

Моделирование электровихревых полей в металлургических печах

КАЗАК О.В., СЕМКО А.Н.

Донецкий национальный университет

Работа посвящена моделированию электровихревых полей в металлургических печах. Приводится постановка задачи, физическая и математическая модель протекающих процессов. Разработан алгоритм решения задачи и получены результаты электромагнитных полей в расплаве стали, выполненные с помощью программно-вычислительного комплекса ANSYS.

Робота присвячена моделюванню электровихревих полей в металургійних печах. Наводиться постановка задачі, фізична та математична модель процесів що протікають. Розроблен алгоритм розв'язання та отримані результати електромагнітних полей у розплаві сталі, отримані за допомогою програмно-обчислювального комплексу ANSYS.

Work is devoted to modelling electrovortical field in electric furnaces. Statement of a problem, physical and mathematical model of proceeding processes is resulted. The algorithm of the decision of a problem is developed and a result, of electromagnetic fields in molten metal, executed by programmatic-calculable complex ANSYS is received.

Введение. Выплавка металла представляет собой очень сложный физический процесс, который требует больших затрат энергии и сопровождается загрязнением окружающей среды. Для уменьшения затрат энергии и негативных экологических последствий при выплавке металла в последнее время широкое распространение получили электрические печи с подовым электродом, работающие на постоянном токе [1-7]. Оптимизация работы таких печей требует всестороннего и детального изучения протекающих в них процессов на разных стадиях выплавки металла. Эти исследования сопряжены с большими экспериментальными и теоретическими трудностями, которые обусловлены сложностью протекающих физических процессов (электрические и магнитные поля, сила Лоренца, объемные источники энергии, конвекция, теплообмен, химические реакции и т.д.) и экстремальными значениями параметров (высокие температуры, сильные электрические и магнитные поля). Поэтому компьютерное моделирование нашло широко применение в этой области, т.к. позволяет эффективно учесть электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы, протекающие в сталеплавильных электрических печах при выплавке металла [8, 9]. Решение таких сопряженных задач мультифизики выдвигает особые требования, которым отвечает пакет прикладных программ ANSYS.

Предполагается разработка и реализация алгоритма для анализа движения расплава металла в электросталеплавильной печи с целью управления интенсивностью и скоростью движения расплава. На первом этапе предполагается изучение электровихревых полей, вызывающих движение расплава металла. Полученное решение позволит оптимизировать процесс выплавки металла, снизить его энергоемкость и затраты на обслуживание оборудования.

1. Физическая постановка задачи. Примерная схема электрической печи, работающей на постоянном токе с двумя электродами приведена на рис. 1. Здесь 1 – огнеупорная футеровка, 2 – жидкий металл, 3 – электроды, 4 – электрическая дуга между верхним электродом и поверхностью металла, 5 – шлак на поверхности металла. Будем считать, что печь имеет осесимметричную форму и круглые электроды так же расположены осесимметрично.

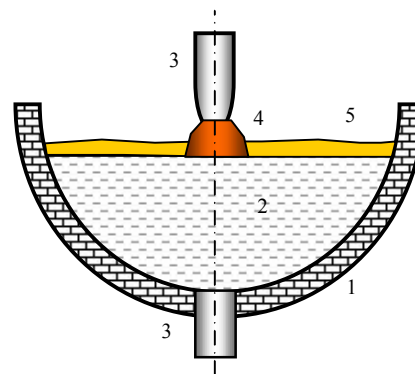


Рис. 1

Т.к. вся конструкция имеет осевую симметрию, то и протекающие в ней физические процессы будут обладать осевой симметрией.

Рассмотрим гидродинамические и электромагнитные процессы, протекающие в такой печи. Предположим, что металл в печи уже расплавлен и на электроды подано некоторое постоянное напряжение, положительное на нижний и отрицательное на верхний электрод. На электроды подается напряжение $U = 500 - 1000$ В. Под действием приложенного к электродам напряжения, в жидком металле потечет ток (рис. 2). Линии электрического тока, отмеченные символом j , будут лежать в меридиональных сечениях, как показано на рис. 2. Из закона полного тока для любого попереч-

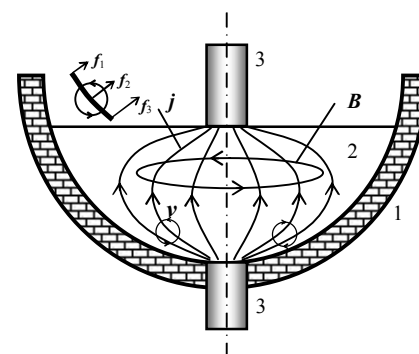


Рис. 2

ного сечения печи $I = \int_S \vec{j} d\vec{S} = const$, где S – площадь

поперечного сечения пода печи на некотором уровне, и хода линий тока, можно сделать вывод, что плотность тока должна убывать при удалении от оси симметрии [10].

Этот ток создает осесимметричное магнитное поле, вектор магнитной индукции которого будет лежать в плоскости, перпендикулярной оси симметрии, т.е. в горизонтальной плоскости. Линии магнитной индукции (они отмечены символом \vec{B}) будут концентрическими окружностями, перпендикулярными линиям электрического тока.

На проводник с током в магнитном поле действует сила Ампера с объемной плотностью $\vec{f}_e = [\vec{j}, \vec{B}]$.

Эта сила перпендикулярна плотности тока \vec{j} и вектору магнитной индукции \vec{B} , а ее направление согласовано с направлением этих векторов по правилу правого винта. Для рассматриваемой схемы сила \vec{f}_e будет направлена к оси симметрии и лежать в меридиональной плоскости. Она имеет две составляющие: радиальную и осевую. Радиальная составляющая направлена к оси симметрии, а осевая составляющая направлена к противоположному электроду. Радиальная составляющая вызывает поперечное сжатие проводника, так называемый пинч-эффект. Выделим небольшой кусочек жидкого проводника вдоль линии тока слева от электрода (рис. 2). На разные части этого кусочка будет действовать разная удельная сила, уменьшающаяся при удалении от оси симметрии ($f_1 < f_2 < f_3$). Эта сила сообщает выделенному элементу поступательное и вращательное движение, т.к. создает вращающий момент. Под действием этой силы элемент будет перемещаться как целое к оси симметрии и поворачиваться против часовой стрелки. Но т.к. проводник жидкий, то в нем возникнет вихревое течение, как указано на рис. 2. Необходимым условием возникновения вихревого течения ($\text{rot } \vec{v} \neq 0$) является вихревой характер электромагнитной силы \vec{f}_e : необходимо, чтобы $\text{rot } \vec{f}_e \neq 0$. Такой характер течения как раз и наблюдается при пространственной неоднородности электрического тока.

В данном примере, как и во многих других подобных случаях, вихревое течение жидкости возникает при подводе электрического тока к проводящей жидкости в отсутствие внешних магнитных полей при пространственной неоднородности электрического тока. Электрический ток в жидкости создает собственное магнитное поле, которое при определенных условиях вызывает вихревое движение жидкости [8, 9].

2. Математическая постановка задачи. Основные допущения, принятые при описании процессов в электрической сталеплавильной печи:

- среда считается немагнитной (ее магнитная проницаемость мало отличается от единицы; известно, что ферромагнетики имеют точку Кюри, при нагревании выше которой они становятся парамагнетиками; для железа точка Кюри составляет 760 °С);
- среда является хорошим проводником и ее диэлектрической проницаемостью можно пренебречь;

- при небольших частотах переменного тока можно пренебречь током смещения, процесс считать квазистационарным;
- конвективным током, вызванным движением среды, по сравнению с током проводимости можно пренебречь;
- физические характеристики среды (проводимость, коэффициенты вязкости и теплопроводности и т.д.) предполагаются однородными и изотропными и не зависят от температуры и давления;
- тепловая конвекция может быть вызвана неоднородным джоулевым нагревом и учитывается зависимостью плотности среды от температуры и давления по заданному закону $\rho = \rho(p, T)$;
- нагревом среды из-за вязкости (вязкая диссипация энергии) можно пренебречь по сравнению с джоулевым нагревом;
- химические реакции не учитываются;

Система уравнений магнитной гидродинамики для принятых допущений имеет вид уравнение импульсов

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g} + \frac{1}{\rho} [\vec{j}, \vec{B}]; \quad (1)$$

перенос тепла

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) T \right) = \chi \Delta T + \frac{j^2}{\sigma}; \quad (2)$$

перенос примеси

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) C = D \Delta C; \quad (3)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0; \quad (4)$$

уравнения Максвелла

$$\nabla \vec{B} = 0; \quad (5)$$

$$[\nabla, \vec{H}] = \vec{j}; \quad (6)$$

$$[\nabla, \vec{E}] = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (7)$$

$$\nabla \vec{D} = \rho_e; \quad (8)$$

уравнения связи (материальные уравнения и закон Ома для движущейся среды)

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{j} = \sigma (\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}]); \quad (9)$$

закон сохранения заряда

$$\nabla \vec{j} = 0; \quad (10)$$

уравнение состояния среды в виде зависимости

$$\rho = \rho(T). \quad (11)$$

Здесь \vec{v} – скорость жидкости, ρ – плотность, p – давление, g – ускорение свободного падения, ν – коэффициент кинематической вязкости, \vec{j} – плотность тока, \vec{B} – индукция магнитного поля, T – абсолютная температура, c – удельная теплоемкость среды, χ – коэффициент теплопроводности, σ – удельная проводимость, C – концентрация примеси, D – коэффициент диффузии, ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, \vec{E} –

напряженность электрического поля, ρ_e - объемная плотность электрических зарядов. В уравнении (2.1) учтены следующие силы: $-\rho^{-1}\nabla p$ - сила давления, $v\Delta\vec{v}$ - сила вязкого трения, \vec{g} - сила тяжести, $\rho^{-1}[\vec{j}, \vec{B}]$ - электромагнитная сила Лоренца.

Протекающие в электрической печи процессы при выплавке стали нестационарные. Однако они протекают достаточно медленно и с хорошей точностью могут описываться в квазистационарной или просто стационарной постановке. Для стационарных процессов определяющие уравнения принимают вид:

уравнение импульсов

$$(\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + v\Delta\vec{v} + \vec{g} + \frac{1}{\rho}[\vec{j}, \vec{B}]; \quad (12)$$

перенос тепла

$$\rho c(\vec{v}\nabla)T = \chi\Delta T + \frac{j^2}{\sigma}; \quad (13)$$

перенос примеси

$$(\vec{v}\nabla)C = D\Delta C; \quad (14)$$

уравнение неразрывности

$$\nabla(\rho\vec{v}) = 0; \quad (15)$$

уравнения Максвелла

$$\nabla\vec{B} = 0; \quad (16)$$

$$[\nabla, \vec{H}] = \vec{j}; \quad (17)$$

$$[\nabla, \vec{E}] = 0; \quad (18)$$

$$\nabla\vec{D} = \rho_e; \quad (19)$$

уравнения связи (материальные уравнения и закон Ома для движущейся среды)

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}, \quad \vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \\ \vec{j} = \sigma(\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}]); \quad (20)$$

закон сохранения заряда

$$\nabla\vec{j} = 0; \quad (21)$$

уравнение состояния среды в виде зависимости

$$\rho = \rho(T). \quad (22)$$

Следующие условия выражают законы сохранения энергии при переходе через поверхность раздела сред:

для электрического поля

$$E_{n1} = E_{n2}, \quad D_{n1} - D_{n2} = \rho_e; \quad (23)$$

для магнитного поля

$$B_{n1} = B_{n2}, \quad \vec{n} \times \vec{B} = \vec{n} \times (B_n\vec{n} + B_\tau\vec{\tau}) = B_\tau = 0; \quad (24)$$

для плотности тока на границе с изолятором и в сечении электрода

$$j_n = 0, \quad j_\tau = j_0 = I/S; \quad (25)$$

для искусственное граничное условие на границе расчетной области [11]

3. Стратегия решения. Рассматриваемая задача не имеет аналитического решения поэтому решалась численно. По результатам анализа численных методов решения был выбран метод конечных элементов [12] и система ANSYS [13-15]. Задача относится к классу сопряженных и стратегия решения такой задачи состоит из следующих этапов:

1-й этап – моделирование электромагнитных полей;

2-й этап – моделирование электровихревых течений;

3-й этап – моделирование электровихревых течений с учетом теплообмена и конвекции.

Такая последовательность объясняется требованиями к проведению последовательного сопряженного анализа в системе ANSYS [13, 14]. Основная идея данного анализа состоит в том, чтобы связать две области (дисциплины) путем задания результатов решения каждого этапа анализа в качестве нагрузок для последующего этапа анализа. Узловые значения расчетных параметров на каждом этапе задаются в качестве нагрузок “сила на тело” в последующем анализе напряжений. Результатами электромагнитной задачи являются значения составляющих по осям X, Y, Z электромагнитной силы и плотности магнитного потока, найденные для каждой узловой точки расчетной области. На основании этих данных можно рассчитать составляющие скорости движения расплава (2-й этап), вызванные электромагнитным воздействием. Кроме того результатом решения 1-го этапа является количество тепла на единицу объема, полученное в каждой узловой точке. Значения этой теплоты можно использовать как исходные данные для решения тепловой задачи (3-й этап), решением которой является распределение скоростей течения внутри расплава. После чего, задавая найденные значения температуры в узловых точках, и скорость движения расплава, без учета теплообмена и конвекции, и условия теплообмена на стенках расчетной области можно выполнить расчет гидродинамической задачи. Результатом решения этой задачи являются поля скоростей расплава.

Моделирование электромагнитных полей в системе ANSYS реализуется последовательно в два этапа. На первом этапе решается задача определения плотности электрического тока во всех токопроводящих элементах, включая расплав. Для этого выполняется решение системы уравнений Максвелла методом скалярного электрического потенциала [13] на основании соотношения

$$\vec{E} = -grad\varphi; \quad (26)$$

где φ — электрический потенциал. Плотность тока определяется из уравнения (9). В качестве граничных условий задается начальное значение тока на границах электродов и токопроводящая область расплава. При решении используется конечный элемент Plane 13 и Solid 5 для осе симметричного и пространственного моделирования соответственно.

Второй этап состоит в определении магнитного поля в расчетной области. Поскольку в модели имеются ферромагнитные области, образующие замкнутые контуры (например, корпус), то для решения используется обобщенный метод скалярного магнитного потенциала (General Scalar Potential). В этом случае искомый вектор напряженности магнитного поля \vec{H} представляется в виде суммы двух составляющих [13].

$$\vec{H} = \vec{H}_g - grad\psi; \quad (27)$$

где \vec{H}_g - некоторое приближенное значение напряженности поля (оно всегда удовлетворяет уравнению (6), а ψ - обобщенный магнитный потенциал.

4. Численное решение задачи. Для расчета используются пакеты Comsol и ANSYS. Предварительно проводятся расчет модельных задач, на которых отработывается методика решения, связанная с выбором граничных условий на границах расчетной области,

влиянием границ расчетной области на параметры течения в исследуемой зоне, выбором расчетной сетки и конечных элементов, вида анализа, типа решателя. На следующем этапе решается сопряженная задача мультифизики: электромагнитный, гидродинамический и тепловой анализ. Пакеты Femlab и ANSYS с модулем CFX позволяют рассчитывать процессы, в которых поведение жидкости описывается уравнениями магнитной гидродинамики, в 2D и 3D постановке [13-15].

Для отработки решения предварительно была рассмотрена задача имеющая аналитическое решение. Имеется два очень длинных цилиндрических коаксиальных электрода, по которым текут токи I_1 и I_2 в противоположных направлениях. Радиус внутреннего электрода R_1 , а внутренний и наружный радиусы второго электрода R_2 и R_3 . Снаружи расположена тонкая цилиндрическая оболочка радиусом R_4 из немагнитного материала. Было рассчитано индукцию магнитного поля и напряженность электрического поля в объеме, ограниченном внешней оболочкой. А также оценено влияние граничных условий на границах расчетной области на параметры внутри области. В результате был получен метод численного решения совпадающий с теоретическим.

Рассмотрим модельную задачу (Рис. 3) в которой рассчитаем электрические и магнитные характеристики для осесимметричного объемного проводника по форме и размерам близким к реальной электрической печи. Здесь расплав металла заменен на прямоугольный токопроводящий цилиндр. Геометрические размеры расчетной области приведены на рис. 1. Расчетная область в силу осевой симметрии задачи составляет половину реальной области. Здесь 1 и 2 – электроды, 3 – железный цилиндр, 4 - окружающая среда (воздух). Исходные данные: сила тока через электроды $I = 80$ кА, удельная проводимость жидкого железа $\sigma_1 = 0,9 \cdot 10^6$ (Ом·м)⁻¹, удельная проводимость электродов $\sigma_2 = 0,2 \cdot 10^6$ (Ом·м)⁻¹, относительная магнитная проницаемость железа и электродов $\mu = 1$, относительная магнитная проницаемость среды $\mu = 1$, относительная диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = 1$.

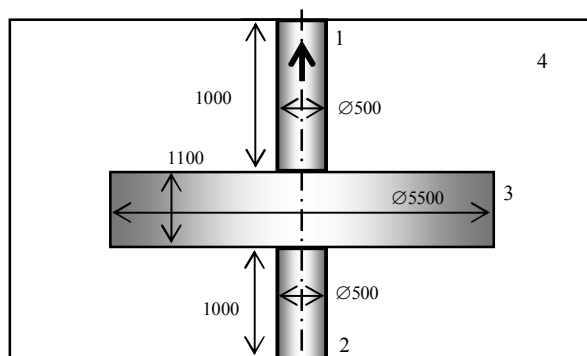


Рис. 3

Для получения решения использовались следующие граничные условия:

- на торцах электродов задается плотность тока, или значения потенциалов, соответствующее исходной плотности тока,
- на боковых поверхностях электродов и цилиндра задаются условия непрерывности нормальной компоненты магнитного поля,
- на границах расчетной области задаются условия продолжения полей или условия на бесконечности.
- на оси симметрии расчетной области ставились условия осевой симметрии для рассчитываемых величин.

Расчеты проводились с использованием различных видов анализа на различных сетках. Выявлено существенное влияние на результаты расчетов размеров расчетной сетки и формы конечных элементов. По предварительному анализу было определено оптимальное разбиение на элементы, а также их форма в виде четырехугольников с 4 узлами. Расчетная область разбивалась на элементы неравномерно: в области подового электрода, где большие градиенты электромагнитных параметров элементы расположены густо и имеют небольшие размеры. На остальных участках расчетной области, где градиенты параметров не столь существенны, элементы расположены реже и имеют большие размеры.

Исследовано влияние граничных условий на искусственных границах расчетной области на параметры в центральной зоне. Выяснено несущественное влияние изменения граничных условий с магнитной изоляцией по сравнению с неотражающими граничными условиями, и составило порядка 0,7-0,9 %. На рис. 4 приведено векторное и контурное поле силы Лоренца около подового электрода (анода). Результаты расчетов подтверждают факт, что сила Лоренца в таких печах является определяющей при возникновении электровихревого течения. Данные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными (повышенный износ футеровки).

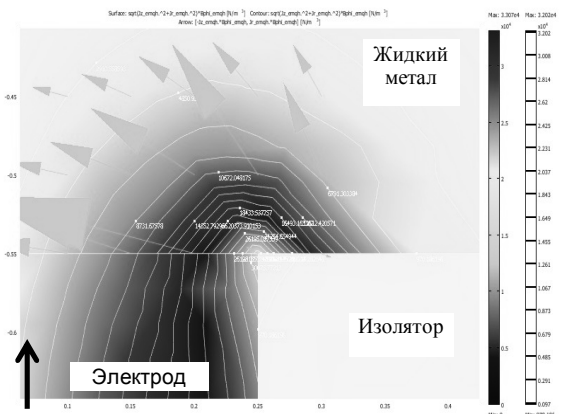


Рис. 4

Аналогичные расчеты были проведены в системе FEMLAB (рис. 5). Результаты расчетов в ANSYS сравнивались с расчетами в FEMLAB. Результатом сравнения было хорошее совпадение расчетов разными методами и пакетами, что говорит о надежности методов и достоверности результатов.

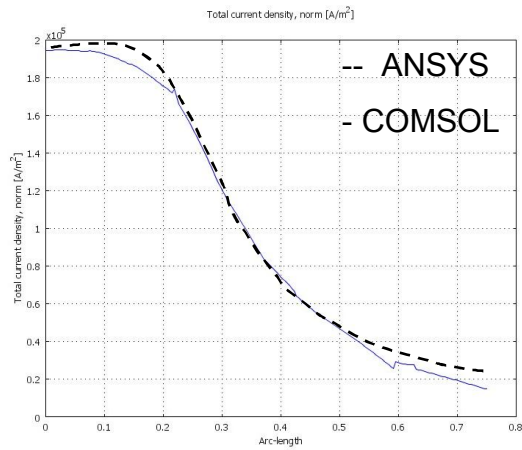


Рис. 5

Ниже приведены некоторые результаты расчетов, полученные для модельной задачи с использованием отработанных методов расчета. На рис. 6 изображено распределение плотности тока по всей модели и около анода, а также распределения модуля магнитной индукции по всей модели и в области подового электрода. На рис. 7 изображено поле модуля ротора (вихря) силы Лоренца в области электродов, который позволяет оценить интенсивность сил, вызывающих вихревое движение около анода.

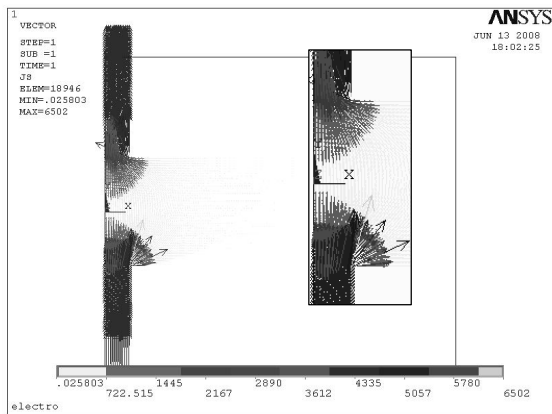
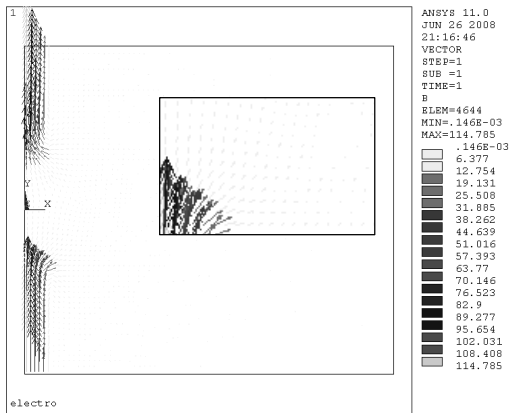


Рис. 6

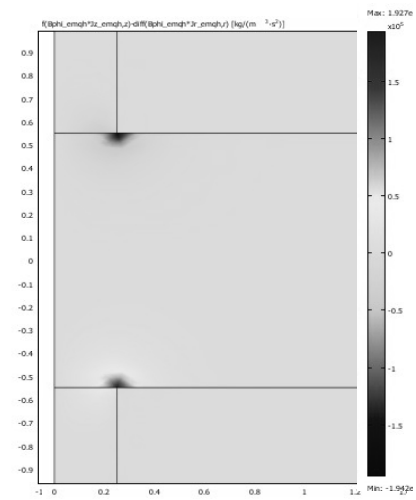


Рис. 7

Результаты расчетов подтверждают факт, что сила Лоренца в таких печах является определяющей при возникновении электровихревого течения.

Заключение. Рассмотрены физические процессы в электрической печи для выплавки стали. Показано, что пространственное распределение тока в печи приводит к электровихревому движению расплавленного металла. Для описания процессов в электрической печи адаптирована модель магнитной гидродинамики, которая учитывает пространственное распределение тока, электрического и магнитного полей, температуры, силу Лоренца, джоулево тепло и конвекцию. Разработана стратегия решения поставленной сопряженной задачи. В осесимметричной и пространственной постановке поставлена и решена модельная задача, на которой отработаны методы расчета электромагнитных полей в ANSYS, оценено влияние условий на границах расчетной области на параметры в центральной зоне. По результатам расчетов определен оптимальный тип конечных элементов, размеры сетки и вид анализа. Результаты расчетов в ANSYS сравнивались с аналитическими предположениями, экспериментальными данными и расчетами в COMSOL. Хорошее совпадение расчетов разными методами и пакетами говорит о надежности методов и достоверности результатов.

Выводы

Из проведенных расчетов можно сделать следующие выводы. Предложенные модели и методы позволяют рассчитать электромагнитные и силовые поля для модели электрической печи. Установлено, что максимальные значения индукции магнитного поля, плотности тока и силы Лоренца локализованы в непосредственной близости анода (подового электрода) на расстоянии порядка радиуса электрода. При удалении от анода эти величины быстро убывают. По оценкам объемная плотность силы Лоренца составляет около 30% силы тяжести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Беат (ed), "Standard Handbook for Electrical Engineers, 11th Ed.", McGraw Hill, New York 1978, ISBN 0-07-020974-X.