

УДК 621.365.53 621.333.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ЛИНЕЙНОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ
ПРИ ПЕРЕМЕШИВАНИИ РАСПЛАВА*****В.П. Певчев, Е.В. Стрижакова, В.Н. Овсянников***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методик расчета электромагнитных и гидравлических процессов в расплаве дуговой печи для задач снижения энергозатрат на перемешивание металла и увеличение производительности дуговых печей.

Цель работы: анализ существующих методик расчета электромагнитных и гидравлических процессов в системе «статор – расплав» и разработка усовершенствованных экономических вариантов линейных двигателей для реализации этих процессов. Рассмотрен комплекс вопросов по моделированию электромагнитных и гидравлических процессов в системе «статор – расплав» в режимах перемешивания жидкого металла и скачивания шлака. Процессы перемешивания расплава происходят при формировании вихрей в горизонтальной и вертикальной плоскостях, что отражается на требованиях к распределенным силам во всем объеме металла. Для повышения эффективности перемешивания рассмотрен комплекс мер, которые были проанализированы методом моделирования.

Методы исследования. Расчеты электромагнитных и гидравлических процессов в расплаве выполнены с помощью метода конечных элементов с использованием программного пакета Comsol. Проведен анализ конструкций статора линейного двигателя для оценки характера движения расплава и выявления возможности переключения из режима перемешивания в режим скачивания шлака. С учетом немагнитных свойств корпуса печи предложена упрощенная геометрическая модель для связанной электрогидравлической задачи, не содержащая футеровки и корпуса печи. Трехмерная задача реализована для гидравлического процесса при задании внутренних сил в ограниченном объеме, соответствующем области протекания токов в расплаве.

Результаты. Разработаны численные модели электромагнитного и гидравлического процессов в расплаве, определена зависимость скорости движения жидкого металла от силы, создаваемой двигателем, определены параметры моделей для стационарных режимов. На базе двумерной связанной электрогидравлической модели расплава в печи получены распределения электромагнитных сил и скоростей движения для режимов перемешивания металла и скачивания шлака. Моделирование гидравлических процессов в трехмерной области подтвердило эффективность перемешивания расплава в зоне лобовых частей обмотки статора.

Певчев Владимир Павлович (д.т.н., доцент), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Стрижакова Елена Владимировна (к.т.н.), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Овсянников Владимир Николаевич (к.т.н.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Ключевые слова: асинхронный линейный двигатель, электромагнитные процессы, нелинейная задача, гидравлика, связанная модель, турбулентный режим.

Применяемые в конструкциях современных электродуговых печей системы электромагнитного перемешивания расплава решают задачи выравнивания температуры во всем объеме расплава и интенсификации химических процессов за счет лучшего взаимодействия с реагентами, содержащимися в специально создаваемом слое шлака. Кроме этого, на этапе скачивания шлака с поверхности расплава требуется приведение в движение верхнего слоя жидкого металла, чтобы без применения механических приспособлений можно было освободить поверхность металла. Для упрощения процедуры скачивания дуговая печь оснащается механизмом наклона. В этом случае уровень шлака становится выше окна для слива, но основной металл находится ниже уровня окна. Обеспечение надежности конструкции корпуса печи, включающего несколько слоев кирпичной кладки, достигается путем выполнения нижней части печи в форме комбинации сферической и конической поверхностей. Неотъемлемым конструктивным элементом печи является стальной корпус. Это приводит к тому, что электромагнитное поле системы перемешивания металла наводит вихревые токи в стенке корпуса. Для уменьшения потерь в качестве материала используется немагнитная сталь с высоким удельным сопротивлением, обеспечивая увеличение глубины проникновения тока.

Основной тенденцией развития дуговых печей является увеличение единичной мощности и сокращение времени плавки [1]. Повышение интенсивности перемешивания металла способствует ускорению химических реакций поверхностного слоя расплава с веществом шлака. Применение индукционных систем с кольцевыми катушками обеспечивает создание цилиндрического магнитного поля, обеспечивающего вертикальную циркуляцию расплава. Однако в этом случае нет возможности линейного перемещения расплава вдоль поверхности в сторону сливного лотка. Помимо классического для металлургии способа, связанного с продувкой газов через расплав [2], основное внимание в исследованиях уделяется электромагнитному перемешиванию [3–8] как наиболее эффективному способу ускорения тепловых и химических процессов. В дуговых печах переменного тока протекание токов в верхнем слое расплава обеспечивает создание электромагнитных сил, решающих задачу перемешивания расплава. В дуговых печах постоянного тока используются устройства, позволяющие регулировать электромагнитное поле для создания электромагнитных сил. Среди решений можно отметить применение электродинамического эффекта, возникающего при несоосном расположении электродов [5].

На интенсивность процессов перемешивания также оказывают влияние изменяющиеся физические параметры расплава. Особенно важен учет реологических характеристик [6–8].

В проектной практике расчет электромагнитных систем перемешивания производится на основе аналитических и численных методов, созданных для расчета линейных асинхронных двигателей [9–13]. В зависимости от решаемых задач предпочтительными могут быть как те, так и другие. Относительная простота и возможность использовать результаты при моделировании систем в динамике отличают методы, основанные на применении схем замещения [9–11]. В последнее время все большее распространение находят численные расчеты [12, 13], позволяющие получить распределения электромагнитных сил в пространстве, в данном случае в расплаве. Общей проблемой указанных методов является

сложность определения траектории токов в расплаве, так как на них оказывают влияние различные факторы, например зависимость удельного сопротивления от температуры.

Моделирование гидравлических процессов в расплавленных металлах для задач плавления в печах разных типов, а также для установок транспортировки расплавов рассмотрено в работах [14–18]. Основной целью этих работ является расчет распределений скорости в объеме расплавленного металла и их влияния на тепловые процессы. Особенность работы [17] заключается в учете процессов кристаллизации. Большинство перечисленных работ ограничивается рассмотрением только гидравлических процессов, что объясняется высокими требованиями к вычислительным ресурсам.

Перечисленные направления исследований решают отдельные задачи при расчете систем перемешивания расплава. Объединение моделей разных видов требует применения специальных подходов, таких как методы теории подобия, построение геометрических моделей для отдельных участков расчетной области [19]. С учетом сказанного задачами работы являются:

- разработка комплекса моделей для электромагнитных и гидравлических процессов в системе «магнитная система линейного двигателя – расплав»;
- создание системы с управляемым источником электромагнитного поля, позволяющим сформировать циркуляцию во всем объеме расплава.

Решение поставленных задач было реализовано с использованием программных комплексов, построенных на базе метода конечных элементов. Для расчета электромагнитных процессов в двухмерной области для большинства задач подходит программа Elcut. Моделирование гидравлических процессов для 2D- и 3D-задач, а также связанных с электромагнитными процессами хорошо реализуется с помощью программы Comsol. Возможности для решения нелинейных задач облегчают процедуры поиска.

Исходная конструкция дуговой печи для обеспечения перемешивания расплава содержит размещенный под основанием печи статор линейного двигателя с катушками. Создаваемое в расплаве бегущее электромагнитное поле приводит к движению слоев металла в расплаве. Статор содержит магнитопровод с многовитковыми катушками. В качестве ротора выступает расплав. Конструктивным элементом печи является стальной корпус, который ослабляет электромагнитное поле статора. Это приводит к снижению коэффициента полезного действия линейного двигателя. Большая толщина футеровки не позволяет сделать немагнитный зазор между статором и расплавом минимальным, что приводит к необходимости увеличения сечения катушки и, следовательно, ширины паза. Приведенная на рис. 1 расчетная геометрическая модель отражает соотношения между основными размерами печи и линейного двигателя.

Проведенный анализ существующих решений в области построения гидравлических [6, 7, 13–15] моделей для задач движения расплава показал возможности для дальнейшего совершенствования алгоритмов управления процессами.

В качестве исходных данных принимаем:

- плотность расплава стали ρ с учетом уменьшения при переходе в расплавленное состояние – 7410 кг/м^3 ;
- динамическая вязкость расплавленной стали μ в диапазоне от температуры плавления до $T_{пл} + 150 \text{ C}^\circ$ – $0,0028 \dots 0,0018 \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- удельная электропроводность металла в расплавленном состоянии – $10^6 \text{ Сим}\cdot\text{м}$.

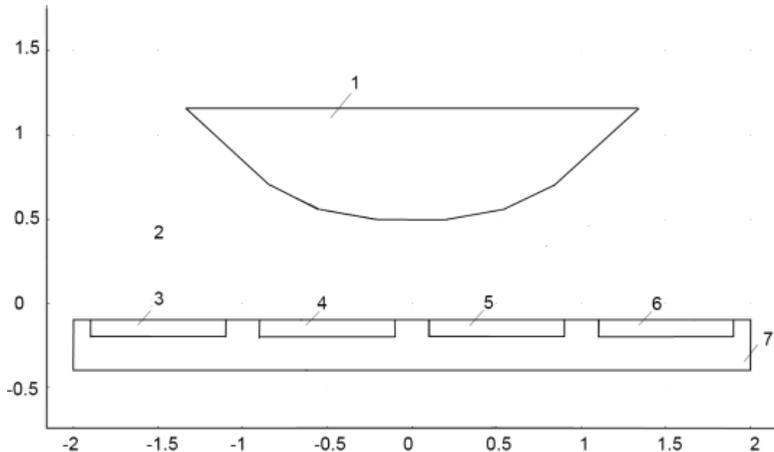


Рис. 1. Расчетная область расплава печи и статора линейного двигателя: 1 – расплав; 2 – воздух; 3–6 – пазы с проводниками статора; 7 – магнитопровод

Характер движения жидкости определяется на основании критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{wl_0}{\mu}.$$

При значении коэффициента более 2300 начинается переходный режим между ламинарным и турбулентным характером движения. При меньших значениях наблюдается ламинарный характер. В рассматриваемом случае критерий в соответствии с принятыми значениями параметров изменяется от 71 до 111.

Отсутствие турбулентности в толще расплава приводит к необходимости обеспечения переноса более холодных нижних слоев в верхние в области тепловых источников. Переход к турбулентному движению возможен за счет увеличения скорости, но это сопровождается трением слоя жидкого металла о материал футеровки и ускоренным разрушением ее поверхности.

Длительный режим работы системы перемешивания делает излишним анализ изменения поля скоростей в пусковом режиме. Стабильность реологических свойств расплава определяется поддержанием температуры на заданном уровне с помощью управления мощностью излучения трех электрических дуг. Влияние мощности тепловыделения в расплаве от индуцированных токов незначительно по сравнению с основным источником тепла. Таким образом, обоснованным является использование стационарной модели для гидравлической задачи.

В качестве модели процесса принимаем модель несжимаемой жидкости Навье – Стокса, записываемую в виде двух уравнений [14]:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \right] + \mathbf{F};$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

где ρ – плотность (кг/м³);
 \mathbf{u} – вектор усредненной скорости (м/с);
 η – динамическая вязкость (Па·м);
 p – давление (Па);
 \mathbf{I} – единичный вектор;

\mathbf{F} – вектор распределенных сил, включая массовые силы.

В качестве граничных условий задается равенство нулю скорости:

$$\mathbf{u} = 0.$$

При совместном моделировании электромагнитных и гидравлических процессов расчетная область содержит фрагменты, соответствующие жидкости, воздуху и твердым телам. В гидравлической модели твердые тела не предусмотрены, поэтому для соответствующих участков удобнее задавать свойства, аналогичные свойствам расплава, чтобы проще решалась проблема сходимости вычислительного процесса. Для исключения взаимного влияния движения в расплаве и других областях между ними задаются внутренние границы с присвоением нулевого значения вектору скорости:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 = 0.$$

Между областями с твердыми телами и воздухом задаются условия непрерывности (continuity):

$$\mathbf{n} \left(\eta_1 (\nabla \mathbf{u}_1 + (\nabla \mathbf{u}_1)^T) - p_1 \mathbf{I} \cdot \eta_2 (\nabla \mathbf{u}_2 + (\nabla \mathbf{u}_2)^T) + p_2 \mathbf{I} \right) = 0.$$

В нижнем слое расплава в качестве источников рассматриваются объемные распределения сил, действующие вдоль обеих осей. Величины этих сил передаются из электромагнитной модели в виде векторов F_x, F_y .

Криволинейная нижняя поверхность расплава приводит к тому, что скорости и силы меняют направление. Результирующие векторы сильно отличаются от случая с плоскими поверхностями.

Рассматриваемая модель является замкнутой, так как движение происходит внутри области и нет входа и выхода потоков жидкости. Все границы представляют собой стенку.

Приведенные дифференциальные уравнения для среды и граничных условий описывают математическую модель ламинарного движения жидкости, заложенную в программном пакете Comsol, который использован для проведения дальнейших расчетов.

Кроме выявления характера движения жидкости при моделировании стоит задача расчета распределения электромагнитных сил внутри объема металла. В данном случае к гидравлической модели добавляется решение электромагнитной задачи в двумерной области.

Конструкция линейного асинхронного двигателя для перемешивания расплава выполнена с учетом большого зазора между статором и расплавом. Кроме того, область лобовой части не может быть вынесена за габариты печи, чтобы бегущее электромагнитное поле обеспечивало движение расплава по всей ширине. Расчет параметров двигателя и электромагнитных сил в расплаве целесообразно выполнять на основе двумерной электромагнитной модели. По аналогии с гидравлической задачей целесообразно рассмотрение установившихся режимов работы. В качестве модели принимается квазистационарная задача расчета электромагнитного поля и токов. Постановка в двумерной области (x, y) в терминах векторного магнитного потенциала имеет вид дифференциального уравнения с соответствующими граничными условиями:

$$j\omega\sigma\mathbf{A} + \nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{A}}{\mu_0\mu_r} \right) - \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \left(\sigma \Delta V / L + J_z^e \right); \quad A|_L = 0.$$

Здесь: A – векторный магнитный потенциал;
 v – вектор скорости движения расплава;
 μ_0 – магнитная проницаемость вакуума;
 μ_r – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода;
 j – мнимая единица;
 ω – круговая частота тока;
 σ – удельная электрическая проводимость;
 L – размер расчетной области в направлении Z ;
 J_z^e – плотность стороннего тока.

Магнитная проницаемость в статоре определяется по кривой намагничивания в зависимости от напряженности.

В качестве граничных условий для электромагнитной задачи принято равенство нулю векторного магнитного потенциала на границе расчетной области:

$$A_z = 0.$$

При решении связанной электрогидравлической задачи значения скорости для расплава передаются из гидравлической в электромагнитную задачу в виде двух векторов $v_x = u$; $v_y = v$. В свою очередь, результаты расчета электромагнитных сил передаются из электромагнитной задачи в гидравлическую. С учетом стационарности задач экспортируемые величины определяются как действующие.

Для расчетов приняты ширина паза, равная 0,89 м, ширина зубца 0,06 м. Число витков катушки в пазу составляет 178. Проводник имеет размеры 10×20 мм. Ток в проводнике варьируется в пределах от 200 до 1200 А, частота тока принималась равной 2,5 и 5 Гц. Пазы 3 и 5 принадлежат одной катушке, а пазы 4 и 6 – второй катушке.

Для реализации двух режимов движения расплава – перемешивания и линейного движения – предусмотрено переключение катушек. В режиме перемешивания катушки питаются однофазным напряжением. В этом случае в пазы 3 и 6 мгновенные значения токов имеют одно направление, а в пазы 4 и 5 – встречное. В режиме скачивания первая катушка имеет прежнюю схему подключения, а вторая включена на напряжение, сдвинутое по фазе на 90 градусов относительно первой катушки: ток в проводниках пазы с номером четыре имеет сдвиг на 90 градусов, а ток в проводниках пазы с номером шесть имеет сдвиг по фазе -90 градусов.

Определение горизонтальных и вертикальных сил в расплаве произведено при неизменных габаритах пазов и зубцов статора. Построенные зависимости сил от величины тока представлены на рис. 2. Логарифмический масштаб использован из-за большого диапазона изменения величины сил. В установившемся режиме требуемые значения скоростей соответствуют большим скольжениям. Переходный процесс при неизменном токе статора получается очень растянутым во времени из-за того, что масса металла велика и приведение ее в движение при малой мощности проходит с небольшим ускорением. Целесообразно делать форсированный пуск при включении на номинальное напряжение. После выхода на заданную скорость напряжение снижается до расчетного.

Достижение требуемых значений скоростей движения расплава в отдельных областях не гарантирует качественного перемешивания во всем объеме. Для вы-

явления полной картины скоростей произведены расчеты с помощью связанной 2D электрогидравлической модели.

В результате ряда расчетов получены распределения сил и скоростей для расплава. В зависимости от режима движения расплава соотношение горизонтальной и вертикальной составляющих сил меняется. В режиме вертикального перемешивания значения сил в направлении оси Oy существенно преобладают над горизонтальной составляющей. Однако из-за кривизны пода печи вклад сил f_x, f_y в формирование потоков вдоль внутренней поверхности на разных участках имеет разное значение.

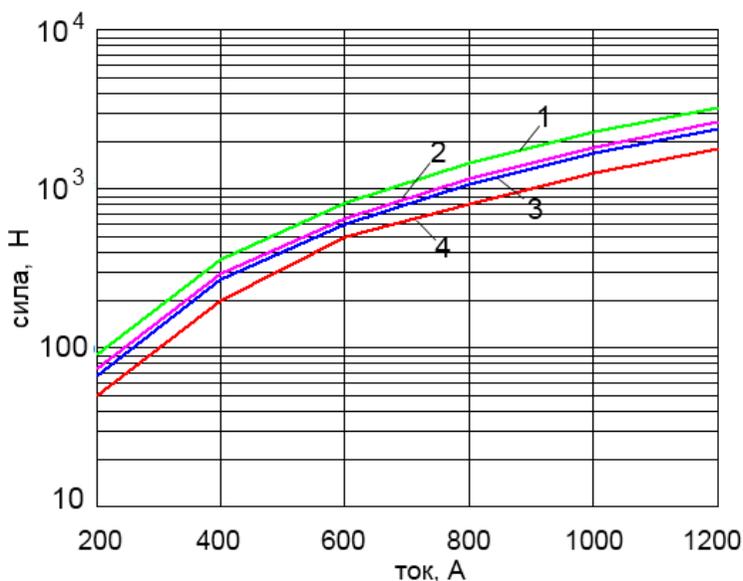


Рис. 2. Зависимость электромагнитных сил в расплаве от тока статора:
 1, 2 – вертикальная составляющая в режиме перемешивания на частотах 5 и 2,5 Гц;
 3, 4 – горизонтальная составляющая в режиме скачивания на частотах 5 и 2,5 Гц

В режиме вертикального перемешивания интегральное значение силы вдоль оси Ox близко к нулю, а вертикальная составляющая на частоте 5 Гц изменяется в пределах от 90 до 3253 Н, на частоте 2,5 Гц принимает значения от 73 до 2611 Н. Скорость движения при минимальной силе достигает значения 0,2 м/с.

В режиме линейного движения расплава интегральное значение горизонтальной составляющей силы на частоте 5 Гц изменяется в пределах от 50 до 1796 Н, на частоте 2,5 Гц принимает значения от 66 до 2391 Н.

Формируемые вихри скоростей зависят от глубины проникновения тока. Для низкой частоты (2,5 Гц) образуются два больших вихря, а для более высокой частоты (5–10 Гц) формируется несколько менее крупных (рис. 4).

Расчет процесса перемешивания отображен на рис. 5. Криволинейный характер нижней поверхности расплава отражается на направлении результирующих сил в каждой точке. Направления нормальной и тангенциальной составляющих не совпадают с горизонтальным и вертикальным векторами. Тем не менее электромагнитная сила обеспечивает формирование тонкого слоя расплава, движущегося в направлении $-x$. По

достижении потоком левого края поток меняет направление на противоположное и движется к правому краю.

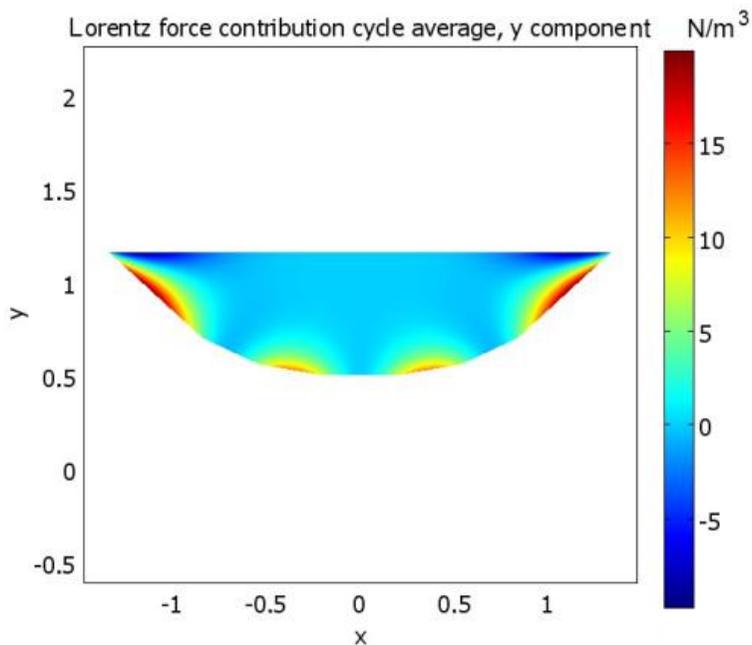


Рис. 3. Распределение вертикальной составляющей распределенной силы в расплаве в режиме перемешивания

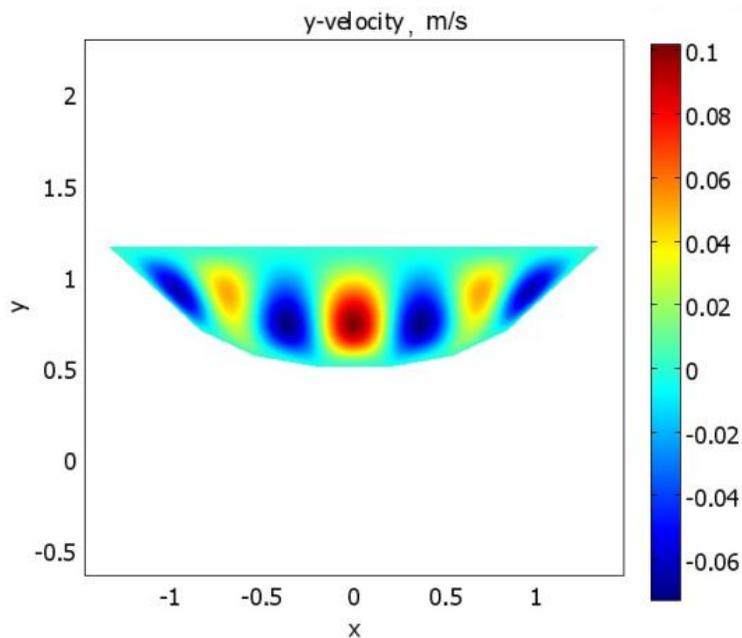


Рис. 4. Распределение вертикальной составляющей скорости в расплаве в режиме перемешивания

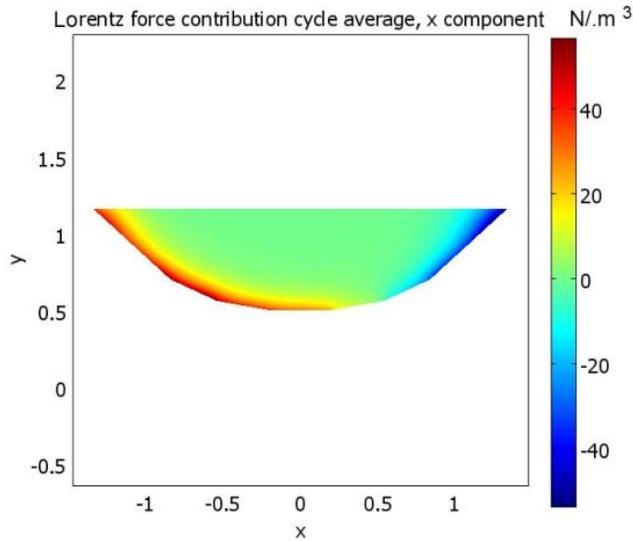


Рис. 5. Распределение горизонтальной составляющей распределенной силы в расплаве в режиме скачивания

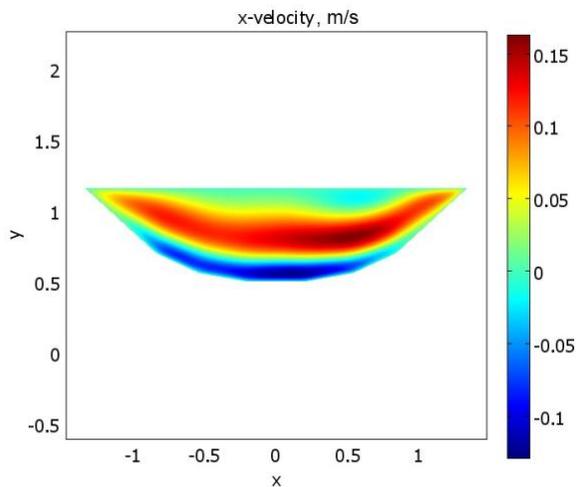


Рис. 6. Распределение горизонтальной составляющей скорости в расплаве в режиме скачивания

Результаты расчета в двумерной области показывают эффективность процессов в режимах перемешивания и линейного движения. Однако остается неясным вопрос, имеются ли в объеме расплава участки, не охваченные движущимися потоками, и как происходит движение в расплаве над областью с лобовыми участками статорной обмотки. Конструкция печи не позволяет вынести лобовые части статорной обмотки за габариты корпуса, поэтому необходимо исследование электромагнитных и гидравлических процессов в трехмерной области.

Моделирование связанных электромагнитных и гидравлических процессов в трехмерной области затруднительно, так как требуемые вычислительные

ресурсы далеко превосходят возможности персональных компьютеров. Поэтому задача решается в два этапа: на первом этапе определяются области с электромагнитными силами в расплаве, на втором этапе решается гидравлическая задача. В связи со сложностью переноса детальной картины распределения электромагнитных сил создается составная модель области расплава, где область с источниками представляет собой трубку сложной формы. Проведенные расчеты продемонстрировали полный охват нижней зоны областью движущегося расплава. Участки расплавленного металла, расположенные в конической области, не имея распределенных источников, вовлекаются в движение за счет вязкости. На рис. 7 показаны распределения скорости движения на срезах по оси Oz , вдоль которой движется расплав. Таким образом, эффективность процессов перемещения расплава в режиме линейного движения подтверждена.

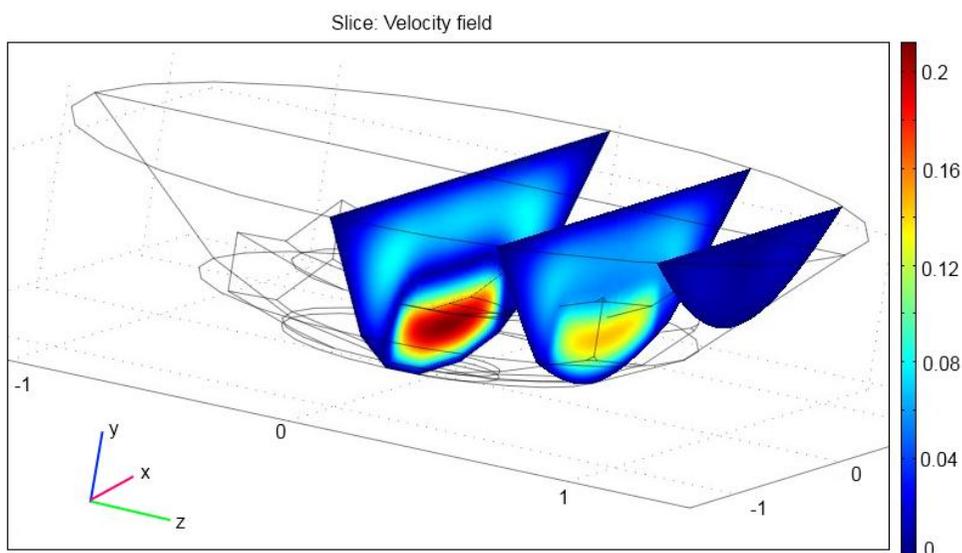


Рис. 7. Распределение поля скоростей в поперечных слоях расплава

Выводы

Проведенные исследования электромагнитных и гидравлических процессов в системе «статор линейного двигателя – расплав» показали следующее:

1. Сочетание функций вертикального перемешивания и линейного горизонтального движения расплава достигается при переключении обмоток от однофазного напряжения к двухфазному.

2. Для рассмотренной в работе емкости печи наиболее эффективным режимом перемешивания расплава и скачивания шлака соответствует частота тока 5 Гц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савин А.В., Никольский В.Е., Вохминцев Д.В. Интенсификация плавки в дуговых сталеплавильных печах // Главный энергетик. – 2012. – № 7. – С. 45–48.
2. Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Нахаев М.Р., Саипова Л.Х. Математическое моделирование гидродинамических процессов в промежуточном ковше МНЛЗ при донной продувке инертным газом // Metallurg. – М.: Metallurgizdat, 2018. – № 5. – С. 12–17.

3. Крутянский М.М., Нехамин С.М., Митрофанов М.В. Электромагнитное перемешивание жидкого металла в дуговых печах постоянного тока // *Электromеталлургия*. – 2018. – № 4. – С. 2–12.
4. Масалов А.К., Кузьмин М.Г. Новая дуговая электропечь постоянного тока с управляемым электромагнитным перемешиванием расплава // *Литейщик России*. – 2017. – № 1. – С. 26–28.
5. Карпучек А.М., Макаров А.Н. Исследование электромагнитной выталкивающей силы в дуговых сталеплавильных печах постоянного тока при несоосном расположении электродов // *Энергосбережение в электро- и теплоэнергетических металлургических установках: Сборник науч.-практ. трудов*. – Тверь: Тверской государственной техникой университет, 2013. – С. 40–43.
6. Казак О.В. Влияние тепловых параметров на структуру и интенсивность вихревого движения расплава в дуговых печах постоянного тока // *Инженерно-физический журнал*. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2013. – Т. 86. – № 6. – С. 1370–1378.
7. Кабаков Д.Ю., Самохвалов С.Е., Пинтюк В.П., Филатова О.А. Моделирование гидродинамики и теплопереноса расплава стали при дуговом нагреве на установке ковш – печь // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2013. – № 3 (43). – С. 33–37.
8. Смирнов С.А., Калаев В.В., Нехамин С.М., Крутянский М.М., Колгатин С.Н., Нехамин И.С. Математическое моделирование электромагнитного перемешивания жидкой стали в дуговой печи постоянного тока // *Теплофизика высоких температур*. – 2010. – Т. 48. – № 1. – С. 74–83.
9. Саранулов Ф.Н., Фризен В.Э., Швыдкий Е.Л., Смольянов И.А. Математическое моделирование линейного асинхронного двигателя на основе детализированных схем замещения // *Электротехника*. – 2018. – № 4. – С. 58–63.
10. Соломин В.А., Шаипал А.С., Трубицына Н.А., Савин Г.А., Трубицын М.А. Первичный продольный краевой эффект в линейных асинхронных двигателях с поперечным магнитным потоком // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2016. – № 1 (61). – С. 121–126.
11. Соломин В.А., Замишина Л.Л., Соломин А.В. Линейные асинхронные тяговые двигатели для высокоскоростного подвижного состава и их математическое моделирование. – М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2015. – С. 164.
12. Денисов В.Н., Курилин С.П. Инженерная модель линейного асинхронного двигателя // *Электричество*. – 2011. – № 3. – С. 52–54.
13. Идиятулин А.А., Саранулов С.Ф., Саранулов Ф.Н., Фаткуллин С.М. Моделирование торцевого индукционного вращателя металлического расплава // *Электротехника*. – М.: Фирма Знак, 2009. – № 7. – С. 38–43.
14. Максимова А.А., Хацаюк М.Ю., Тимофеев В.Н. Сравнительная оценка результатов численного моделирования гидродинамических процессов в системе «ванна с расплавом – МГД-перемешиватель» // *Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии*. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. – Т. 11. – № 2. – С. 138–147.
15. Тяпин А.А., Адрющенко В.Ю., Горемыкин В.А. Гидродинамика распределенного поля скоростей расплава алюминия // *Методы прогнозирования в технике и технологиях: сборник статей по итогам Междунар. науч.-практ. конференции; Стерлитамак. – Уфа: Агентство международных исследований, 2018. – С. 75–86.*
16. Курнаева С.В., Бугаева Н.С., Тимофеев В.Н. Исследования процессов тепломассопереноса в индукционных канальных печах для производства алюминия // *Фундаментальные научные исследования: Теоретические и практические аспекты. Сборник матер. междунар. науч.-практ. конф. в 3 т.* – Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 2016. – С. 121–125.
17. Чистов А.С., Савихин О.Г., Овчинников В.Ф., Николаев М.Я. Математическая модель нестационарного тепломассопереноса в канале с жидкометаллическим теплоносителем с учетом процесса кристаллизации-плавления // *Проблемы прочности и пластичности*. – Н. Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2016. – Т. 78. – № 4. – С. 368–377.
18. Тимофеев В.Н., Хацаюк М.Ю. Управление конвективными потоками расплава в канальной части индукционной печи // *Известия РАН. Энергетика*. – М.: Российская академия наук, 2013. – № 3. – С. 130–136.

19. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Пименов Д.Н. Решение полевых задач при проектировании индуктора с магнитопроводом // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 92–102.

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2019 г.

MODELING OF ELECTRO-HYDRAULIC PROCESSES IN A LINEAR ASYNCHRONOUS ENGINE WHEN MIXING A MELT

V.P. Pevchev, E.V. Strizhakova, V.N. Ovsyannikov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The relevance of the work is due to the need to improve the methods for calculating electromagnetic and hydraulic processes in the melting of an arc furnace for the purpose of reducing energy consumption for mixing metal and increasing the performance of arc furnaces.*

Objective: analysis of existing methods for calculating electromagnetic and hydraulic processes in the stator-melt system and the development of improved economical options. A set of questions on the modeling of electromagnetic and hydraulic processes in the “stator-melt” system in the modes of mixing liquid metal and slag loading is considered. Melt mixing processes occur during the formation of vortices in the horizontal and vertical planes, which affects the requirements for distributed forces in the entire volume of the metal. To improve the efficiency of mixing, a set of modeling problems was considered.

Research methods. Calculations of electromagnetic and hydraulic processes in the melt are performed using the finite element method using the Comsol software package. The analysis of the structures of the linear motor stator is carried out to assess the nature of the melt movement and identify the possibility of switching from the mixing mode to the slag loading mode. Taking into account the non-magnetic properties of the furnace body, a simplified geometric model for the coupled electrohydraulic problem, which does not contain the linings and the furnace body, is proposed. The three-dimensional task is implemented for the hydraulic process when defining internal forces in a limited volume, corresponding to the flow of currents in the melt.

Results. Numerical models of the electromagnetic and hydraulic processes in the melt were developed, the dependence of the velocity of the liquid metal on the force generated by the engine was determined, the parameters of the models for stationary modes were determined. On the basis of a two-dimensional coupled electrohydraulic model of a melt in a furnace, the distributions of electromagnetic forces and speeds for the modes of metal mixing and slag loading are obtained. Simulation of hydraulic processes in the three-dimensional region confirmed the effectiveness of melt mixing in the zone of the frontal parts of the stator winding.

Keywords: *asynchronous linear motor, electromagnetic processes, nonlinear problem, hydraulics, coupled model, turbulent mode.*

Vladimir P. Pevchev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Elena V. Strizhakova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Vladimir N. Ovsyannikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

REFERENCES

1. Savin A.V., Nikol'skiy V.E., Vokhmintsev D.V. Intensification of smelting in arc steel-smelting furnaces // *Glavnyy energetik*. 2012, no: 7. pp. 45–48. (In Russian).
2. El'darkhanov A.S., Nuradinov A.S., Nakhaev M.R., Saipova L.Kh. Mathematical modeling of hydrodynamic processes in the tundish of a continuous casting machine during bottom blowing with an inert gas // *Metallurg*. Publisher: Metallurgizdat (Moscow) 2018. – No. 5. – Pp. 12–17. (In Russian)
3. Krutyanskiy M.M., Nekhamin S.M., Mitrofanov M.V. Electromagnetic mixing of liquid metal in DC arc furnaces // *Elektrometallurgiya*, 2018, no. 4, pp. 2–12. (In Russian).
4. Masalov A.K., Kuz'min M.G. New DC electric arc furnace with controlled electromagnetic stirring of the melt // *Liteyshchik Rossii*. 2017. – no. 1. – pp. 26–28. (In Russian)
5. Karpuchek A.M., Makarov A.N. Investigation of the electromagnetic buoyancy in DC electric arc-smelting furnaces with non-axial arrangement of electrodes // *Energoberezhenie v elektro- i teploenergeticheskikh metallurgicheskikh ustanovkakh*. Sbornik nauchno-prakticheskikh trudov. Tverskoy gosudarstvennyy tekhnicheskuy universitet. Tver. 2013. – pp. 40–43. (In Russian).
6. Kazak O.V. Effect of thermal parameters on the structure and intensity of the melt vortex motion in DC arc furnaces // *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. Izdatel'stvo; Institut teplo- i massoobmens im. A.V. Lykova NAN Belarusi. Minsk. 2013. – Vol. 86. – no. 6. – pp. 1370–1378. (In Russian)
7. Kabakov D.Y., Samokhvalov S.E., Piptyuk V.P., Filatova O.A. Modeling of hydrodynamics and heat transfer of steel melt with arc heating at a ladle furnace installation / *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universineta im. G.I. Nosova*. 2013. – no. 3 (43). – pp. 33–37. (In Russian)
8. Smirnov S.A., Kalaev V.V., Nekhamin S.M., Krutyanskiy M.M., Kolgatin S.N., Nekhamin I.S. Mathematical modeling of electromagnetic mixing of liquid steel in a DC arc furnac // *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2010. – vol. 48. – no 1. – pp. 74–83. (In Russian)
9. Sarapulov F.N., Frizen V.N., Shvydkiy Ye.L., Smol'yanov I.A. Mathematical modeling of a linear asynchronous motor based on detailed replacement schemes // *Russian Electrical Engineering*. Moscow. 2018. – no. 4. – pp. 58–63. (In Russian)
10. Solomin V.A., Shashpal A.S., Trubitsina N.A., Savin A.G., Trubitsin M.A. Primary longitudinal edge effect in linear asynchronous motors with transverse magnetic flux // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobsheniya*. – 2016. – nn. 1 (61). – pp. 121–126. (In Russian)
11. Solomin V.A., Zamshina L.L., Solomin A.V. Lineynye asinkhronnye dvigateli dlya vysokoskorostnogo podvzhnogo sostava i ikh matematicheskoe modelirovanie [Linear asynchronous traction motors for high-speed rolling stock and their mathematical modeling] / Moscow. Izdatel'stvo: Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom nransporte. 2015. – p. 164. (In Russian)
12. Denisov V.N., Kurilin S.P. Engineering model of a linear asynchronous motor // *Elektrichestvo*. 2011. – no. 3. – pp. 52–54. (In Russian)
13. Idiyatullin A.A., Sarapulov S.V., Sarapulov F.N., Fatkullin S.M. Simulation of an end induction rotor of a metal melt // *Russian Electrical Engineering*. Moscow. 2009. – no. 7. – pp. 38–43. (In Russian)
14. Maksimova A.A., Khatsayuk M.Yu., Timofeev V.N. Comparative evaluation of the results of numerical simulation of hydrodynamic processes in the system "bath with melt – MHD-mixer" // *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta*. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. Publisher: Siberian Federal University (Krasnoyarsk) 2018. – Vol. 11. – No. 2. – pp. 138–147. (In Russian)
15. Tyapin A.A., Adryushchenko V.Yu., Goremykin V.A. Hydrodynamics of the distributed velocity field of aluminum melt // *Metody prognozirovaniya v tekhnike i tekhnologiyakh*. Collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference. Sterlitamak. Publisher: Limited Liability Company "Agency for International Studies" (Ufa) 2018. – pp. 75–86. (In Russian)
16. Kurnaeva S.V., Bugaeva N.S., Timofeev V.N. Research on heat and mass transfer processes in induction channel furnaces for aluminum production // *Fundamentalnye nauchnye issledovaniya: Teoreticheskie i nauchnye aspekty*. Collection of materials of the international scientific-practical conference: in 3 volumes. Publisher: Limited Liability Company "West-Siberian Scientific Center". 2016. – pp. 121–125. (In Russian)
17. Chistov A.S., Savikhin O.G., Ovchinnikov V.F., Nikolaev M.Ya. Mathematical model of non-stationary heat and mass transfer in the channel with liquid metal coolant, taking into account the process of crystallization-melting // *Problemy prochnosti i plastichnosti*. Publisher: National Re-

- search Nizhny Novgorod State University. N.I. Lobachevsky (Nizhny Novgorod) 2016. – Vol. 78. – no. 4. – pp. 368–377. (In Russian)
18. *Timofeev V.N., Khatsayuk M.Yu.* Control of convective melt flow in the channel part of the induction furnace // *Izvestiya RAN. Energetika*. Publisher: Russian Academy of Sciences (Moscow) 2013. – No. 3. – pp. 130–136. (In Russian)
 19. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Pimenov D.N.* Solving field problems when designing an inductor with a magnetic core // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. No. 1, 2015. pp. 92–102. (In Russian)