

УДК 621.74:537.84

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

А.И.Глухенький, канд.техн.наук, **Ю.М.Гориславец**, докт.техн.наук, **А.В.Токаревский**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина. e-mail: gai56@ied.org.ua

Представлена методика численного трехмерного моделирования электромагнитного поля и гидродинамики в системе “однофазный индуктор – ванна с жидким металлом”. Электромагнитная задача сформулирована относительно векторного магнитного и скалярного электрического потенциалов, гидродинамическая – в виде уравнений Навье-Стокса с использованием $k-\epsilon$ модели турбулентности. Задачи решались как в полной магнитогидродинамической постановке, так и в безындукционном приближении. Получены выражения для определения по результатам численных расчетов энергетических параметров системы. Исследованы энергетические и гидродинамические характеристики однофазного перемешивателя жидкого металла для отражательной печи в зависимости от частоты питания индуктора. Показано, что изменение частоты (в определенном диапазоне) существенно влияет на интенсивность и структуру течения металла в ванне печи. Библ. 7, рис. 7.

Ключевые слова: однофазный перемешиватель жидкого металла, численное моделирование, векторный магнитный и скалярный электрический потенциалы, вихревое движение металла.

Электромагнитное перемешивание жидкого металла является одним из наиболее эффективных способов повышения качества металлических расплавов и получаемых из них литых заготовок.

Ранее применительно к отражательным печам для плавки и приготовления алюминиевых сплавов в двухмерном приближении была выполнена расчетная оценка возможности использования в качестве электромагнитных перемешивателей однофазных индукторов, создающих пульсирующее магнитное поле [2]. Конструкция такого перемешивателя является предельно простой, что предопределяет его высокую эксплуатационную надежность, и допускает установку на уже действующих плавильных печах. Проведенный в работах [2, 3] предварительный анализ показал, что перемешиватели пульсирующего поля по сравнению с аналогичными устройствами бегущего поля [5, 7] при обеспечении сопоставимой интенсивности движения расплава позволяют организовать в ванне печи технологически более эффективное двухконтурное течение жидкого металла. Это обуславливает перспективность использования их для перемешивания алюминиевых расплавов в отражательных печах.

Выполненный в двухмерной постановке расчетный анализ электромагнитных и гидродинамических процессов в системе “перемешиватель – ванна с жидким металлом” позволил выявить и качественно проанализировать лишь общие закономерности. Однако для получения достоверных количественных характеристик необходимо проведение трехмерного моделирования этих процессов.

Целью данной работы является построение трехмерной модели расчета электромагнитного поля и гидродинамики для однофазного перемешивателя жидкого металла и получение его расчетных электромагнитных и гидродинамических параметров.

Задача решалась применительно к однофазному индуктору, пристыкованому к боковой стенке ванны печи (рис. 1). Индуктор выполнен в виде Ш-образного шихтованного магнитопровода, на среднем стержне (керне) которого намотана многовитковая катушка. Для исключения экранирующего воздействия металлического каркаса (кожуха) печи в месте установки индуктора в нем вырезано окно.

Расчет трехмерных электромагнитной и гидродинамической задач в данной работе производился численно методом конечных элементов с помощью пакета мультифизического моделирования Comsol 3.4 [6]. Задачи решались как в полной магнитогидродина-

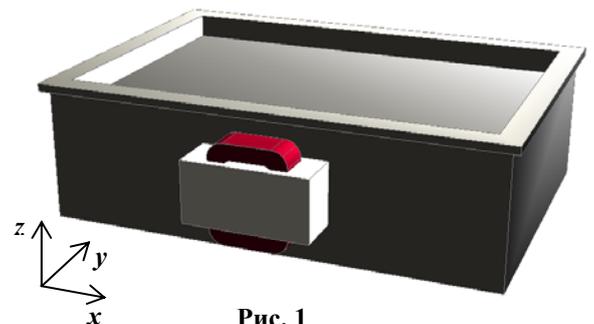


Рис. 1

мической (МГД) постановке, так и с использованием безындукционного приближения, согласно которому электромагнитные и гидродинамические процессы рассматривались независимо друг от друга.

Электромагнитная задача. Несмотря на наличие достаточно обширного программного обеспечения, реализующего численные методы расчета трехмерных электромагнитных полей (пакеты прикладных программ Comsol, Ansys и др.), широкое применение трехмерного моделирования в настоящее время сдерживается, главным образом, ограниченной вычислительной возможностью доступных большинству исследователей персональных компьютеров. Следует ожидать, что по мере увеличения оперативной памяти и скорости вычисления компьютеров данное ограничение будет постепенно сниматься и, следовательно, трехмерное моделирование электромагнитных полей со временем станет таким же общедоступным, как в настоящее время двухмерное. Однако на данный момент описанные примеры трехмерного расчета электромагнитных процессов в электротехнических устройствах являются немногочисленными, что не позволяет при трехмерном моделировании опереться на предшествующую расчетную практику.

Также, на наш взгляд, немаловажным сдерживающим фактором широкого применения трехмерного моделирования является отсутствие четкого теоретического обоснования постановок задач численного расчета электромагнитного поля, которые в некоторых случаях выходят за рамки физических представлений классической теории электромагнитного поля. В первую очередь, это касается формулировок задач расчета электромагнитного поля относительно векторного магнитного и скалярного электрического потенциалов. В этом случае уже при формулировании основных расчетных уравнений присутствуют различные их трактовки, основанные на использовании так называемого калибровочного преобразования, которое позволяет, пренебрегая скалярным электрическим потенциалом, формулировать задачу только относительно преобразованного значения векторного магнитного потенциала. При этом возникают вопросы, связанные с адекватным заданием источников поля, граничных условий, а также с достоверностью и трактовкой полученных результатов.

Здесь необходимо отметить, что в отличие от электродинамики Максвелла [6], где потенциалам при описании электромагнитных процессов придавалось фундаментальное значение, в рамках классической теории электромагнитного поля им отводится роль сугубо расчетных, лишенных физического смысла вспомогательных функций. Такой переход вряд ли можно считать оправданным, поскольку, к примеру, в результате была утрачена возможность установления взаимосвязи между локальными характеристиками электромагнитного поля с электрическим напряжением [1].

Задача расчета электромагнитного поля в этой работе формулировалась нами относительно комплексных амплитуд векторного магнитного $\dot{\mathbf{A}}$ и скалярного электрического $\dot{\phi}$ потенциалов. Отметим, что в пакете мультифизического моделирования Comsol 3.4 такая постановка задачи с учетом наличия движения является единственно доступной для трехмерного моделирования электромагнитных процессов.

При решении данной электромагнитной задачи принимались следующие упрощающие допущения. Ввиду симметричного расположения индуктора относительно ванны печи рассматривалась только одна (правая на рис. 1) половина печи и индуктора. Задача решалась в линейной постановке. Шихтованный магнитопровод считался неэлектропроводным, магнитная проницаемость принималась постоянной, потерями на гистерезис и вихревые токи пренебрегали. Реальная неоднородная структура катушки, содержащая проводящие (проводники) и непроводящие (каркас катушки, изоляция) элементы, представлялась однородной непроводящей средой с равномерно распределенной заданной плотностью тока. При таком представлении катушки индуктора утрачивается реальное распределение скалярного электрического потенциала в объеме катушки. Однако из-за крайне незначительной величины емкостной связи между индуктором и металлом в ванне печи, данное обстоятельство практически не сказывается на распределении вихревых токов в жидком металле.

Расчетная область трехмерной электромагнитной задачи в двух проекциях показана на рис. 2. В нее включена не вся ванна печи, а только близлежащая к индуктору (пристеночная) ее часть, в которую распространяется электромагнитное поле. Выделение пристеночной подобласти в ванне печи позволяет уменьшить расчетную область электромагнитной задачи. Внешние контуры расчетной области на рисунке обозначены пунктирной линией. На рис. 2, а дано сечение расчетной области в горизонтальной плоскости (плоскости xy), которое проходит посередине индуктора (по высоте). На рис. 2, б показано сечение в вертикальной плоскости xz , проходящее через середину катушки индуктора. Расчетная область электромагнитной задачи является кусочно-неоднородной и включает в себя подобласти магнитопровода Ω_1 , катушки Ω_2 , Ω_3 и Ω_4 , окружающей воздушной среды и футеровки бо-

ковой стенки печи Ω_5 , а также прилегающей к боковой стенке части жидкого металла в ванне печи Ω_6 , включенной в расчетную область электромагнитной задачи.

Разбиение катушки на три подобласти вызвано необходимостью задания в них плотностей токов, которые в каждой из подобластей имеют разное направление в пространстве.

Для всех подобластей система дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитное поле, в общем случае имеет вид

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \dot{\mathbf{A}} - \sigma \mathbf{u} \times (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r) \nabla \phi = \dot{\mathbf{J}}_{\text{вн}}, \quad (1)$$

$$\nabla \dot{\mathbf{J}}_{\text{полн}} = 0, \quad \nabla \dot{\mathbf{A}} = 0, \quad (2, 3)$$

где μ_0 и ε_0 – магнитная и диэлектрическая проницаемости вакуума, μ_r и ε_r – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости, σ – удельная электропроводность, \mathbf{u} – скорость движения, ω – угловая частота, $\dot{\mathbf{J}}_{\text{вн}}$ – комплексная амплитуда внешней плотности тока, $\dot{\mathbf{J}}_{\text{полн}}$ – комплексная амплитуда полной плотности тока, которая включает в себя плотности токов смещения и проводимости. Выделенные жирным шрифтом величины являются трехмерными пространственными векторами.

Значения внешней плотности тока задаются только в подобластях, моделирующих катушку индуктора. Для составления замкнутого контура внешнего тока в катушке плотности тока $\dot{\mathbf{J}}_{\text{вн}}$ должны иметь в подобластях Ω_2 и Ω_4 пространственные составляющие только по координате x , а в подобласти Ω_3 – по координате z . Знаки (+ или –) перед значениями пространственных составляющих плотности тока проставляются с учетом выбранного направления тока в катушке.

Значения внешней плотности тока задаются только в подобластях, моделирующих катушку индуктора. Для составления замкнутого контура внешнего тока в катушке плотности тока $\dot{\mathbf{J}}_{\text{вн}}$ должны иметь в подобластях Ω_2 и Ω_4 пространственные составляющие только по координате x , а в подобласти Ω_3 – по координате z . Знаки (+ или –) перед значениями пространственных составляющих плотности тока проставляются с учетом выбранного направления тока в катушке.

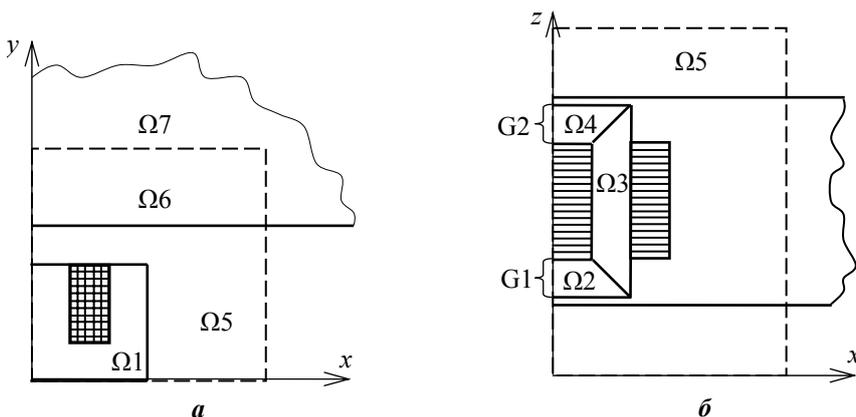


Рис. 2

Значения внешней плотности тока задаются только в подобластях, моделирующих катушку индуктора. Для составления замкнутого контура внешнего тока в катушке плотности тока $\dot{\mathbf{J}}_{\text{вн}}$ должны иметь в подобластях Ω_2 и Ω_4 пространственные составляющие только по координате x , а в подобласти Ω_3 – по координате z . Знаки (+ или –) перед значениями пространственных составляющих плотности тока проставляются с учетом выбранного направления тока в катушке.

Отметим, что использование термина “внешние” применительно к задаваемым в качестве источников электромагнитного поля плотностям тока в катушке, по нашему мнению, является более корректным по отношению к часто используемому в этом случае термину “сторонние”. Последним в теории поля обычно обозначаются процессы, имеющие неэлектромагнитную природу, например, контактные, химические, тепловые локальные источники ЭДС и вызванные ними токи. В большинстве электротехнологических устройств они отсутствуют либо ими пренебрегают. Термин “внешние” указывает на наличие вне устройства источников, вызывающих протекание токов в нем, что вполне соответствует реальности.

Ненулевые значения скорости \mathbf{u} в электромагнитной задаче присутствуют только в подобласти с жидким металлом Ω_6 . При совместном решении в мультифизическом режиме с гидродинамической задачей рассчитанные значения скоростей жидкого металла в ванне печи автоматически задаются в электромагнитной задаче.

На внешней границе расчетной области задавались граничные условия двух видов.

Плоскость симметрии (плоскость yz при $x = 0$ на рис. 2) в электромагнитной задаче моделировалась дифференциальным “магнитным” условием $\mathbf{n} \times \dot{\mathbf{A}} = 0$ и интегральным “электрическим” условием $\int -\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{J}} = I_0$. Первое указывает на наличие в плоскости симметрии только нормальной к ней составляющей векторного магнитного потенциала, что обеспечивает отсутствие нормальной составляющей магнитной индукции $\dot{\mathbf{B}}$ в этой плоскости. Второе условие задает на границе каждой из подобластей интегральное значение тока, которое отлично от нуля только на границах G1 и G2 (см. рис. 2, б). При принятом нами направлении тока в катушке (против часовой стрелки) ток I_0 , значения которого равно ампер-виткам катушки, на границе G1 будет иметь положительный знак, на границе G2 – отрицательный.

На остальной внешней границе расчетной области задавались нулевое значение векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}} = 0$ и условие электрической изоляции $\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{J}} = 0$. Дополнительно в произвольной точке расчетной области вводилось нулевое значение скалярного электрического потенциала $\phi = 0$.

По результатам расчета (полученным значениям векторного магнитного и скалярного электрического потенциалов) определялись значения электромагнитных сил в жидком металле, а также интегральные величины: напряжение, активная, реактивная и полная мощности индуктора, тепловыделение (потери) в жидком металле и др. Ниже приведены и обоснованы выражения для их определения.

Объемные электромагнитные силы в жидком металле рассчитывались по формуле

$$\mathbf{f} = 0,5 \operatorname{Re} (\dot{\mathbf{J}} \times \dot{\mathbf{B}}^*), \quad (4)$$

где $\dot{\mathbf{J}} = \sigma(-\nabla\phi - j\omega\dot{\mathbf{A}} + \mathbf{u} \times \dot{\mathbf{B}})$ – плотность тока проводимости в жидком металле, $\dot{\mathbf{B}}^*$ – сопряженный комплекс индукции магнитного поля, $\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times \dot{\mathbf{A}}$.

Мощность индуктора (системы “индуктор – ванна с жидким металлом”) определялась исходя из следующих представлений. Преобразуем уравнение $\mathbf{E} = -\nabla\phi - \partial\mathbf{A}/\partial t$ к виду

$$-\nabla\phi = \mathbf{J}/\sigma + \partial\mathbf{A}/\partial t. \quad (5)$$

После скалярного умножения каждого члена равенства (5) на плотность тока проводимости \mathbf{J} будем иметь

$$-\nabla\phi \cdot \mathbf{J} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}/\sigma + \partial\mathbf{A}/\partial t \cdot \mathbf{J}. \quad (6)$$

Учитывая тождество $\nabla\phi \cdot \mathbf{J} = \nabla(\phi \cdot \mathbf{J}) - \phi \cdot \nabla\mathbf{J}$ и равенство $\nabla\mathbf{J} = -\partial\rho/\partial t$, преобразуем уравнение (6) к виду

$$-\nabla(\phi \cdot \mathbf{J}) = \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}/\sigma + \partial\mathbf{A}/\partial t \cdot \mathbf{J} + \phi \cdot \partial\rho/\partial t. \quad (7)$$

Проинтегрируем каждый члена равенства (7) по объему проводника V катушки индуктора

$$-\int_V \nabla(\phi \cdot \mathbf{J}) dv = \int_V (\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}/\sigma) dv + \int_V (\partial\mathbf{A}/\partial t \cdot \mathbf{J}) dv + \int_V (\phi \cdot \partial\rho/\partial t) dv. \quad (8)$$

Левая часть уравнения (8) представляет собой мощность, подведенную к индуктору. Это можно показать следующим образом. Перейдем в соответствии с теоремой Остроградского-Гаусса от объемного интеграла к поверхностному. С учетом отсутствия токов проводимости через боковую поверхность проводника и при пересечении ввода и вывода катушки индуктора замкнутой поверхностью в эквипотенциальных плоскостях S_1 и S_2 , к которым подведено напряжение $U = \phi_1 - \phi_2$, будем иметь

$$-\int_V \nabla(\phi \cdot \mathbf{J}) dv = -\oint_S \phi \cdot \mathbf{J} ds = -\int_{S_1} \phi \cdot \mathbf{J} ds - \int_{S_2} \phi \cdot \mathbf{J} ds = \phi_1 I - \phi_2 I = UI, \quad (9)$$

где I – ток в катушке. Положительный знак перед слагаемым $\phi_1 I$ возникает в результате скалярного произведения плотности тока проводимости и внешней нормали к поверхности S_1 , которые имеют противоположные направления.

Мощностью электрической энергии зарядов (последнее слагаемое в правой части уравнения (8)) в рассматриваемой нами электромагнитной системе пренебрегаем ввиду ее незначительности.

Таким образом, переходя к комплексным величинам, комплексная мощность индуктора

$$\tilde{S} = P + jQ = \frac{1}{2} \dot{U} I^*, \quad (10)$$

где P , Q – соответственно активная и реактивная мощности индуктора, может быть определена (по результатам расчетов) в соответствии с выражением

$$\tilde{S} = \frac{1}{2} \int_V \frac{\dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{J}}^*}{\sigma} dv + j\omega \frac{1}{2} \int_V \mathbf{A} \dot{\mathbf{J}}^* dv. \quad (11)$$

Первое слагаемое правой части уравнения (11) всегда является действительным числом и в соответствии с законом Джоуля-Ленца представляет собой активную мощность, выделяющуюся в виде теплоты в катушке индуктора. В нашем случае, когда катушка представлена непроводящей средой с равномерно распределенной заданной плотностью тока, потери в ней определялись приближенно в соответствии с выражением $P_1 = 0,5 \dot{I}^* R_1$, где сопротивление катушки R_1 вычислялось исходя из количества витков, средней длины витка, его сечения и удельной электропроводности провода катушки.

Второе слагаемое правой части уравнения (11) в общем случае является комплексным числом, имеющим действительную и мнимую составляющие. Поскольку активная мощность в катушке с то-

ком уже учтена первым слагаемым, действительная часть второго слагаемого будет соответствовать потерям в ванне с жидким металлом и затратам мощности на приведение его в движение. Мнимая часть второго слагаемого представляет собой реактивную мощность индуктора Q .

Величина комплексной мощности индуктора за вычетом джоулевых потерь в катушке $\tilde{S} - P_1$ вычислялась с учетом наличия в подобластях катушки Ω_2 , Ω_3 и Ω_4 единственных пространственных составляющих плотности внешнего тока $\mathbf{J}_{\text{вн}}$ следующим образом:

$$j\omega \frac{1}{2} \int_V \mathbf{A} \cdot \mathbf{J}^* dv = j\omega \left(\int_{\Omega_2} (\dot{A}_x \cdot J_x^*) dv + \int_{\Omega_3} (\dot{A}_z \cdot J_z^*) dv + \int_{\Omega_4} (\dot{A}_x \cdot J_x^*) dv \right). \quad (12)$$

Множитель 1/2 в правой части уравнения (12) исчезает за счет удвоения при переходе от рассматриваемой в задаче половины катушки к мощностям всего индуктора.

Подведенное к индуктору напряжение определялось исходя из уравнения (10) по найденному значению комплексной мощности индуктора \tilde{S} и заданному значению тока в катушке I .

Потери, выделяющиеся в ванне с жидким металлом в виде теплоты, определялись путем интегрирования локальных тепловыделений по подобласти Ω_6 с дальнейшим их удвоением

$$P_2 = \int_{\Omega_6} \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^*}{\sigma} dv. \quad (13)$$

Механическая мощность, затрачиваемая на приведение жидкого металла в движение,

$$P_{\text{мех}} = -\text{Re} \int_{\Omega_6} (\mathbf{u} \times \dot{\mathbf{B}}) \cdot \mathbf{J}^* dv. \quad (14)$$

Гидродинамическая задача. Расчетная область гидродинамической задачи является одно-родной. Вследствие выделения пристеночной подобласти в электромагнитной задаче она оказалась разбитой на две подобласти Ω_6 и Ω_7 .

Гидродинамическая задача решалась в нелинейной постановке. Скорость \mathbf{u} жидкого металла определялась путем численного решения уравнений Навье-Стокса для турбулентного течения с использованием k - ε модели турбулентности [6]

$$\rho_m (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{\text{эф}} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (15,16)$$

где ρ_m – плотность жидкого металла, p – давление, $\eta_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективной динамической вязкости металла, \mathbf{f} – объемные электромагнитные силы в жидком металле, вычисленные в соответствии с выражением (4).

В подобластях Ω_6 и Ω_7 задавались значения удельной плотности жидкого металла ρ_m и коэффициента его динамической вязкости η . Электромагнитные силы задавались только в подобласти Ω_6 .

В плоскости симметрии принималось граничное условие симметрии. На остальных внешних поверхностях жидкого металла граничные условия задавались в виде логарифмического профиля скорости для пограничного слоя. Для упрощения задачи такое же условие принималось и на верхней поверхности, что позволило не рассматривать тем самым деформирование свободной поверхности жидкого металла.

На поверхности металла в произвольной точке (в одном из углов ванны) задавалось нулевое значение давления. В качестве параметра, характеризующего эффективность перемешивания жидкого металла в ванне печи, использовалось усредненное по объему ванны значение скорости, которое определялось в соответствии с выражением

$$W = \frac{1}{V_m} \int_{\Omega_6 + \Omega_7} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} dv, \quad (17)$$

где u , v , w – пространственные составляющие скорости жидкого металла по координатам x , y , z соответственно, V_m – объем жидкого металла в половине ванны печи.

Результаты расчетов. В соответствии с представленной методикой исследовались электромагнитные и гидродинамические процессы в системе “однофазный индуктор – ванна с жидким металлом” применительно к отражательной печи для плавки алюминия. Расчеты выполнялись при следующих исходных данных.

Ванна печи имеет размеры (по жидкому металлу): длина – 3 м, ширина – 2 м, высота – 0,5 м. Однофазный индуктор расположен вдоль длинной стороны (стенки) ванны симметрично как по длине, так и по высоте жидкого металла на расстоянии от него, равном 0,1 м (толщина футеровки). Габа-

ритные размеры магнитопровода индуктора составляют: длина – 0,6 м, ширина и высота – по 0,3 м. Многовитковая катушка индуктора с поперечными размерами 0,1 на 0,2 метра, которая намотана на центральный kern магнитопровода, имеет 30 витков. Расчеты выполнялись при заданном токе в катушке $I = \sqrt{2} \cdot 1000$ А (амплитудное значение), при этом средняя плотность тока в катушке индуктора составила $J = \sqrt{2} \cdot 1,5$ А/мм².

На рис. 3 показана расчетная топология (структура) течения жидкого металла в правой половине ванны печи, полученная при питании катушки током промышленной частоты. Из рисунка следует, что в объеме ванны печи под действием однофазного индуктора образуется двухконтурное течение жидкого металла. В отличие от индуктора с бегущим магнитным полем, который создает одноконтурное движение, такое течение (с точки зрения перемешивания расплава) в ряде случаев является более эффективным.

Последующие расчеты выполнялись с целью определения влияния частоты питания однофазного индуктора на структуру течения, а также влияние ее на электромагнитные и энергетические параметры перемешивателя жидкого металла при постоянных ампер-витках катушки.

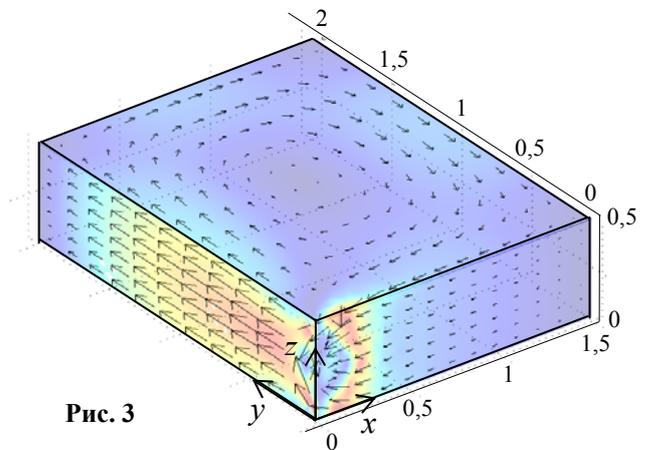


Рис. 3

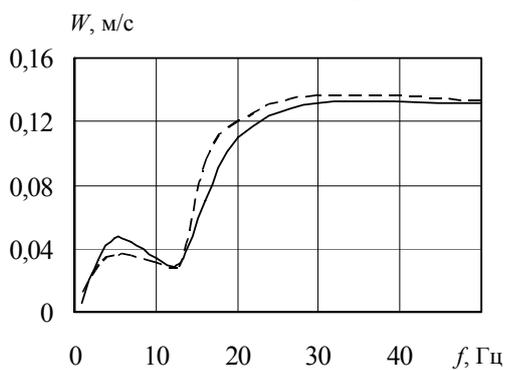


Рис. 4

Последующие расчеты выполнялись с целью определения влияния частоты питания однофазного индуктора на структуру течения, а также влияние ее на электромагнитные и энергетические параметры перемешивателя жидкого металла при постоянных ампер-витках катушки. На рис. 4 представлена зависимость от частоты усредненной по объему ванны скорости движения W , которая характеризует интенсивность перемешивания расплава. Расчеты, выполненные в МГД постановке (сплошная кривая) и в безиндукционном приближении (пунктирная кривая), дают приблизительно одинаковый характер изменения скорости движения от частоты. Представленные на этом рисунке кривые не сильно отличаются друг от друга, поэтому в первом приближении электромагнитную задачу для этого случая можно рассматривать без учета поля, индуцированного движением металла.

Что касается самого характера изменения скорости W от частоты, то он оказался достаточно необычным. В диапазоне частот 20...50 Гц усредненная скорость меняется незначительно. Однако при понижении частоты (примерно от 20 Гц до 13 Гц) она резко падает. Дальнейшее снижение частоты (до 5 Гц) вызывает некоторый рост скорости, после чего она снова падает, уменьшаясь в пределе до нуля.

Такой характер зависимости скорости движения от частоты может быть объяснен перестройкой структуры течения металла. На рис. 5 показана расчетная топология течений (поле скоростей) в средней по высоте горизонтальной полуплоскости ванны печи при частотах 50 Гц (а), 13 Гц (б) и 5 Гц (в). С понижением частоты двухконтурное течение, которое на частоте 50 Гц направлено от индуктора вглубь ванны, постепенно перестраивается и при частоте 5 Гц и ниже уже имеет обратное направление. При частоте 13 Гц течение металла носит переходный характер. Оно, в основном, локализовано в пристеночной области, интенсивность его незначительная. Таким образом, за счет изменения частоты питания однофазного индуктора с Ш-образным магнитопроводом возможно управление как интенсивностью, так и направлением движения жидкого металла в ванне печи.

Перестройка структуры течения жидкого металла с изменением частоты вызвана, вероятнее всего, изменением соотношения нормальных f_y и тангенциальных f_x составляющих сил, каждая из которых стремится вращать металл в противоположных направлениях. На рис. 6 показаны зависимости от частоты интегральных значений этих сил $F_x = \int_{\Omega_6} f_x dv$ и $F_y = \int_{\Omega_6} f_y dv$. Несмотря на то, что тангенциальная сила F_x меньше силы F_y , более чем на порядок, вклад ее в общее движение существенное. Поскольку она направлена против движения, созданного нормальными электромагнитными силами, то она стремится тормозить это движение.

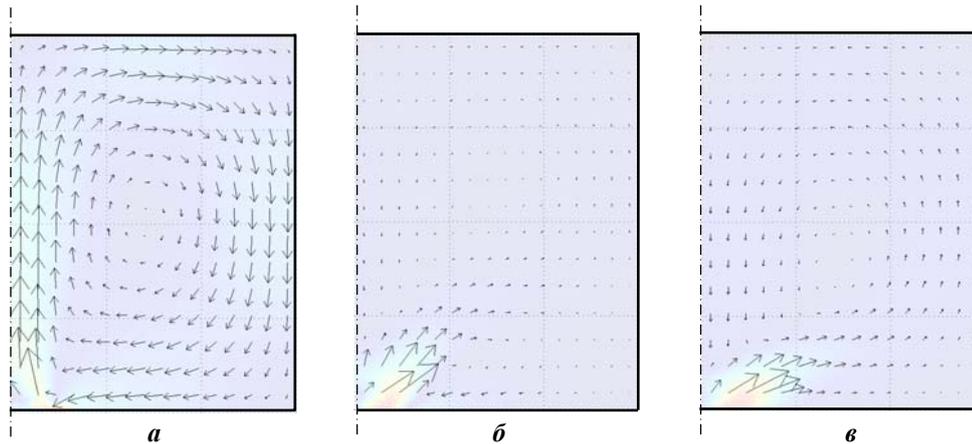


Рис. 5

А так как с уменьшением частоты сила F_y падает, а сила F_x растет (до определенного значения частоты), то это и вызывает, в конечном итоге, опрокидывание (реверс) основного течения. Сопоставление топологий движения, полученных для различных частот, и зависимостей, представленных на рис. 6, позволяет заключить, что обратное течение в ванне печи устанавливается при отношении нормальных и тангенциальных сил $F_y/F_x \leq \sim 10$.

Энергетические зависимости индуктора от частоты показаны на рис. 7. Здесь представлены активная мощность индуктора P , тепловая мощность P_2 , выделяемая в жидком металле, механическая мощность $P_{\text{мех}}$, напряжение U и коэффициент мощности индуктора $\cos\phi$.

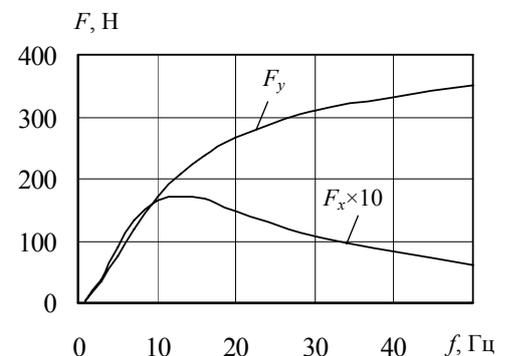


Рис. 6

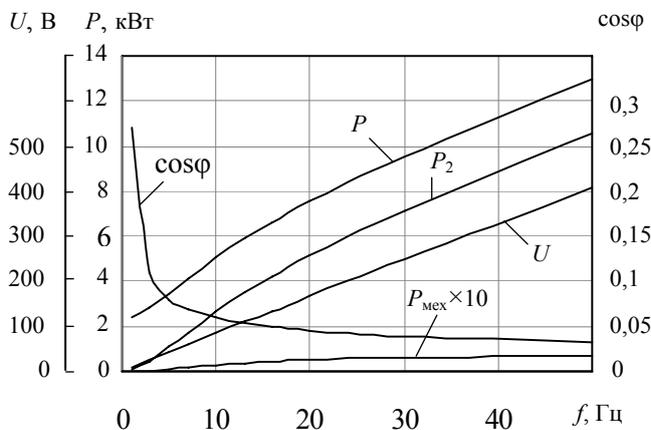


Рис. 7

В заключение, в качестве примера приведем полученные в МГД постановке энергетические параметры рассматриваемого индуктора с числом витков в катушке 30 и токе в ней 1000 А (действующее значение) при частоте питания 50 Гц. Расчетные значения этих параметров оказались следующими: напряжение – 410 В, активная мощность – 13,02 кВт, реактивная мощность – 410 кВАр, потери в катушке – 2,39 кВт, мощность нагрева металла – 10,56 кВт, механическая мощность – 0,07 кВт. Как нетрудно заметить, при этом соблюдается баланс активных мощностей в рассмотренной системе – $P = P_1 + P_2 + P_{\text{мех}}$.

Следует отметить, что при безындукционном приближении баланс активных мощностей устанавливается без учета механической мощности ($P = P_1 + P_2$). В этом случае для определения реального значения активной мощности индуктора полученное значение P должно быть увеличено на величину механической мощности, которое вычисляется в соответствии с выражением (14) после расчета гидродинамической задачи.

Закключение. Выполнено численное трехмерное моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов в системе “индуктор – ванна с жидким металлом” применительно к однофазному перемешивателю металла для отражательной печи. Процессы рассматривались как в магнитогидродинамической постановке, так и в безындукционном приближении. Установлено, что в первом приближении влиянием индуцированного за счет движения поля можно пренебречь, что позволяет для данного случая отдельно решать задачи расчета электромагнитного поля и гидродинамики.

Исследованы энергетические и гидродинамические характеристики перемешивателя с Ш-образным магнитопроводом в зависимости от частоты питания индуктора. Показано, что за счет изменения частоты однофазного индуктора возможно управлять интенсивностью движения жидкого металла в ванне печи, а также менять направление вихревого течения, что может быть использовано в технологии электромагнитного перемешивания расплава в плавильных печах.

1. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. Скалярный электрический и векторный магнитный потенциалы в теории электромагнитного поля // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 7–8.
2. Дубоделов В.И., Фикссен В.Н., Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 61–66.
3. Дубоделов В.И., Фикссен В.Н., Горюк М.С., Слазнев Н.А., Скоробагатко Ю.П. Современные устройства для электромагнитного перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах повышенной емкости // Металл и литье Украины. – 2008. – № 6. – С. 12–17.
4. Максвелл Дж.К. Трактат об электричестве и магнетизме. В двух томах. Т. II. – М.: Наука, 1989. – 431 с.
5. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах: 2-ое изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1991. – 280 с.
6. Comsol Multiphysics. – <http://www.comsol.com>.
7. Non ferrous casting. – Equipment MHD Technology. Riga, Latvia: Krāsainie lējumi, 2004. – 22 p.

УДК 621.74:537.84

ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОДНОФАЗНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕМІШУВАЧА РІДКИХ МЕТАЛІВ

О.І.Глухенький, канд.техн.наук, Ю.М.Гориславец, докт.техн.наук, А.В.Токаревський

Ін-т електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail:gai56@ied.org.ua

Наведено методику чисельного тривимірного моделювання електромагнітного поля і гідродинаміки в системі "однофазний індуктор – ванна з рідким металом". Електромагнітна задача сформульована відносно векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів, гідродинамічна – у вигляді рівнянь Нав'є-Стокса з використанням k-ε моделі турбулентності. Задачі вирішувалися як в повній магнітогідродинамічній постановці, так і в безіндукційному наближенні. Отримано вирази для визначення за результатами чисельних розрахунків енергетичних параметрів системи. Досліджено енергетичні та гідродинамічні характеристики однофазного перемішувача рідкого металу для відбивної печі в залежності від частоти живлення індуктора. Показано, що зміна частоти (у певному діапазоні) істотно впливає на інтенсивність і структуру течії металу у ванні печі. Бібл. 7, рис. 7.

Ключові слова: однофазний перемішувач рідкого металу, чисельне моделювання, векторний магнітний і скалярний електричний потенціали, вихровий рух металу.

THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF SINGLE-PHASE ELECTROMAGNETIC STIRRER OF LIQUID METAL

O.I.Glukhenkyi, Yu.M.Goryslavets, A.V.Tokarevskiy

Institute of Elektrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail:gai56@ied.org.ua

The technique for numerical modeling of three-dimensional electromagnetic field and hydrodynamics in the system "single-phase inductor – bath with liquid metal" is presented. The electromagnetic problem is formulated for vector magnetic potential and scalar electric potential. Hydrodynamic problem has a form of the Navier-Stokes equations with turbulence k-ε model. The problems are solved both in general MHD statement and in non-inductive approach. The expressions for the determination of the energy parameters of the system according to numerical calculations are obtained. The energy and the hydrodynamic characteristics of single-phase molten metal stirrer for reverberatory furnace are studied depending on frequency of inductor power supply. It is shown that the variation of the frequency (within a certain range) has a substantial influence on intensity and structure of metal flowing in the furnace bath. References 7, figures 7.

Keywords: single-phase stirrer of liquid metal, numerical simulation, vector magnetic and scalar electric potentials, vortex motion of metal.

1. Glukhenkii O.I., Gorislavets Yu.M. Scalar electric and vector magnetic potentials in theory of electromagnetic field // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – No. 2. – Pp. 7–8. (Rus)
2. Dubodelov V.I., Fikssen V.N., Glukhenkii A.I., Gorislavets Yu.M. MHD mixers of aluminum alloys with pulsed magnetic field // Tekhnichna elektrodynamika. – 2009. – No. 1. – Pp. 61–66. (Rus)
3. Dubodelov V.I., Fikssen V.N., Goriuk M.S., Slazhnev N.A., Skorobogatko Yu.P. Modern devices for electromagnetic stirring of molten aluminum in high-capacity furnaces and mixers // Metall i litie Ukrainy. – 2008. – No. 6. – Pp. 12–17. (Rus)
4. Maxwell J.C. Treatise on electricity and magnetism. Vol. II. – Moskva: Nauka, 1989. – 431 p. (Rus)
5. Tir L.L., Stolon M.Ya. Electromagnetic devices to control the circulation of the melt in electric furnaces. – Moskva: Metallurgiya, 1991. – 280 p. (Rus)
6. Comsol Multiphysics. – <http://www.comsol.com>.
7. Non ferrous casting. – Equipment MHD Technology. Riga, Latvia: Krāsainie lējumi, 2004. – 22 p.

Надійшла 31.01.2013

Received 31.01.2013