

03

Численное исследование влияния конструкции МГД-перемешивателей на процесс непрерывного литья круглых слитков алюминиевого сплава. II. Распределение пассивной примеси в теплом верхе кристаллизатора

© С.Ю. Хрипченко, Е.Ю. Тонков

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
614013 Пермь, Россия
e-mail: tonkov.e@icmm.ru, khripch@icmm.ru

Поступило в Редакцию 11 февраля 2026 г.
В окончательной редакции 24 апреля 2026 г.
Принято к публикации 28 апреля 2026 г.

Рассмотрены четыре конструкции МГД-перемешивателей, осуществляющих процесс непрерывного литья круглых алюминиевых слитков. С использованием программного пакета COMSOL Multiphysics v6.2 проведены численные эксперименты, моделирующие процесс распространения примеси в жидком металле в теплом верхе кристаллизатора машины непрерывного литья. Показана эволюция распределения примеси со временем в процессе работы МГД-перемешивателей четырех разных конструкций. На основе выбранных коэффициентов неоднородности распределения примеси в объеме перемешиваемого металла произведено сравнение эффективности работы рассматриваемых конструкций МГД-перемешивателей.

Ключевые слова: непрерывное литье, теплый верх кристаллизатора, МГД-перемешивание, индуктор бегущего и вращающегося магнитного поля, пассивная примесь, коэффициенты неоднородности распределения примеси.

DOI: 10.61011/JTF.2026.08.63358.25-26

Введение

В процессе получения круглых алюминиевых слитков на машинах непрерывного литья жидкий алюминиевый сплав поступает из раздаточной печи по желобу в несколько кристаллизаторов, расположенных на литейном столе. Кристаллизатор представляет собой низкий, обычно алюминиевый, водоохлаждаемый цилиндр, у которого вместо дна имеется выдвигаемый поддон. Жидкий алюминиевый сплав, попадая в кристаллизатор, начинает затвердевать, и по мере формирования слитка поддон вытягивает его вниз в шахту с водой.

Для создания мелкозернистой структуры, повышающей пластические свойства слитков, применяют перемешивание расплава во время его кристаллизации [1]. Одновременно с измельчением зерна в структуре слитка необходимо равномерно распределять в его объеме различного рода сторонние примеси и компоненты сплава [2]. Этот процесс можно осуществлять бесконтактным образом с помощью МГД-перемешивателей.

Для эффективного перемешивания металла на кристаллизаторе устанавливают так называемый теплый верх или тепловую насадку, представляющую собой полый цилиндр из огнеупорного материала. Дело в том, что жидкая часть алюминия при затвердевании в невысоком кристаллизаторе обладает малым объемом, что создает трудности создания эффективного перемешивания с помощью внешнего магнитного поля. Теплый верх

позволяет значительно увеличить объем металла и организовать в нем эффективное МГД-перемешивание.

Существуют различные конструкции МГД-перемешивателей, что объясняется тем, что, помимо эффективной работы, конструкции должны вписываться в ограниченное пространство между кристаллизаторами на литейном столе машины непрерывного литья. Эффективность работы этих перемешивателей по равномерному распределению примеси в объеме получаемого слитка может быть различной.

Для изучения этого процесса в настоящей работе рассматривались только те МГД-перемешиватели, которые наилучшим образом создают мелкозернистую структуру слитка. Это конструкции, имеющие в своем составе индуктор вращающегося поля. Такие перемешиватели создают [3] момент сил, вращающий жидкий металл, и тем самым создающий сильные сдвиговые течения у фронта кристаллизации, которые приводят к образованию мелкозернистой структуры слитка [4].

Бегущие и вращающиеся магнитные поля могут создаваться как трехфазными, так и двухфазными индукторами. Следует отметить, что двухфазные индукторы в исполнении более компактны, чем трехфазные [5], кроме того, перемешиватели с двухфазными индукторами, в отличие от трехфазных, удобно компактно объединять с себе подобными на общем литейном столе машины непрерывного литья. На примере четырех различных конструкций МГД-перемешивателей в настоящей работе

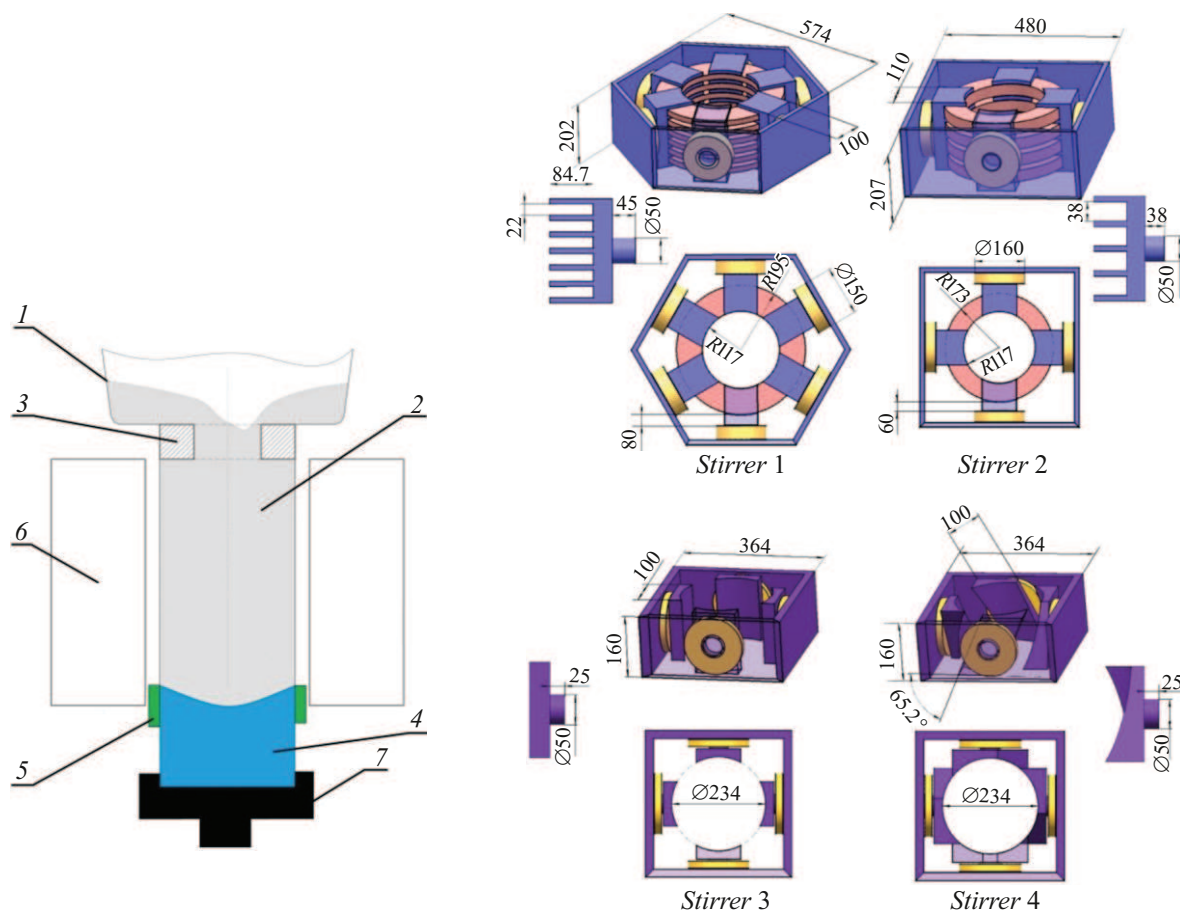


Рис. 1. Рассматриваемые конструкции МГД-перемешивателей. Слева на рисунке изображена схема кристаллизатора с теплым верхом, где 1 — принимающая воронка теплого верха; 2 — теплый верх кристаллизатора; 3 — перегородка с центральным отверстием; 4 — твердый слиток; 5 — кристаллизатор; 6 — МГД-перемешиватель; 7 — подвижный поддон.

рассмотрено и численно исследовано распространение пассивной примеси, производимое конструкциями в жидком металле в объеме теплого верха кристаллизатора машины непрерывного литья.

1. Перемешиватель с трехфазным индукторами бегущего и вращающегося магнитного поля. Этот перемешиватель имеет, как индуктор вращающегося магнитного поля, возбуждающий тороидальное течение жидкого металла в теплом верхе кристаллизатора, так и индуктор бегущего поля, создающий вертикальные электромагнитные силы, которые генерируют полоидальное (вертикальное) течение. Как показано в работе [6], вращающий момент сил, создаваемый трехфазным индуктором вращающегося поля, почти в два раза выше момента, создаваемого двухфазным. Средняя завихренность электромагнитных сил, обеспечивающих генерацию полоидального течения, также почти в два раза выше у конструкции трехфазного исполнения.

2. Перемешиватель с двухфазными индукторами бегущего и вращающегося магнитного поля (рис. 1). Данная конструкция также имеет индуктор вращающегося и бегущего магнитного поля. Вследствие того, что эти индукторы двухфазные, интенсивность возбуждаемых

ими течений ниже, чем у трехфазных, однако габариты таких устройств меньше, что и дает им некоторое преимущество.

3. Перемешиватель, имеющий только один двухфазный индуктор вращающегося магнитного поля (рис. 1). Данная конструкция имеет меньшие габариты, чем перемешиватели с двумя индукторами. Индуктор вращающегося магнитного поля может создавать необходимую структуру слитка, в то же время за счет неоднородного распределения магнитного поля по высоте объема жидкого металла (рис. 2), вследствие ограниченности по высоте, эта конструкция создает неоднородные по высоте электромагнитные силы. Эти силы приводят к дополнительному вихревому движению жидкого металла и движению его в вертикальной плоскости. Кроме того, движение в вертикальной плоскости возникает также и за счет вращения жидкого металла и трения его о дно (о фронт кристаллизации, рис. 2).

4. Перемешиватель с двухфазным индуктором вращающегося поля и наклонными полюсами (рис. 1). Данная конструкция также имеет значительно меньшие габариты, чем перемешиватели с двумя индукторами. Обычный индуктор вращающегося поля возбуждает в

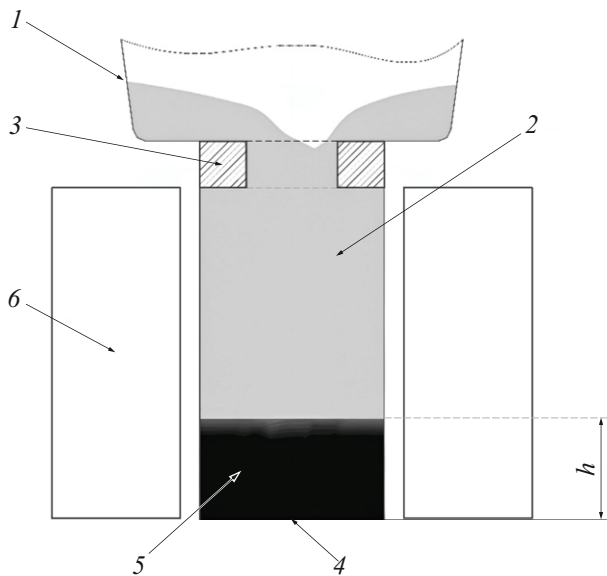


Рис. 2. Модель теплого верха в МГД-перемешивателе. 1 — жидкий алюминий в приемной воронке, 2 — жидкий алюминий в теплом верхе (серый цвет), 3 — перегородка с центральным отверстием, 4 — дно (условный фронт кристаллизации), 5 — слой внесенной пассивной примеси (черный цвет), 6 — МГД-перемешиватель; h — высота условного придонного слоя.

основном тороидальное течение жидкого металла, поэтому вертикальные скорости, возникающие вследствие неоднородности магнитного поля по высоте объема теплого верха и вследствие трения жидкого металла о фронт кристаллизации, обладают малой интенсивностью. Для создания дополнительных вертикальных сил (усиливающих вертикальные и вследствие этого радиальные течения) и улучшающих распространение примеси, полюса сердечника вращающегося поля наклонены относительно вертикальной оси перемешиваемого объема металла [7].

Эти вертикальные и радиальные течения, совместно с вращением металла, способствуют распространению примеси в его объеме. Стоит отметить, что примесь в результате перемешивания по всему объему жидкого металла в слиток поступает из слоя жидкого металла, непосредственно граничащего с фронтом его кристаллизации, и на однородность распределения примеси в слитке должна влиять однородность распределения примеси в этом слое. По этой причине эффективность работы перемешивателей по равномерному распространению примеси в слитке в настоящей работе оценивается не только по коэффициенту неоднородности распределения примеси во всем объеме жидкого металла (коэффициент 1) [8], но и, в первую очередь, по коэффициенту неоднородности распространения примеси (коэффициент 2) в слое жидкого металла над фронтом кристаллизации. Для определенности толщину этого слоя h будем считать равной половине радиуса теплого верха

$h = R/2$ (рис. 2):

$$I_C(t) = \sqrt{\frac{\{\sum_i^N V_i (\langle C \rangle - C_i)^2\}_{t=t}}{\{\sum_i^N V_i (\langle C \rangle - C_i)^2\}_{t=0}}}, \quad (1)$$

$$I_{Ch}(t) = \sqrt{\frac{\{\sum_i^N V_i (\langle C \rangle - C_i)^2\}_{t=t}}{V \langle C \rangle^2 + \xi}}, \quad (2)$$

$$\langle C \rangle = \frac{1}{V} \int_V C_i dV. \quad (3)$$

Здесь I_C — коэффициент неоднородности концентрации примеси по всему объему, I_{Ch} — коэффициент неоднородности концентрации примеси по объему слоя толщиной h над фронтом кристаллизации, C — концентрация пассивной примеси, N — число ячеек расчетной сетки, t — время наблюдения, ξ — малое по величине число, формально добавляемое в знаменатель для исключения ошибки деления на 0 в начальный момент времени.

Следует отметить, что коэффициент неоднородности K_5 , вычисляемый по формуле, представленной ниже и приведенной в работе [9], как лучший для описания неоднородности распределения примеси, в силу того, что линейное отклонение от средней концентрации в различных точках объем может менять знак, не может адекватно отражать однородность распределения примеси в объеме:

$$K_5 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \langle C \rangle) V_i}{2 \langle C \rangle V}.$$

Так, например, в некоторых случаях этот коэффициент может быть равен 0, в то время как примесь будет распределена в объеме очень неоднородно. По этой причине анализ неоднородности распределения примеси в теплом верхе в настоящей работе проводится по коэффициентам (1) и (2), приведенным выше и являющимися, по сути, среднеквадратичными отклонениями от концентрации после идеального перемешивания.

1. Расчетная модель

В настоящей работе численно исследовались гидродинамические процессы и процессы распространения примеси в жидком металле под действием МГД-перемешивателей различных конструкций в теплом верхе кристаллизатора машины непрерывного литья. При этом теплый верх представлялся в виде цилиндра с жидким металлом, дно которого является фронтом кристаллизации. Сверху теплый верх перекрыт перегородкой с отверстием в центре. Над перегородкой располагается приемная воронка (рис. 2). Перегородка уменьшает перенос момента импульса (вращения) от основной массы металла в теплом верхе к металлу в приемной воронке и тем самым позволяет раскручивать металл в теплом верхе до более высоких скоростей без его выплескивания из приемной воронки [10].

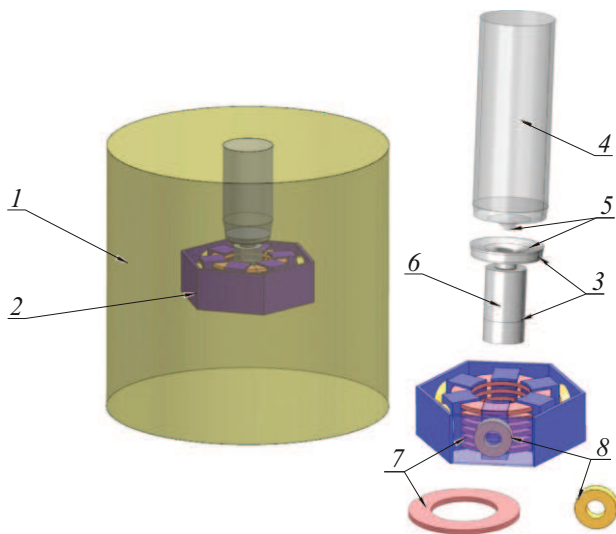


Рис. 3. Расчетная модель МГД-перемешивателя. 1 — вспомогательный объем, 2 — МГД-перемешиватель, 3 — стенки, 4 — домен воздуха, в котором ранее моделировалось течение воздуха, 5 — свободная поверхность металла, 6 — домен жидкого металла, 7 — катушка индуктора бегущего поля, 8 — катушка индуктора вращающегося поля [11].

Расчетная модель подобна [11]. Она представляет собой (рис. 3) индуктор соответствующей конструкции, помещенный во внешний цилиндр воздушного объема. Внутри индуктора находится домен жидкого алюминия, представляющий собой занимаемый металлом объем теплового верха.

От верхней части домена жидкого алюминия до границы расчетной области располагается цилиндрический объем, служащий частью, в которой ранее решались уравнения течения воздуха в работе [11] при определении свободной поверхности раздела фаз. В настоящей работе рассматривается домен жидкого металла с определенной формой свободной поверхности [11].

В качестве примера на рис. 3 приведен трехфазный МГД-перемешиватель с индукторами вращающегося и бегущего магнитных полей. Катушки индукторов рассматриваются в виде цилиндров без разрешения отдельных витков.

2. Постановка задачи

На рис. 2 видно, что при работе МГД-перемешивателя на поверхности, разделяющей жидкий металл (серый цвет) и воздух (белый цвет) в теплом верхе, имеется воронка.

Моделирование процесса распространения пассивной примеси в объеме жидкого металла выполнялось в три этапа. На первом этапе решалась электродинамическая задача в низкочастотном приближении, результатом которой являлось поле электромагнитных сил в объеме

жидкого металла. На втором этапе решалась стационарная гидродинамическая задача и находилось поле скорости в жидком металле под действием электромагнитных сил, возбуждаемых перемешивателем рассматриваемой конструкции [11]. На третьем этапе решалась задача о распространении пассивной примеси под действием конвективного и диффузионного механизмов переноса вещества, при этом использовалось ранее рассчитанное стационарное поле скорости.

2.1. Электромагнитные силы

На данном этапе решается система уравнений Максвелла в стационарном низкочастотном и электродинамическом (без учета влияния движения металла на магнитное поле) приближении (4) во всей расчетной области ([11,12]):

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -i\omega\mathbf{A} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \\ \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0\mu_r\mathbf{H},$$

где \mathbf{A} — векторный потенциал магнитного поля, \mathbf{H} — вектор напряженности магнитного поля, \mathbf{J} — вектор плотности тока, \mathbf{B} — вектор магнитной индукции магнитного поля, \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля, i — мнимая единица; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, μ_r — относительная магнитная проницаемость материала.

Работа всех выбранных нами конструкций рассматривалась при равной величине модуля индукции результирующего магнитного поля в центральной области объема перемешиваемого металла (равенство модулей магнитного поля показывает, что энергия магнитного поля в этой области рассматриваемых устройств приблизительно одинакова). Граничные условия и настройки решателя выбраны такими же, как в работах [11,12].

2.2. Стационарный расчет течения жидкого металла

Анализ графика зависимости кинетической энергии от времени перемешивания при выполнении нестационарного расчета течений жидкого металла (рис. 4) показывает, что спустя 20s с начала перемешивания кинетическая энергия течения в теплом верхе выходит на стационарное значение. Это позволяет допустить, что поле скорости может быть найдено с помощью решения стационарной задачи без больших вычислительных затрат, поэтому в настоящей работе решалась стационарная задача по определению поля скоростей в объеме жидкого металла в теплом верхе кристаллизатора с формой поверхности в приемной воронке, найденной из

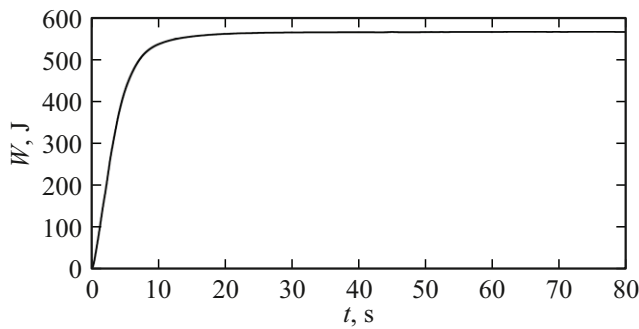


Рис. 4. Зависимость кинетической энергии течения жидкого металла от времени перемешивания.

решения нестационарной задачи [11]. На данном этапе выполняется расчет установившегося течения жидкости путем решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса для многокомпонентной смеси с $k-\varepsilon$ -Realizable моделью турбулентности в поле силы тяжести (6) в нестационарной постановке [12]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} &= \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + \rho\mathbf{g}, \\ \rho \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \quad \mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \\ \mathbf{K} &= (\eta + \eta_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T), \\ \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k &= \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho\varepsilon, \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\varepsilon &= \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \rho s \varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}, \\ C_1 &= \max \left\{ 0, 43; \frac{\xi}{\xi + 5} \right\}, \quad \xi = \frac{sk}{\varepsilon}, \\ s &= \sqrt{2\mathbf{s} : \mathbf{s}}, \quad \mathbf{s} = \frac{1}{2}[\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T], \\ \eta_T &= \rho C_\eta \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\eta = \frac{1}{A_0 + A_s U^{(*)} \frac{k}{\varepsilon}}, \\ A_s &= \sqrt{6} \cos \left[\frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6}W) \right], \\ W &= \frac{2\sqrt{2}\mathbf{s} : (\mathbf{s} \cdot \mathbf{s})}{|\mathbf{s}|^3}, \quad U^{(*)} = \sqrt{\mathbf{s} : \mathbf{s} + \mathbf{\Omega} : \mathbf{\Omega}}, \\ \mathbf{\Omega} &= \frac{1}{2}[\nabla\mathbf{u} - (\nabla\mathbf{u})^T], \\ P_k &= \eta_T[\nabla\mathbf{u} : (\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)], \end{aligned} \tag{6}$$

где ρ — плотность жидкости; \mathbf{u} — вектор скорости жидкости; p — давление жидкости; \mathbf{I} — единичный тензор; \mathbf{K} — тензор вязких напряжений; \mathbf{F} — вектор объемной электромагнитной силы; \mathbf{g} — вектор ускорения свободного падения; \mathbf{J} — вектор плотности

электрического тока; \mathbf{B} — вектор индукции магнитного поля; η — коэффициент динамической вязкости; η_T — турбулентная динамическая вязкость; $(\nabla\mathbf{u})^T$ — транспонированный градиент скорости; k — кинетическая энергия турбулентности; ε — скорость диссипации турбулентной энергии; P_k — коэффициент генерации турбулентных вихрей за счет градиента скорости; σ_k — турбулентное число Прандтля для k ; σ_ε — турбулентное число Прандтля для ε ; C_1, C_2, C_η — эмпирические константы; символ „:“ в данном случае означает двойное скалярное произведение тензоров; все производные по времени ввиду стационарной постановки обнуляются; s — инвариант скорости деформации; ? — эмпирическая константа, используемая для вычисления коэффициента турбулентной вязкости (обычно принимается 0.09); $\mathbf{\Omega}$ — тензор вращения; $U^{(*)}, W$ — вспомогательные переменные; A_s, A_0 — безразмерные константы модели турбулентности; уравнения приведены в нестационарном виде, в данном случае для расчета установившегося течения, производные по времени обнуляются, как и в работе [12].

2.3. Нестационарный расчет перемешивания пассивной примеси

По полученному ранее полю скорости турбулентного течения производится нестационарный расчет конвективного и диффузионного переноса пассивной примеси для временной оценки степени неоднородности перемешивания. Пассивная примесь в настоящей работе в начальный момент времени располагалась в нижней части рассматриваемого домена жидкого алюминия (рис. 2) и представляла собой отдельный домен со свойствами жидкого алюминия.

В рамках примененной в COMSOL Multiphysics v6.2 модели перемешивания для рассматриваемого случая (решается уравнение переноса и диффузии пассивной примеси (7)) задается конвективная и диффузионная составляющая переноса жидкой среды. Для нахождения конвективной составляющей используется поле скорости турбулентного течения, рассчитанного на предыдущем шаге. В качестве диффузионной составляющей используется полученное распределение коэффициента турбулентной диффузии в объеме. Стоит отметить, что для работы в пакете COMSOL необходимо задать коэффициент молекулярной диффузии, который в рамках поставленной задачи принимается близким к нулю. Это допустимо сделать, так как конвективный перенос примеси в нашем случае значительно превосходит диффузионный ($Pe \sim 100$) [13]. Для исключения численных ошибок при сохранении достоверности полученных результатов данный коэффициент задается пренебрежимо малой величиной, которая близка к нулю, но все же отлична от него.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_i + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = R_i,$$

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_i &= \mathbf{J}_{T,i}, \\ \mathbf{J}_{T,i} &= -D_{T,i} \nabla c_i, \\ D_{T,i} &= \frac{\nu_T}{Sc_T}, \end{aligned} \quad (7)$$

где R_i — источник вещества от химических реакций (равен нулю); \mathbf{u} — вектор скорости; \mathbf{J}_i — диффузионный поток массы; $\mathbf{J}_{T,i}$ — диффузионный поток массы за счет турбулентной диффузии; концентрация пассивной примеси; Sc_T — турбулентное число Шмидта (в COMSOL принимается равным 0.7 для большинства задач); ν_T — турбулентная кинематическая вязкость; $D_{T,i}$ — коэффициент турбулентной диффузии.

3. Результаты

Расчеты выполнены на сеточной модели с 1 млн. элементов в домене жидкого металла, что соответствует точности решения гидродинамической задачи порядка 4% (см. таблицу).

На рис. 5 представлены графики зависимостей коэффициента неравномерности распределения пассивной примеси IC_h в объеме придонного слоя высотой h , определяемый формулой (2).

Анализ кривых на рис. 5 показывает, что распределение внесенной пассивной примеси в объеме металла при

Сеточная сходимость гидродинамического расчета

Количество элементов сетки	Ошибка (%)
110 000	34.8
220 000	29.7
400 000	29.5
800 000	15.4
1 000 000	4.1

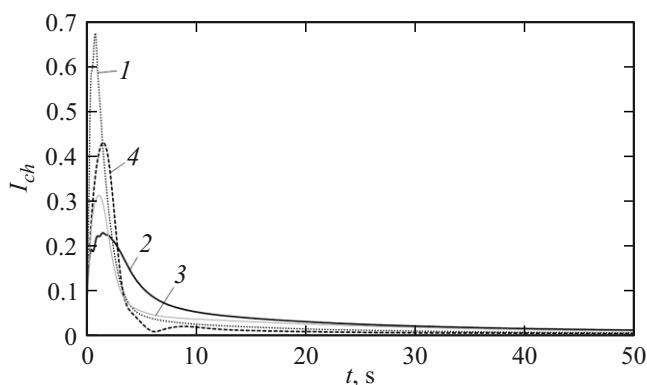


Рис. 5. Зависимости коэффициентов неравномерности распределения пассивной примеси IC_h от времени перемешивания в придонном слое высотой h . Кривая 1 — перемешиватель 1; кривая 2 — перемешиватель 2; кривая 3 — перемешиватель 3; кривая 4 — перемешиватель 4.

воздействии на него МГД-перемешивателями рассматриваемых конструкций с течением времени происходит подобным образом. Следует отметить, что в реальном технологическом процессе весь металл, находящийся в теплом верхе, перемещается в непрерывный слиток путем его затвердевания в кристаллизаторе (за пределами нижней части теплого верха) за время порядка сотни секунд [14]. Посторонняя примесь может переноситься к фронту кристаллизации вертикальным течением гораздо быстрее (до десятка секунд). По этой причине быстрое перемешивание примеси в металле до однородного состояния в придонном слое является важным фактором. Из рис. 5 видно, что кривая 4 идет „круче“ остальных, что говорит о том, что в начальный момент времени работы (вплоть до 40 s) перемешиватель 4 интенсивнее и более однородно распределяет пассивную примесь в придонном слое. Этот эффект можно видеть на рис. 6, на котором представлены изображения распределения в жидком алюминии пассивной примеси с течением времени в теплом верхе при воздействии на металл МГД-перемешивателей рассматриваемых нами конструкций.

Из рис. 5 и 7 видно, что наиболее эффективно распределяет примесь в придонном слое МГД-перемешиватель 4, создающий наиболее равномерно распределенное поле завихренности течения (рис. 7). Это может быть объяснено тем, что более распределенное поле завихренности говорит о более сильной конвективной составляющей переноса массы путем вовлечения в интенсивную крупномасштабную вихревую структуру большего объема металла. Другими словами, полоидальное течение распространяется на больший объем металла, а не концентрируется только вблизи стенок.

Это возможно объяснить тем, что вихрь полоидального течения металла, создаваемый этим перемешивателем, более симметричен относительно центральной оси и занимает почти весь объем по высоте теплого верха, в отличие от течения, создаваемого первыми двумя перемешивателями. Крупномасштабное течение, генерируемое четвертым перемешивателем, быстро переносит примесь по высоте объема теплого верха, после чего равномерно заполняет весь его объем, что подтверждается анализом линий тока в рассматриваемом объеме жидкого металла (рис. 8).

Первые два перемешивателя, в отличие от третьего и четвертого, создают в верхней и нижней частях объема металла хоть и интенсивные, но отдельные вихревые структуры, не обладающие осевой симметрией. Такое течение затрудняет быстрый перенос примеси из одной части объема теплого верха в другую. С течением времени примесь все же проникает в нижнюю его часть и доминирующие вихревые движения равномерно распределяют ее по объему (при этом на начальном отрезке времени скорость распределения примеси в придонном слое теплого верха в перемешивателе 1 выше, чем в перемешивателе 2).

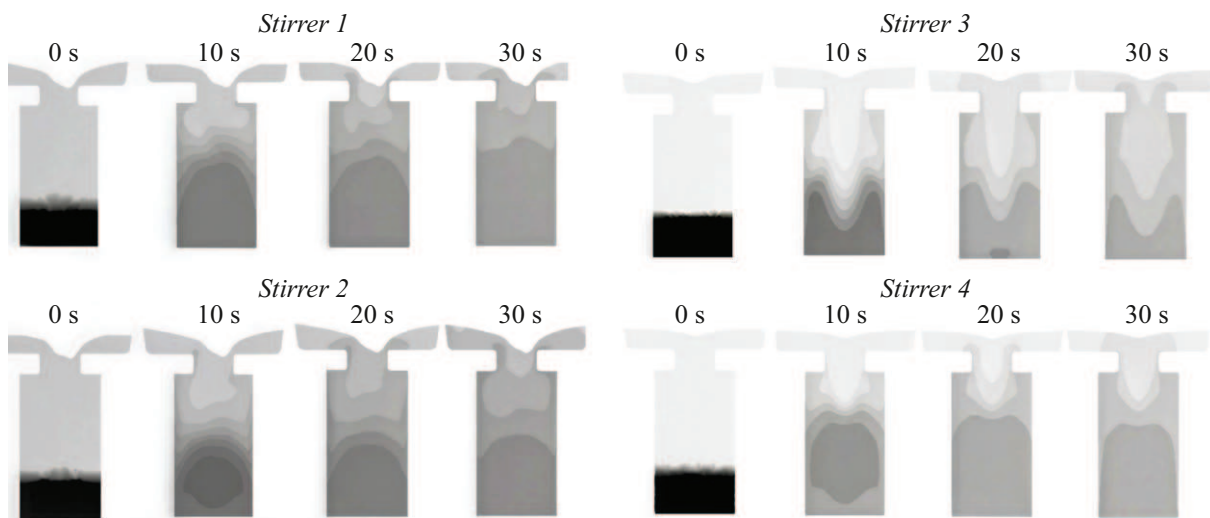


Рис. 6. Картина распределения пассивной примеси в рассматриваемых конструкциях в различные промежутки времени.

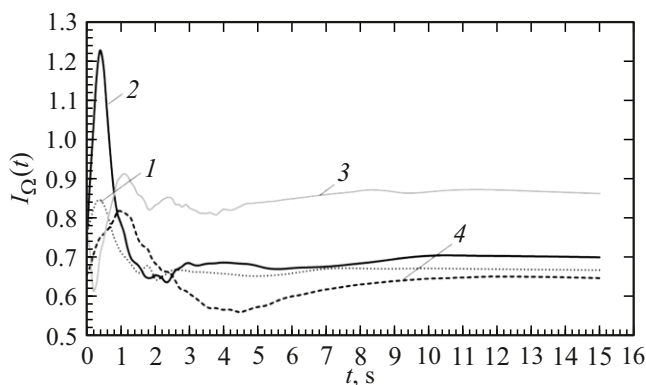


Рис. 7. Зависимость неравномерности полного ротора скорости жидкого металла от времени перемешивания. Кривая 1 — перемешиватель 1; кривая 2 — перемешиватель 2; кривая 3 — перемешиватель 3; кривая 4 — перемешиватель 4 [11].

Перемешиватель 3 создает два относительно равных полоидальных вихря, расположенных один над другим симметрично относительно центральной оси (меньшие, чем вихревые структуры, создаваемые перемешивателем 4). Интенсивность их несколько ниже, чем в случае перемешивателя 4, поэтому кривая 3 эволюции неоднородности распределения примеси более пологая, чем кривые 4 и 1 (рис. 5).

Еще одним критерием оценки качества перемешивания является неравномерность распределения примеси во всем объеме цилиндра (теплого верха), а не только в придонном слое. Чем меньше коэффициент неравномерности (формула (1)), тем выше однородность концентрации в перемешиваемом объеме. На рис. 9 показан график зависимости неравномерности распределения пассивной примеси во всем объеме жидкого металла от времени перемешивания при работе рассматриваемых конструкций перемешивателей.

На рис. 9 видно, что неравномерность концентрации при работе перемешивателя 4 в начальный момент времени резко уменьшается и становится ниже, чем у других перемешивателей, но после 20 s неравномерность распределения концентрации примеси во всем объеме металла в теплом верхе падает уже не так быстро, как при работе других конструкций. В дальнейшем неоднородность концентрации примеси в объеме продолжает медленно падать, но остается несколько выше, чем в случае других перемешивателей. В то же время МГД-перемешиватель 4 создает более однородное распределение общей завихренности в перемешиваемом объеме, чем другие.

Двунаправленный трехфазный перемешиватель 1 на начальном участке снижает коэффициент неоднородности концентрации примеси несколько медленнее, чем перемешиватель 4, но быстрее, чем перемешиватели 2 и 3; впоследствии, после 20 s, неоднородность распределения концентрации при его работе падает быстрее, чем у перемешивателя 4, но медленнее, чем у перемешивателя 1, и впоследствии скорость падения неоднородности концентрации у него сравнивается со скоростью перемешивателя 2. При этом неоднородности распределения концентрации в случае с перемешивателями 1 и 2 с течением времени сближаются и остаются ниже, чем у перемешивателя 3, но выше, чем у перемешивателя 4.

Заключение

В слое над фронтом кристаллизации, который, по сути, и определяет качество однородности распределения примеси в слитке, перемешивание пассивной примеси (на начальном участке вплоть до 40 s) наилучшим образом обеспечивает перемешиватель 4 с двухфазным индуктором вращающегося поля и наклонными полюсами. Следующим по качеству перемешивания идет трех-

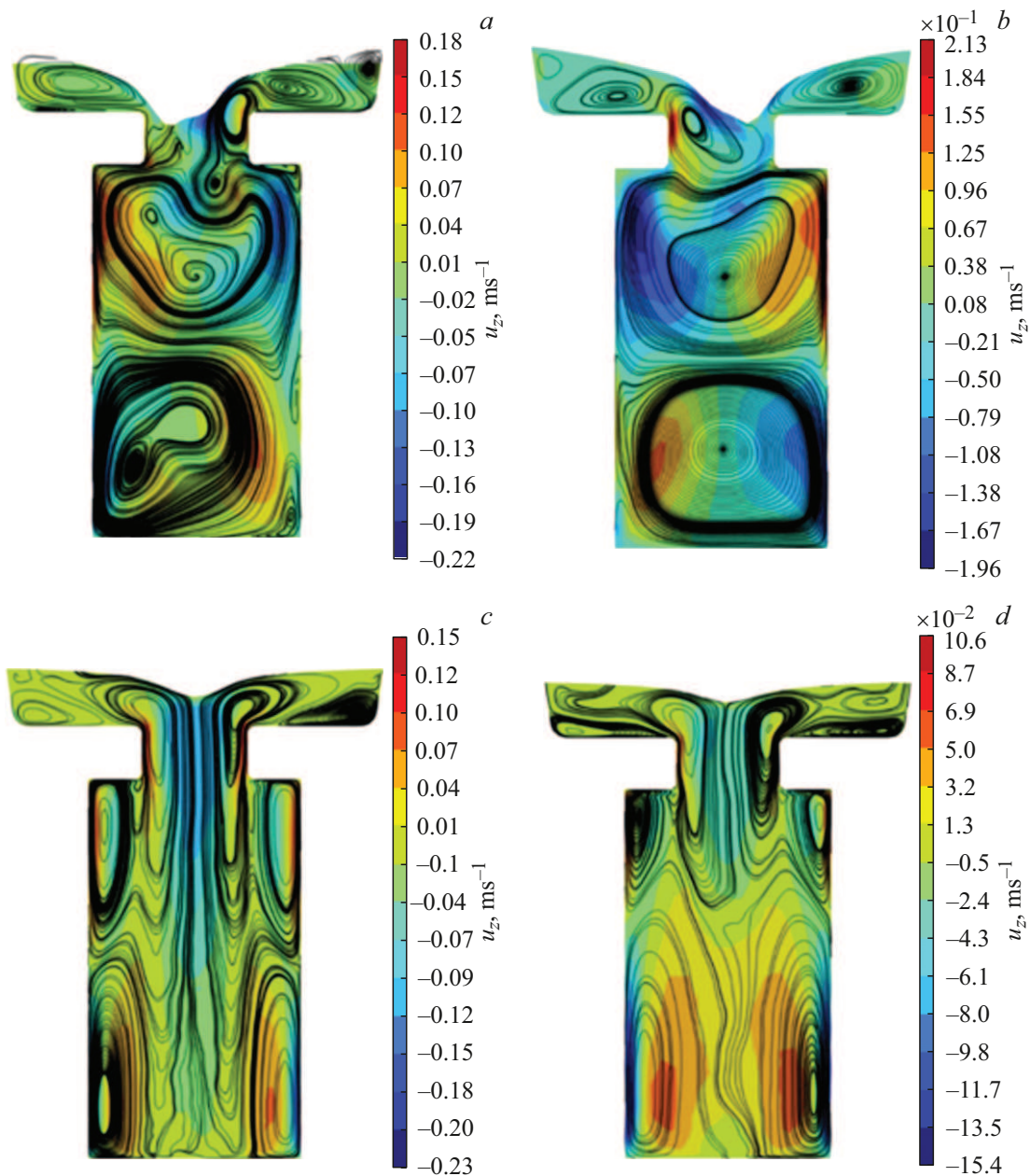


Рис. 8. Линии тока в рассматриваемом течении, возбуждаемом исследованными конструкциями МГД-перемешивателей в теплом верхе кристаллизатора непрерывного литья; *a* — перемешиватель 1; *b* — перемешиватель 2; *c* — перемешиватель 3; *d* — перемешиватель 4.

фазный перемешиватель 1 с трехфазными индукторами бегущего и вращающегося магнитного поля (рис. 5), затем перемешиватель 3, имеющий только один двухфазный индуктор вращающегося магнитного поля, и после него — перемешиватель 2 с двухфазными индукторами бегущего и вращающегося магнитных полей. В дальнейшем после 40 с перемешивания однородность распределения примеси во всех четырех случаях стремится к одному значению (рис. 1, 5). Однако следует заметить, что, хотя другие перемешиватели 2 и 3 проигрывают перемешивателям 4 и 1 (рис. 1) по качеству перемешивания в начальный отрезок времени, в случае, когда

необходим малый размер конструкции, они могут также с успехом использоваться.

Стоит также отметить, что перемешиватель 4, обеспечивающий наиболее однородное поле концентрации в придонном слое на начальном промежутке времени, создает в жидком металле поле скорости с самой низкой неоднородностью завихренности. Трехфазный перемешиватель 1 (в отличие от перемешивателя 4) создает поле скорости с менее высокой равномерностью распределения завихренности и обеспечивает худшее (в сравнении с перемешивателем 4) распределение примеси в придонном слое.

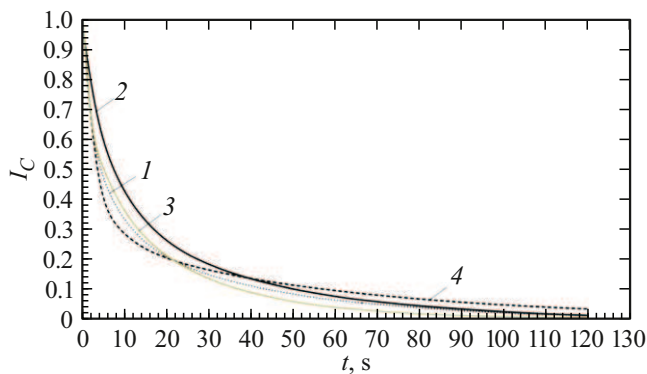


Рис. 9. Зависимости коэффициентов неравномерности распределения пассивной примеси I_c от времени перемешивания во всем рассматриваемом объеме металла. Кривая 1 — перемешиватель 1; кривая 2 — перемешиватель 2; кривая 3 — перемешиватель 3; кривая 4 — перемешиватель 4.

Финансирование работы

Работа выполнена в соответствии с госбюджетным планом ИМСС УрО РАН Крупномасштабные течения и теплообмен в проводящей и непроводящей жидкости в условиях мелкомасштабной турбулентности (госзадание № 124012300246-9).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.G. Borisov. *Light Alloy Technol.*, **2**, 48 (2016).
- [2] В.Г. Борисов. *Технология легких сплавов*, **2**, 71 (2016).
- [3] М.В. Первухин, М.Ю. Кучинский, С.П. Тимофеев. *J. Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, **12** (8), 952 (2019).
- [4] X. Zhang, Y. Wang, D. Liu, Z. Ji, H. Xu, M. Hu, P. Cui. *J. Crystal Growth*, **543**, 125704 (2020).
- [5] М.Ю. Кучинский, М.В. Первухин, Э.Р. Винтер, С.П. Тимофеев. *Вопросы электротехнологии*, **4**, 13 (2021).
- [6] С.Ю. Хрипченко, Е.Ю. Тонков. *ЖТФ*, **95** (8), 1489 (2025).
- [7] С.Ю. Хрипченко, Е.Ю. Тонков, В.Г. Борисов. *Устройство для перемешивания электропроводных жидких сред* (Патент РФ №2843372, в Госреестре изобретений с 14.07.2025)
- [8] П.А. Оборин, С.Ю. Хрипченко. *Вычислительная механика сплошных сред*, **6** (2), 207 (2013).
- [9] А.Л. Кухарев. *Металлургия. Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве*, **8** (82), 27 (2025).
- [10] Заявка на патент от 19.12.2025, входящий W25084446, регистрационный №2025137093.
- [11] С.Ю. Хрипченко, Е.Ю. Тонков. *ЖТФ*, **96** (6), 1112 (2026).
- [12] S.Yu. Khripchenko, E.Yu. Tonkov. *Bulletin RAS: Physics*, **89** (1), S41 (2025). DOI: 10.1134/S1062873825713820.

- [13] Ш.Х. Зарипов, Р.Ф. Марданов, А.К. Гильфанов, В.Ф. Шарафутдинов, Т.В. Никоненкова. *Математические модели переноса загрязнений в окружающей среде* (Казанский ун-т, Казань, 2018)
- [14] Р.К. Мысик, Ю.Н. Логинов, А.В. Сулицин, С.В. Брусицын. *Производство литых заготовок из деформируемых алюминиевых и медных сплавов* (УрФУ, Екатеринбург, 2011)