01

МГД-перемешиватели для машин непрерывного литья цилиндрических слитков

© 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 13 января 2025 г.
В окончательной редакции 19 марта 2025 г.
Принято к публикации 25 марта 2025 г.

Рассмотрена принципиально новая схема индуктора вращающегося магнитного поля с наклонными полюсами сердечников, использование которой поможет существенно сократить габариты МГД-перемешивателя, что позволит размещать их совместно с кристаллизаторами в достаточном количестве на одном литейном столе и снизить затраты на производство алюминиевых цилиндрических слитков для прессования.

Ключевые слова: МГД-перемешиватель, индуктор бегущего магнитного поля, индуктор вращающегося магнитного поля, тороидальное течение, полоидальное течение, COMSOL Multihpysics, наклонные полюса.

DOI: 10.21883/0000000000

Введение

Алюминиевые сплавы обладают высокой удельной прочностью и комплексом механических, эксплуатационных и специальных свойств, что имеет существенное значение для автомобильной, авиационной и космической техники [1]. Во время производства круглых слитков из упомянутых материалов в кристаллизаторе машины непрерывного литья на фронте кристаллизации жидкого металла образуется дендритная структура, что предопределяет низкие пластические свойства получаемых слитков [1–3]. Для улучшения свойств сплавов при непрерывном литье над кристаллизаторами машины непрерывного литья устанавливают так называемый „теплый верх“. „Теплый верх“ (куда из печи подается жидкий металл) охватывает индуктор МГД-перемешивателя, который осуществляет перемешивание жидкого металла в объеме. Сам кристаллизатор находится внизу „теплого верха“, где перемешиваемый металл затвердевает и вытягивается в слиток.

При генерации в „теплом верхе“ азимутального (тороидального) и меридионального (полоидального) течения жидкого алюминия или его сплавов происходит воздействие на формирование структуры и распределение примесей в объеме кристаллизующегося слитка [4,5]. Тороидальное течение непосредственно влияет на формирование мелкозернистой структуры слитка. Это течение у фронта кристаллизации (находящегося внизу „теплого верха“ у верхней кромки кристаллизатора) не дает образовываться дендритам, размывая их при формировании и создавая много мелких центров кристаллизации. Полоидальное же течение в основном обеспечивает тепломассоперенос, что воздействует на форму фронта кристаллизации, и распределение примеси по объему слитка.

Как показывают эксперименты, в жидких металлах конвективный теплоперенос существенно превосходит молекулярный [6]. По этой причине наличие полоидального течения усиливает перенос тепла от верхней части объема теплого верха кристаллизатора, куда непрерывно поступает жидкий алюминий, к фронту кристаллизации слитка. При этом, регулируя интенсивность течения и меняя его направление, можно эффективно влиять на геометрию фронта кристаллизации [7]. Необходимо отметить, что возбуждаемое совместно с полоидальным тороидальное течение значительно снижает перенос тепла полоидальным течением [7].

При возбуждении только тороидального течения в цилиндре жидкого металла в стационарном режиме в объеме „теплого верха“ устанавливается так называемое „твердотельное“ вращение, отличие от которого будет наблюдаться в небольшом пограничном слое у боковых стенок (рис. 1) и у фронта кристаллизации, что затрудняет равномерное распределение по объему различных компонентов сплава, примесей и включений. Ситуацию можно исправить, если турбулизовать весь объем „теплого верха“ следующими способами: организовать реверсный режим тороидального течения; осуществить прерывистый режим вращения; возбуждать совместно полоидальное и тороидальное течение в перемешиваемом объеме [8–10].

Проведение так называемого двунаправленного перемешивания, при котором дополнительно к тороидальному возбуждается еще и полоидальное течение, позволяет не только улучшить распределение примесей и компонентов сплава в объеме металла, но и активно влиять на форму фронта кристаллизации в процессе получения слитка. Недостатком данного способа является то, что при одновременном действии вращающегося и бегущего магнитных полей возникает их перекрестное взаимо-

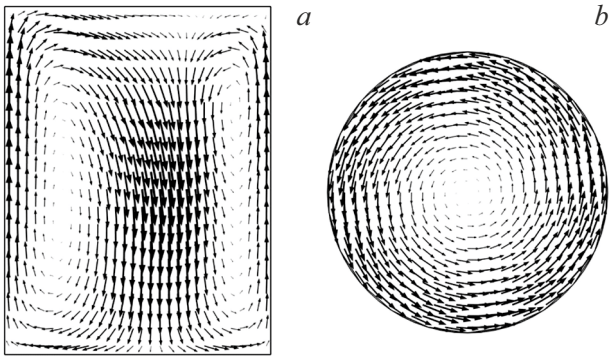

Рис. 1. Характер течения, возбуждаемый бегущим (a) и вращающимся (b) магнитными полями (численный расчет).

действие, что приводит к асимметрии результирующего течения [11].

Исправить эту ситуацию можно либо питанием индукторов токами, частота которых сильно различается [11], либо организовать попеременное во времени воздействие на металл этих полей, что проще конструктивно и энергетически выгоднее [7].

Наличие в таких перемешивателях двух индукторов бегущего и вращающегося магнитного поля увеличивает их габаритные размеры, что затрудняет размещение на одном разливочном столе машины непрерывного литья необходимого количества кристаллизаторов. По этой причине исследование различных конструкций МГД-перемешивателей, создающих в „теплом верхе“ кристаллизаторов полоидальное и тороидальное перемешивание, является актуальной задачей, что подтверждается интенсификацией исследований в этом направлении в индустриально развитых странах.

1. Исходный вариант

В качестве исходного варианта выбрана конструкция, схема которой эквивалентна МГД-перемешивателю, имеющему два трехфазных индуктора вращающегося и бегущего магнитного поля. Данная конфигурация прошла апробацию на отечественных и зарубежных производственных площадках и показала свою эффективность как при воздействии на структуру непрерывно отливаемых круглых алюминиевых слитков, так и при воздействии на распределение примесей в их объеме [3]. Геометрические размеры исходного варианта представлены на рис. 2, a. В настоящей работе были рассмотрены несколько возможных конструкций индукторов МГД-перемешивателей и произведено сравнение их характеристик с характеристиками выбранного в качестве исходного варианта трехфазного МГД-перемешивателя.

Внутри рабочего объема перемешивателя располагается проводящий цилиндр (моделирующий „теплый верх“ кристаллизатора с жидким алюминием) диаметром 200 mm и высотой, равной высоте рабочего объема (рис. 2, a). Электрическая проводимость цилиндра равна проводимости жидкого алюминия ($\sigma = 4.2 \cdot 10^6\,\Omega^{-1}\,\mathrm{m}^{-1}$).

2. Двухфазные индукторы бегущего и вращающегося магнитного поля

Для повышения эффективности литейного производства возникает необходимость использования нескольких компактно расположенных перемешивателей, объединенных индукторами в единую систему. Применение двухфазного индуктора бегущего магнитного поля позволяет снизить высоту МГД-перемешивателя [12,13]. Двухфазная схема питания позволяет объединять сердечники индукторов вращающегося магнитного поля соседних МГД-перемешивателей и тем самым более компактно располагать их на литейном столе машины непрерывного литья [14]. По этой причине встает вопрос о сравнении эффективности рассматриваемого МГД-перемешивателя с двухфазной (рис. 2, b) и трехфазной (рис. 2, a) схемами питания.

Причиной тороидального вращения перемешиваемого жидкого металла является момент электромагнитных сил, создаваемый индуктором вращающегося магнитного поля перемешивателя, а причиной полоидального движения металла служит вихревой характер вертикальной компоненты электромагнитных сил, создаваемых индуктором бегущего поля МГД-перемешивателя.

3. Сравнение трехфазного индуктора бегущего поля с двухфазным индуктором

На рис. 3 представлены упрощенные компоновки трехфазного и двухфазного индукторов бегущего поля, являющиеся расчетными моделями.

Сравнение эффективности данных конструкций производилось по среднеквадратичному (по объему) значению азимутальной составляющей ротора объемной силы $\mathbf{f}$, имеющей (в качестве упрощения) только вертикальную компоненту $(0,\ 0,\ f_z)$. Здесь и далее ось Z совпадает и направлена вдоль центральной оси проводящего цилиндра из жидкого алюминия; оси X и Y соответственно лежат в плоскости, нормальной оси Z (рис. 3).

Этот критерий сравнения выбран, исходя из того, что полоидальное движение жидкости в замкнутой полости могут вызвать только вихревые силы. Вертикальные силы вызывают вертикальное движение металла, и чем выше завихренность этих сил, тем интенсивнее полоидальное течение. Ввиду вышесказанного, интенсивность завихренности поля скорости качественно определяется среднеквадратичной по объему завихренностью верти-

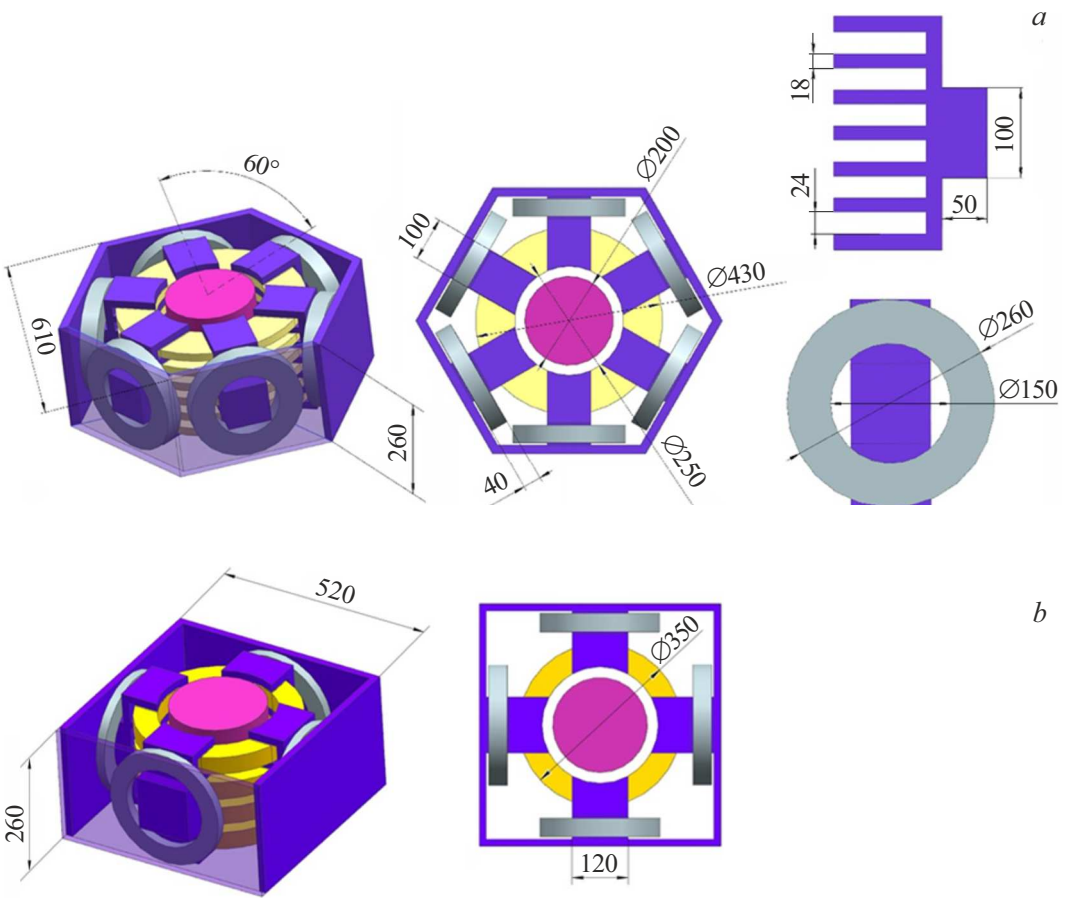

Рис. 2. Компоновка трехфазного (исходного) (*a*) и двухфазного (*b*) варианта МГД-перемешивателя.

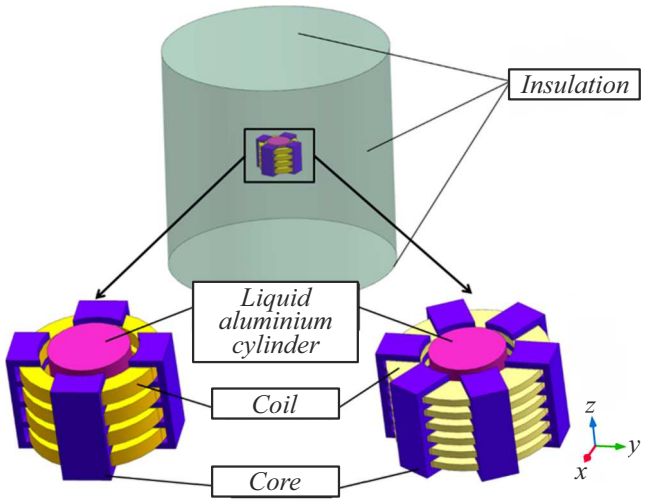

Рис. 3. Расчетная модель МГД-индуктора бегущего поля, включающего в себя полюса с гребенками.

кальной электромагнитной силы

$$\Omega = \left| \sqrt{\frac{1}{V} \int\limits_V \left\{ \left(\frac{\partial f_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_z}{\partial x} \right)^2 \right\} dV} \right|, \qquad (1)$$

где f_z — вертикальная составляющая электромагнитной силы, V — объем „теплого верха“ с жидким алюминием (проводящего цилиндра) в МГД-перемешивателе.

В рамках данного сравнения численный расчет производился в электродинамической постановке без моделирования гидродинамических явлений.

Также важным фактором эффективности перемешивания является распределение локальной завихренности электромагнитных сил в объеме перемешиваемой жидкости.

4. Постановка задачи расчета объемных сил

На рис. 3 представлена упрощенная расчетная модель МГД-перемешивателя бегущего магнитного поля. Она состоит из сердечника, катушек индуктивности, цилиндра жидкого алюминия (моделируется только домен жидкого металла без учета стенок емкости) и внешней области. Численная модель рассматривается только в электродинамической постановке и разрешается в пакете Comsol Multiphysics 6.0 с заданием следующих граничных условий [15–17]:

— во всей расчетной области, кроме катушек индуктивности, решается система уравнений Максвелла в низкочастотной постановке; при этом полагается, что магнитное поле изменяется во времени по гармоническому закону [15]:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -i\omega\mathbf{A}, \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \\ \mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}, \\ \mathrm{div}\mathbf{B} = 0, \end{cases} \tag{2}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0\mu_r\mathbf{H}, \tag{3}$$

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

— на внешней границе расчетной области задается условие „изоляции“ магнитного поля (Magnetic Insulation):

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0,$$

где $\mathbf{n}$ — нормаль к поверхности границы расчетной области.

— отсутствие наведенных вихревых токов в сердечнике рассматриваемой модели определяется путем задания крайне низкой электропроводности материала сердечника (10^{-5} S/m), что не влияет на распределение магнитного поля, но улучшает стабильность решения в отличие от случая с нулевой проводимостью;

— принята гомогенизированная модель расчета катушек [16] с заданием плотности тока без учета геометрии намотанного провода. Расчетный домен представляет собой цилиндр, площадь сечения которого совпадает с площадью сечения обмотки. Плотность тока в катушке определяется путем задания количества витков катушки и амплитудного значения электрического тока в одном витке (4). Ток в катушках изменяется по гармоническому закону с учетом соответствующего фазового угла между соседними катушками (в двух фазном варианте — 90°, в трехфазном — 60°);

$$\mathbf{J_e} = \frac{NI_{coil}}{A}\mathbf{e}_{coil}, \tag{4}$$

где N — число витков катушки, I_{coil} — амплитудное значение тока в одном витке, A — площадь поперечного сечения катушки, $\mathbf{e}_{coil}$ — вектор, указывающий направление течения тока в катушке;

— решение уравнений производилось полностью связанным методом (fully coupled) при котором все дифференциальные уравнения разрешаются в рамках одной итерации с прямым решателем (MUMPS) [17];

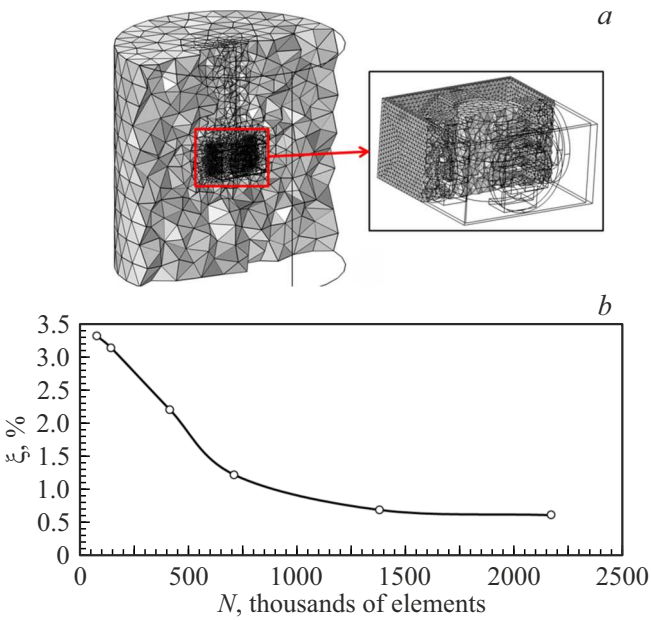

Рис. 4. Сеточная модель двухфазного перемешивателя с индуктором бегущего магнитного поля (a); график сеточной сходимости, на котором представлена зависимость точности расчета электромагнитной силы ξ от количества элементов сеточной модели (b).

— приведенные выше уравнения разрешались в декартовой системе координат, начало которой совпадает с центром цилиндра, а ось z сонаправлена его оси.

На рис. 4, a представлена дискретизация расчетной области на примере перемешивателя с двухфазным индуктором. В настоящей работе проведено исследование сеточной сходимости, график которой представлен на рис. 4, b. При численном моделировании рассматриваемого объекта была принята тетраэдральная сеточная модель с 0.729 млн элементов, что советует точности сеточной сходимости электромагнитной силы порядка 1 % (данная точность соответствует поставленным целям, и в то же время не требует существенных вычислительных мощностей).

5. Результаты численного моделирования трехфазного и двухфазного индукторов бегущего магнитного поля

На рис. 5 представлено распределение индуцируемой электромагнитной силы в вертикальном сечении объема жидкого металла, создаваемой двухфазным и трехфазным индукторами бегущего поля МГД-перемешивателя. Сравнение производилось при максимальном значении магнитного поля 20 mT внутри объема жидкого металла.

На рис. 6 представлено распределение z-компоненты электромагнитной силы на внешней поверхности проводящего цилиндра жидкого металла для случая двух-

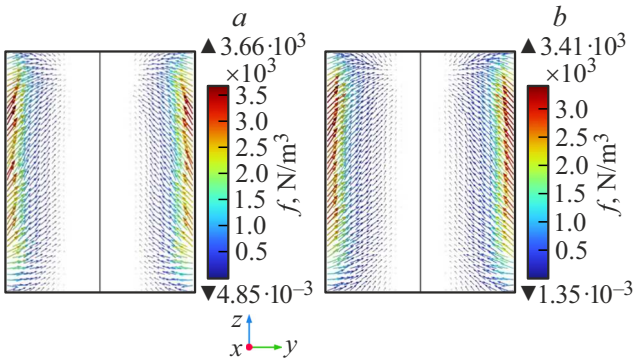

Рис. 5. Распределение объемной силы в сечении слитка жидкого металла двухфазного (*a*) и трехфазного (*b*) перемешивателей.

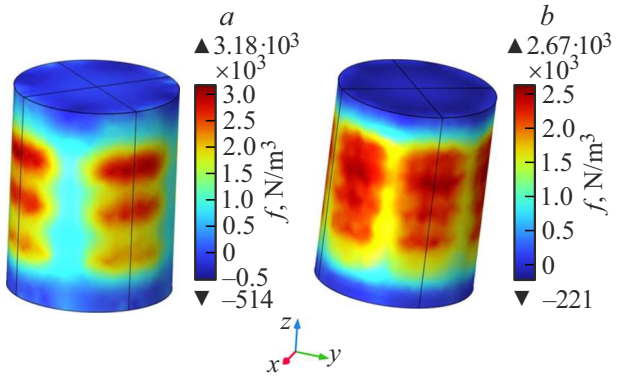

Рис. 6. Распределение вертикальной компоненты объемной силы в объеме слитка жидкого металла при двухфазном (*a*) и трехфазном (*b*) индукторе.

фазного и трехфазного индуктора. Анализируя рис. 5 и 6, можно заметить, что силы, имеющие максимальное значение, генерируются в слитке напротив полюсов индуктора, а ее наибольшее значение достигается в двухфазном индукторе. Распределение силы в трехфазном индукторе, хоть и ниже по максимальному значению, но суммарно по всему объему выше, что объясняется более равномерным распределенным поля сил из-за большего количества полюсов сердечника (см. рис. 6 и таблицу).

Таким образом, с позиции завихренности электромагнитных сил трехфазный индуктор бегущего поля эффективнее двухфазного. В некоторых же случаях применение двухфазных индукторов дает возможность снизить габариты перемешивателя, что позволяет вписаться в необходимые размеры литейной установки, однако это потребует увеличения энергетических затрат. Например, можно усилить величину магнитного поля или произвести усиление завихренности электромагнитных сил, чего можно добиться увеличением частоты питающего электрического тока. При повышении частоты питающего тока уменьшается толщина проникновения переменного магнитного поля в металл, и, следовательно, возрастет неоднородность распределения электромагнитных сил по радиусу от поверхности в глубину жидкого цилиндра, что приведет к возрастанию завихренности сил.

5.1. Сравнение двухфазного индуктора вращающего магнитного поля с трехфазным индуктором

На рис. 7 представлены упрощенные компоновки трехфазного и двухфазного индукторов вращающего поля, являющиеся расчетными моделями.

При возбуждении вращающимся магнитным полем вращательного (тороидального) течения жидкости в цилиндрической полости даже при интенсивном вращении ее завихренность сосредоточена в узком пограничном слое у стенок полости и у фронта кристаллизации металла, в ядре же жидкость вращается подобно твердому телу. Привести течение к азимутальному вращению возможно силами, у которых аксиальная компонента ротора равна нулю. По этой причине сравнение между трехфазным и двухфазным индуктором вращающегося поля можно производить по величине аксиальной компоненты удельного момента объемных электромагнитных сил, создаваемого этими индукторами, определяемого как

$$\mathbf{M} = \mathbf{f} \times \mathbf{r} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ f_x & f_y & f_z \\ r_x & r_y & r_z \end{vmatrix} = (f_y r_z - f_z r_y)\mathbf{i} + (f_z r_x - f_x r_z)\mathbf{j} + (f_x r_y - f_y r_x)\mathbf{k}, \quad (5)$$

где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор, выходящий из центра цилиндра; $\mathbf{f}$ — вектор объемной электромагнитной силы; $\mathbf{M}$ — вектор момента электромагнитных сил в точке; r_x, r_y, r_z, f_x, f_y, f_z — компоненты соответствующих векторов в декартовой системе координат.

Для анализа эффективности перемешивания, обусловленного действием вращающегося магнитного поля, создаваемого рассматриваемыми МГД-перемешивателями, производилось сравнение осредненной по объему компоненты полного момента, обеспечивающего вращение жидкости относительно оси цилиндра (в данной постановке задачи — относительно оси z, которая совпадает с осью цилиндра).

Величина средней по объему z составляющей (вдоль оси цилиндра) момента объемных сил определяется, как

$$\overline{M_z} = \frac{\int\limits_V (f_x r_y - f_y r_x)\,dV}{V}. \quad (6)$$

6. Результаты численного моделирования трехфазного и двухфазного индукторов вращающегося магнитного поля

Постановка задачи в данном случае аналогична постановке задачи для расчета перемешивателя бегущего

Характеристики рассмотренных компоновок МГД-перемешивателей

Параметр	Двухфазный перемешиватель бегущего поля	Трехфазный перемешиватель бегущего поля	Двухфазный перемешиватель вращающего поля	Трехфазный перемешиватель вращающего поля
$B_{\max}, T$	0.0204	0.0204	0.0205	0.0218
$'\Omega$, N/m^4	1430	2940	–	–
$f_z^{\max}$, N/m^3	2850	2540	–	–
$f_\varphi^{\max}$, N/m^3	–	–	4430	4380
$\overline{M_z}$, N/m^2	–	–	16.64	33.5

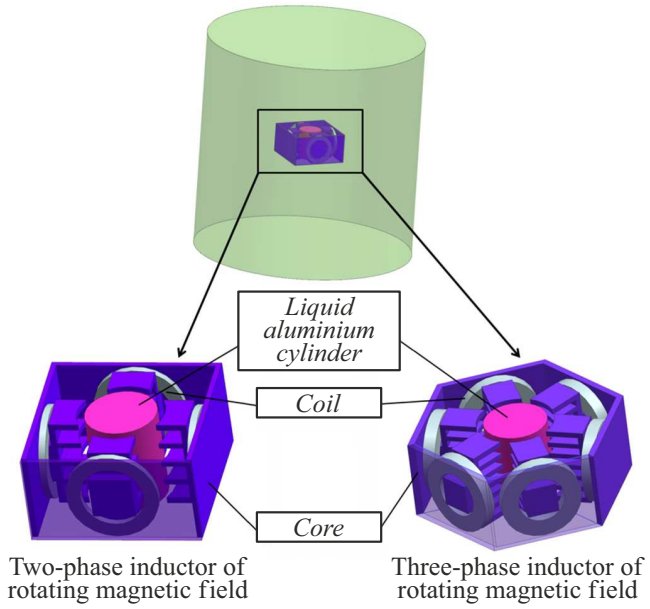

Рис. 7. Расчетная модель индукторов вращающего магнитного поля в декартовой системе координат, которая располагается аналогично указанной на рис. 3 и не приведена на данном рисунке.

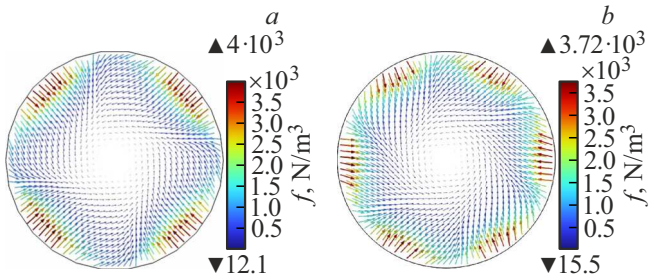

Рис. 8. Распределение электромагнитной объемной силы в сечении цилиндрического объема жидкого металла; *a* — двухфазный индуктор вращающегося поля, *b* — трехфазный индуктор вращающегося поля.

поля, с той лишь разницей, что катушки расположены таким образом, что ось катушки перпендикулярна оси проводящего цилиндра. Оси всех катушек лежат в плоскости центрального горизонтального сечения цилиндра и разнесены по окружности на величину фазового угла (в двухфазном и трехфазном индукторах это соответственно 90° и 60°).

На рис. 8 представлено распределение индуцируемой электромагнитной силы в сечении слитка жидкого металла. Можно заметить, что распределение максимальной силы происходит в узком пограничном слое вблизи стенок цилиндра в случае двухфазного и трехфазного индуктора.

Распределение силы в объеме сконцентрировано в домене жидкого металла напротив сердечников, что означает, что при равном значении максимальной объемной силы удельное значение момента объемных сил в варианте трехфазного индуктора будет выше (см. рис. 9 и таблицу).

Анализ приведенных в таблице результатов показывает, что МГД-перемешиватели, объединяющие индукторы бегущего и вращающегося магнитного поля в трехфазном варианте, обладают лучшими параметрами, чем двухфазные МГД-перемешиватели. Однако в некоторых случаях, когда малые размеры конструкции являются определяющим фактором, уменьшение размеров перемешивателя путем использования двухфазного индуктора

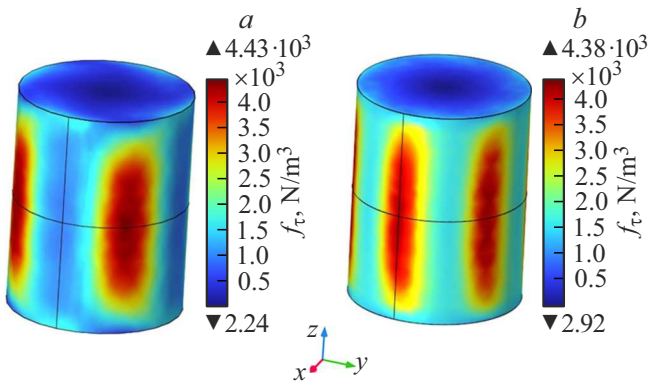

Рис. 9. Распределение азимутальной компоненты объемной силы (f_τ) в жидком металле для двухфазного (*a*) и трехфазного (*b*) индукторов вращающего поля.

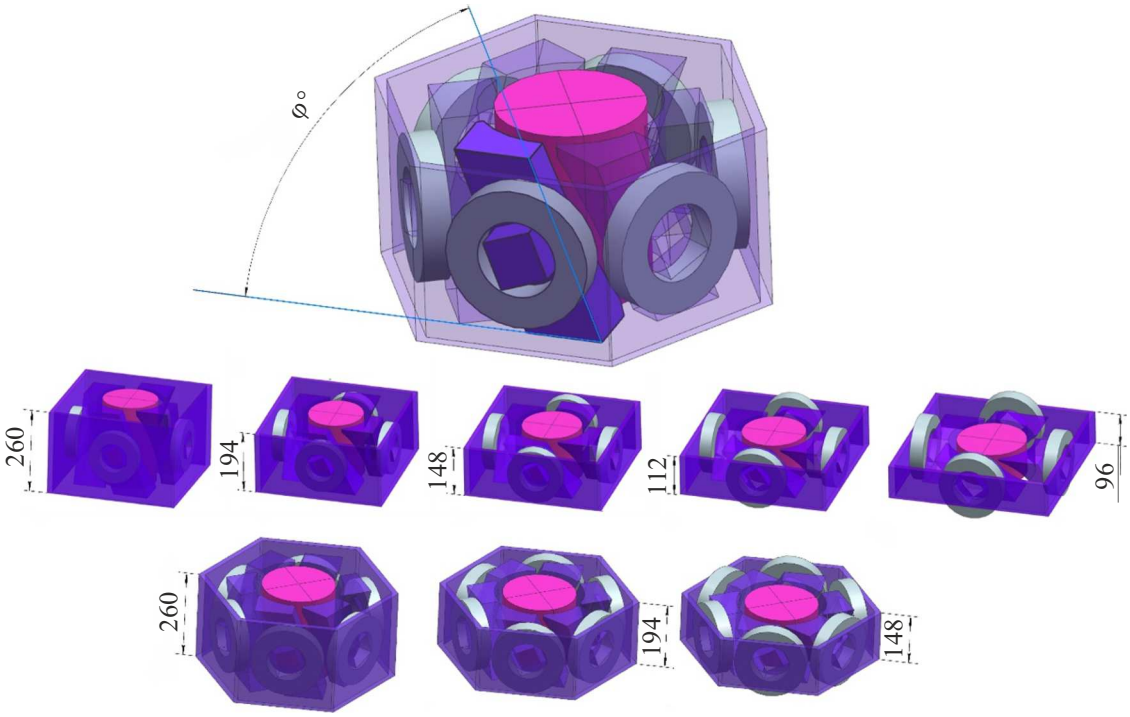

Рис. 10. Геометрия перемешивателя вращающего поля с наклонными сердечниками.

может иметь решающее значение, при этом отличия в характеристиках могут быть нивелированы увеличением величины магнитного поля или повышением его частоты.

7. Индуктор вращающегося магнитного поля с наклонными сердечниками

Существенно уменьшить габариты МГД-перемешивателя возможно, если отказаться от индуктора бегущего поля. В то же время необходимо, чтобы оставшийся единственным индуктор вращающегося магнитного поля мог создавать не только тороидальное вращение жидкости, но также возбуждал бы течения в вертикальной плоскости. Одним из вариантов может являться индуктор вращающегося поля с наклонными сердечниками относительно центральной оси перемешивателя в плоскости, параллельной плоскости его продольного сечения (рис. 10).

На рис. 10 представлена геометрия перемешивателя (двухфазного и трехфазного) с вертикальными габаритами в зависимости от величины угла наклона сердечника. Ввиду конструктивных ограничений были рассмотрены только углы φ 20°, 25°, 30°, 35° и 40° для двухфазного индуктора и углы φ 20°, 25° и 30° для трехфазного. Данная конструкция получалась путем наклона полюса с сохранением его первоначальной ширины. Катушки в этой конструкции подключены аналогично схеме индукторов с вращающимся магнитным полем. Переменное вращающееся магнитное поле индуцирует

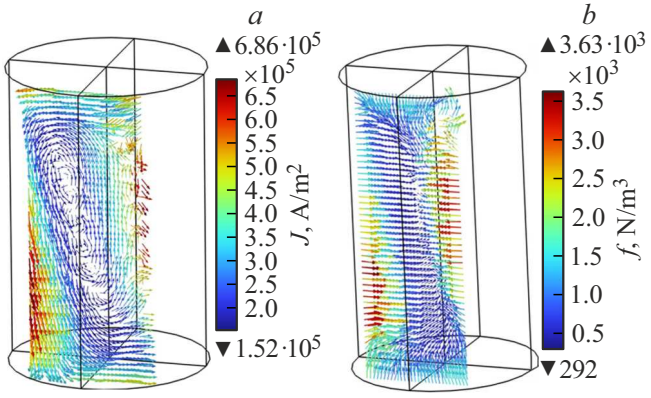

Рис. 11. Векторы плотности электрического тока в сечении цилиндра жидкого металла (a); векторы объемной электромагнитной силы (b).

в жидком металле, находящемся в рабочем объеме МГД-перемешивателя, электрический ток, форму линий которого у полюсов сердечника можно представить в виде замкнутых вытянутых петель, повторяющих форму и наклон полюсов (рис. 11, a).

Индуцированный ток взаимодействует с вращающимся магнитным полем внутри рабочего объема, и в жидком металле возникает объемная сила $\boldsymbol{f}$, направленная нормально линиям электрического тока (рис. 11, b). Эта сила имеет как вертикальную f_z, так и горизонтальную f_φ компоненты, что подтверждается численным экспериментом.

В результате того, что такая конструкция перемешивателя, создающая одновременно тороидальное и полоидальное перемешивание жидкого металла, не содержит дополнительного индуктора бегущего поля, его конструкция имеет размеры меньше конструкций ее прототипов.

Сравнение эффективности приведенной конструкции, создающей как силы, вращающие жидкий металл, так и силы, вызывающие его вертикальное движение, с конструкциями МГД-перемешивателей, имеющих два индуктора как бегущего, так и вращающегося полей, производилось по принятыми нами выше параметрам.

Постановка задачи расчета МГД-перемешивателя вращающего поля с наклонными сердечниками была аналогична описанному ранее варианту, поэтому далее не приводится.

8. Результаты численного моделирования трехфазного и двухфазного индукторов вращающегося поля с наклонными сердечниками

На рис. 12 представлено распределение вертикальной компоненты силы по поверхности проводящего цилиндра двухфазного МГД-перемешивателя, вращающего поля с наклонными сердечниками, в сравнении с аналогичным вариантом без наклона.

Как говорилось ранее, вертикальные силы, в основном определяющие полоидальное течение, создаются взаимодействием вращающегося магнитного поля с индуцируемыми им электрическим током в цилиндре, однако анализ рис. 12 показывает, что концентрации вертикальных составляющих силы, возникающих на верхней и нижней границе проводящего слитка в силу краевого эффекта, при использовании наклонных сердечников смещены в сторону относительно друг друга, что также способствует образованию вихревого движения жидкого металла в вертикальной плоскости. В случае отсутствия наклона полюсов сердечников вращающееся поле создает только тангенциальную компоненту электромагнитных сил, а силы, обусловленные краевыми эффектами, направлены встречно, что не позволяет генерировать крупный вихрь.

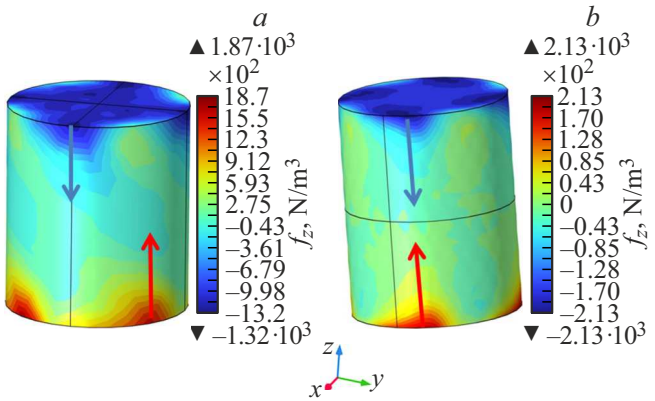

Рис. 12. Распределение вертикальной компоненты объемной силы в двухфазном МГД-перемешивателе вращающего поля с наклонными сердечниками (*a*) и двухфазном МГД-перемешивателе вращающего поля без наклона сердечников (*b*).

В настоящей работе произведено численное исследование зависимости используемых нами характеристик электромагнитных сил, создающих вертикальные течения, от угла наклона полюсов индуктора вращающегося магнитного поля МГД-перемешивателя (рис. 13). Ниже представлены графики зависимости максимальной удельной вертикальной электромагнитной силы, действующей в объеме жидкого металла, и зависимость среднеквадратичного ротора электромагнитных сил от угла наклона полюсов сердечника.

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод о том, что зависимость максимальной вертикальной компоненты электромагнитной силы от угла наклона полюсов сердечника имеет выраженный максимум в обоих вариантах рассматриваемых конструкций (рис. 13, *a*). Это указывает на то, что, с точки зрения максимальной силы, создающей полоидальное течение, существует наилучший угол наклона полюса, соответствующий наиболее эффективной работе индуктора, что полезно учитывать при проектировании данных устройств. Анализ зависимости среднеквадратичной завихренности объемной силы $'\Omega$ от угла наклона полюсов сердечника (рис. 13, *b*) показывает, что рассматриваемые варианты менее эффективны, чем перемешиватели, содержащие индуктор бегущего поля, но все же не так далеки от них по способности генерации полоидального течения.

Заключение

В работе проанализированы различные варианты конструкций МГД-перемешивателей, выявлены достоинства и недостатки каждой конструкции. Для более полного исследования в этом направлении необходимо уже рассмотрение гидродинамической части поставленной задачи. Рассмотренные варианты перемешивателей с трехфазными индукторами вращающегося и бегущего магнитных полей превосходят двухфазные по создаваемому моменту сил, вращающих жидкий металл, и по создаваемой бегущим магнитным полем завихренности электромагнитных сил, создающих полоидальное движение жидкого металла. При этом величины объемных электромагнитных сил, создаваемых в жидком металле трехфазными и двухфазными МГД-перемешивателями, имеют близкие значения. Применение двухфазных индукторов вращающегося магнитного поля потребует увеличения электрической мощности питания в сравнении с трехфазными индукторами, но может быть оправдано ввиду того, что они менее габаритны и легче объединяются с другими подобными сердечниками

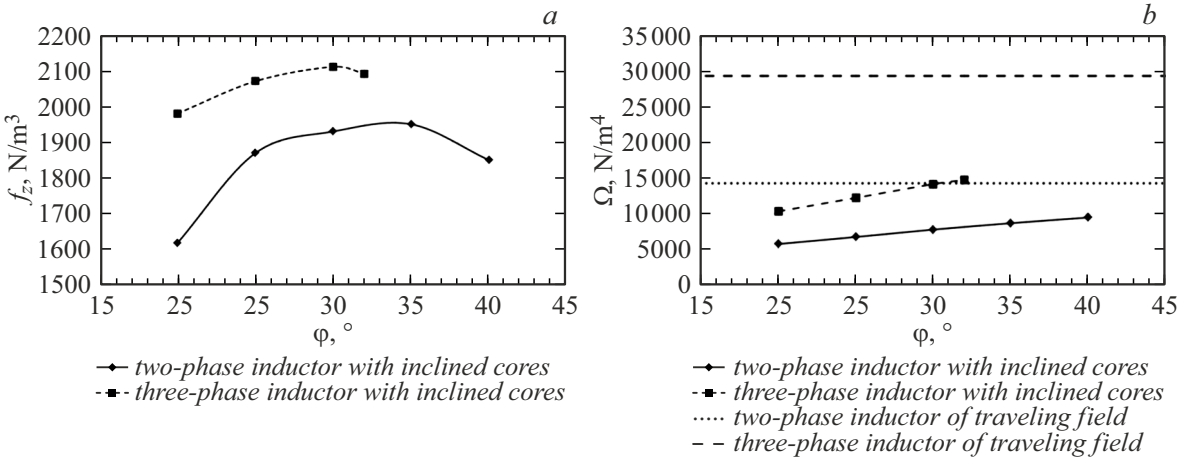

Рис. 13. Зависимости максимальной удельной вертикальной электромагнитной силы (*a*) и среднеквадратичного ротора объемной силы (*b*) от угла наклона полюсов сердечника.

в единую систему, которая будет обладать меньшими габаритами, чем система из трехфазных независимых перемешивателей.

Предложена и исследована принципиально новая схема МГД-перемешивателя с индуктором, имеющим наклонные полюса сердечников, и не имеющего индуктора бегущего поля, но способного создавать в перемешиваемом объеме металла как тороидальное, так и вертикальные перемешивающие течения.

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 № 124012300246-9.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] V.G. Borisov. Light Alloy Technol., **50** (2), 48 (2016).
[2] C. Mapelli, A. Gruttadauria, W. Peroni. J. Mater. Processing Technol., **210** (2), 306 (2010). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.09.016
[3] V.G. Borisov. Metallurgist, **52** (11–12), 672 (2008).
[4] Yu.M. Gelfgat, Yu. Krumins, M. Abricka. Magnetohydrodynamics, **35** (1), 1 (1999).
[5] S. Denisov, V. Dolgikh, S. Khripchenko, I. Kolesnichenko, L. Nikulin. Magnetohydrodynamics, **50** (4), 407 (2014).
[6] А.Ю. Васильев, И.В. Колесниченко, А.Д. Мамыкин, П.Г. Фрик, Р.И. Халилов, С.А. Рогожкин, В.В. Пахолков. ЖТФ, **85** (9), 45 (2015).
[7] S. Yu. Khripchenko. J. Engineer. Phys. Thermophys., **95** (5), 1126 (2022). DOI: 10.1007/s10891-022-02577-w
[8] B. Willers, S. Eckert, P. A. Nikrityuk, D. Räbiger, J. Dong, K. Eckert, G. Gerbeth. Metall. Mater. Trans. B, **39B**, 304 (2008).
[9] D. Rabiger, S. Eckert, G. Gerbeth, S. Franke, J. Czarske. Magnetohydrodynamics, **48** (1), 213 (2012).
[10] S. Khripchenko, S. Denisov. Magnetohydrodynamics, **56** (4), 427 (2020). DOI: 10.22364/mhd.56.4.1
[11] J. Stiller, K. Koal, W.E. Nagel, J. Pal, A. Cramer. Eur. Phys. J. Special Topics, **220**, 111 (2013).
[12] М.Ю. Кучинский. *Электротехнология перемешивания жидкой сердцевины слитков в многоручьевом литейном комплексе* (Канд. дисс., Красноярск, 2022), 103 с.
[13] М.В. Первухин, М.Ю. Кучинский, С.П. Тимофеев. Журнал СФУ. Техника и технологии, **12** (8), 952 (2019).
[14] С.Ю. Хрипченко, В.Г. Борисов. *Устройство для перемешивания электропроводных жидких сред.* (Пат. № 2830293 Заявка № 2024118853 Приоритет изобретения 04 июля 2024 г. Гос. регистрация 18 ноября 2024 г.)
[15] E. Shvydkiy, V. Zaharov, K. Bolotin, I. Smolyanov, S. Sarapulov. Magnetohydrodynamics, **53** (4), 707 (2017).
[16] C.R. Vargas-Llanos, F. Huber, N. Riva, M. Zhang, F. Grilli. Superconductor Sci. Technol., **35**, 41 (2022).
[17] N.E. Jewell-Larsen, S.V. Karpov, I.A. Krichtafovitch, V. Jayanty, Ch.-P. Hsu, A.V. Mamishev. ESA Annual Meeting on Electrostatics, **1**, 20 (2008).