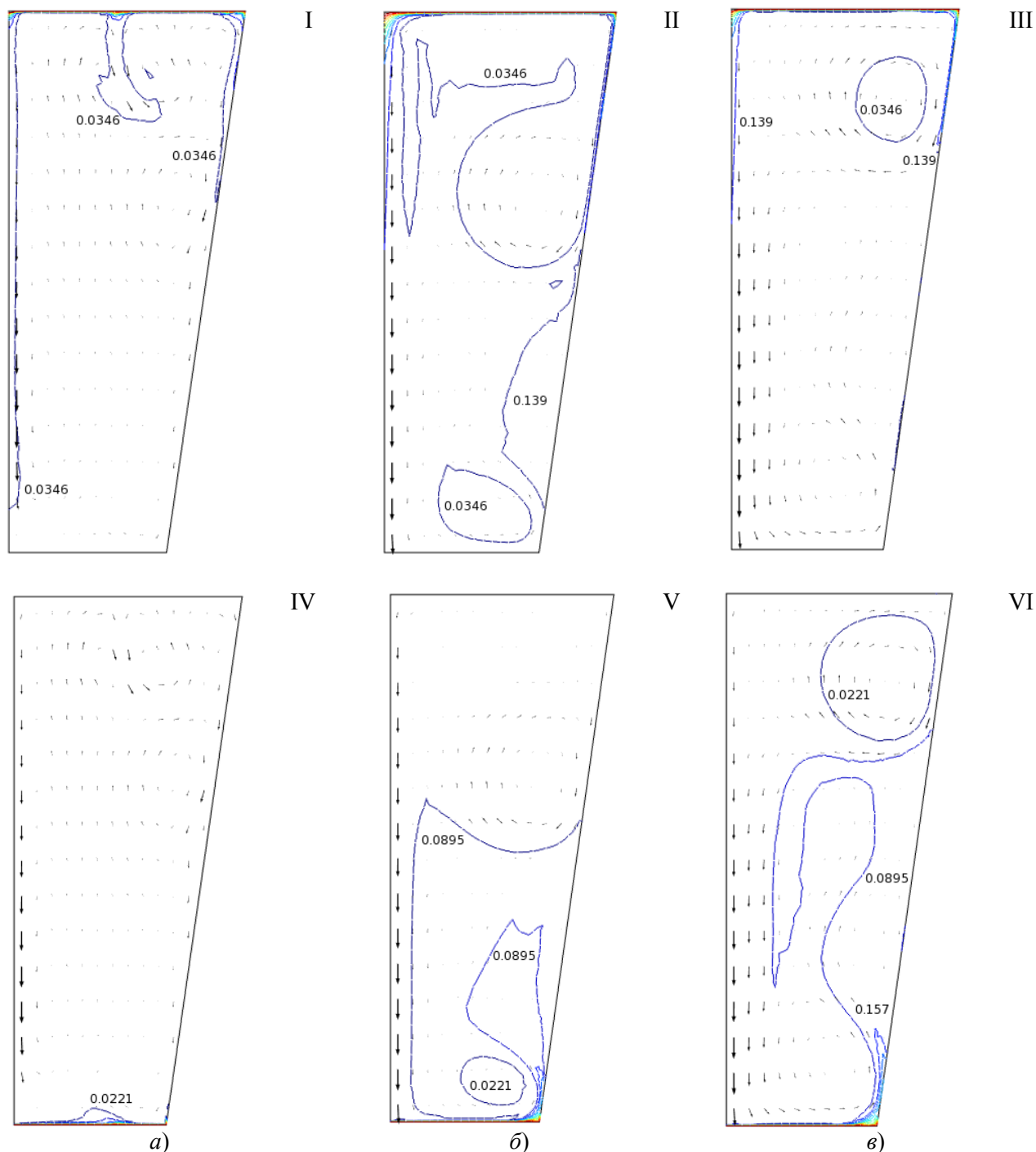
поступлению добавок в расплав в центральной части ковша, при этом значительная часть вводимых добавок (около 50 %) достигает дна ковша.

При введении добавок через нижнюю часть ковша восходящий поток, который формируется у боковой стенки, способствует «втягиванию» вводимых добавок в расплав, а нисходящий поток в центральной части ковша – «размытию» добавок на дне ковша (рис. 1, IV-VI). Вводимые добавки проникают в расплав вблизи боковой стенки ковша, и скорость их проникновения очень низкая (рис. 1, VI).



**Рисунок 1** – Изменение концентрации (моль/м<sup>3</sup>) добавок, вводимых в расплав через 150 (а), 900 (б) и 1800 с (в) при его нагреве

Охлаждение расплава приводит к изменению траектории движения его порто-ков, а, следовательно, оказывает влияние на распределение добавок в объеме расплава. При введении добавок в расплав с его поверхности наблюдается их проникновение в центральной части ковша и вблизи боковой стенки ковша в разные временные интервалы (рис. 2, I-III).



**Рисунок 2** – Изменение концентрации (моль/м<sup>3</sup>) добавок, вводимых в расплав через 150 (а), 900 (б) и 1800 с (в) при его охлаждении

Это связано с движением холодных порций расплава вниз. Такое движение постепенно формирует циркуляцию расплава, при которой максимальная скорость его движения наблюдается по центру ковша, в средней части (рис. 2,III). При этом вблизи свободной поверхности расплава и боковой стенки ковша формируется

вихрь, в котором расплав перемещается по часовой стрелке. В данном случае такое направление вращения вихря способствует проникновению вводимых добавок вблизи боковой стенки ковша (рис. 2,III).

В случае, когда добавки вводятся в расплав со дна ковша, холодные порции расплава, опускающиеся по оси симметрии, начинают «размывать» слой добавок на дне ковша (рис. 2,IV). Добавки под действием течения проникают в расплав до средней области по высоте (рис. 2, V), где их дальнейшему перемещению вверх начинает препятствовать вихрь. При установившемся циркуляционном течении расплава в этом вихре перемещается определенная часть вводимых добавок, а основная их часть переходит в расплав снизу, вблизи боковой поверхности ковша (рис. 2,VI).

Из всех рассмотренных режимов ввода добавок в расплав наибольшая скорость распространения добавок в расплав наблюдается при боковом нагреве расплава и добавлении добавок на свободную поверхность расплава. Во всех остальных режимах скорость распространения добавок в расплаве значительно ниже.

*Выводы.* При помощи моделирования установлено, что циркуляционные течения, возникающие при нагреве или охлаждении расплава алюминия в ковше, приводят к колебаниям концентрации добавок, вводимых в расплав, в его объеме. Полученная информация о зонах перемешивания позволит прогнозировать распределение вводимых в расплав добавок и скорость их растворения, а, следовательно, оптимизировать процессы перемешивания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Металлургия алюминия [Текст] / Ю. В. Борисоглебский, Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин и др. – Новосибирск : Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 438 с. – Библиогр. : с. 427. – ISBN 5-02-031632-6.*
2. *Галевский, Г. В. *Металлургия вторичного алюминия : учеб. пособие [Текст] / Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис. – Новосибирск : Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 289 с. – Библиогр. : с. 284-286. – ISBN 5-02-031403-X.**
3. *Будилов, И. Н. *Моделирование магнитогидродинамических процессов в промышленных электролизерах с помощью ANSYS [Текст] / И. Н. Будилов, Ю. В. Лукашук // ANSYS Solutions. Русская редакция. – 2007. – № 6. – С. 13-18.**
4. *Смирнов, А. Н. *Классификация режимов перемешивания стали в ковше с использованием математического моделирования [Текст] / А. Н. Смирнов, И. Н. Салмаш, Е. В. Ошовская // Наукові праці ДонНТУ. – Металургія. – 2009. – Вип. 11. – С. 73-86.**
5. *Мамонтов, Д. В. *Моделирование потока газа в печи автогенной плавки медного концентрата в ANSYS CFX [Текст] / Д. В. Мамонтов, Е. Е. Мамонтова // ANSYS Solutions. Русская редакция. – 2007. – № 6. – С. 32-35.**
6. *Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса [Текст] / В. И. Полежаев, А. В. Бунэ, Н. А. Везезуб и др. – М. : Наука, 1987. – 272 с. – Библиогр. : с. 256-268.*
7. *Полежаев, В. И. *Метод конечных элементов в механике вязкой жидкости [Текст] / В. И. Полежаев, А. И. Простомолотов, А. И. Федосеев // Итоги науки и техники. – Механика жидкости и газа. – М. : 1987. – Т. 21. – С. 3-92.**
8. *Егоров, С. Г. *Движение расплава алюминия в ковше при его нагреве [Текст] / С. Г. Егоров // Металургія : наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2011. – Вип. 23. – С. 36-41.**

Стаття надійшла до редакції 17.11.2011 р.  
Рецензент, проф. І.Ф. Червоний