

Враховуючи отриманий результат і підставляючи вихідні дані в розрахункову формулу (4), визначаємо інтенсивність зносу опори голкового циліндра:

$$J = 0,03 \cdot 1 \cdot 2,8 \cdot 0,8^{1+\frac{4,15}{2 \cdot 1,2+1}} \cdot (1,6 \cdot 10^6)^{\frac{2 \cdot 1,2 \cdot 4,15}{2 \cdot 1,2+1}-1} \cdot (0,1 \cdot 10^{-2})^{\frac{1,2 \cdot 4,15}{2 \cdot 1,2+1}} \cdot \left(\frac{3 \cdot 0,09}{6,6 \cdot 10^3}\right)^{4,15} = 6,4 \cdot 10^{-12}.$$

Знос пари тертя підшипника ковзання циліндрового зубчастого колеса голкового циліндра круглов'язальної машини КО-2 визначається з умови [1,5]:

$$U = I \cdot L, \quad (13)$$

де U – знос пари тертя; I – інтенсивність зносу; L – шлях тертя, $L = Vt$, де t – тривалість роботи пари тертя.

Прийнявши двозмінну роботу машини при восьмигодинному робочому дні, шлях тертя за місяць роботи машини L_M (24 робочих днів), складе

$$L_M = V \cdot 2 \cdot 8 \cdot 24,$$

де $V = V_{II} \frac{D}{D_{II}} = 0,9 \frac{0,59}{0,45} = 1,18 \text{ м/с} = 1,18 \cdot 3,6 \cdot 10^3 = 4248 \text{ м/год.}$

Тоді $L_M = 4248 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 24 = 1,63 \cdot 10^6 \text{ м.}$

Отже, знос опори голкового циліндра машини КО-2 за місячний термін роботи складе:

$$U_M = I \cdot L_M = 6,4 \cdot 10^{-12} \cdot 1,63 \cdot 10^6 = 10,43 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 10,43 \cdot 10^{-3} \text{ мм} = 0,01 \text{ мм.}$$

Знос опори протягом 1 року U_1 , 5-ти років U_5 і 10-ти років U_{10} експлуатації машини КО-2 відповідно складе: $U_1 = 0,125 \text{ мм}$; $U_5 = 0,625 \text{ мм}$; $U_{10} = 1,25 \text{ мм.}$

Аналізуючи результати досліджень, можемо зробити такі висновки:

- параметри конструкцій приводу суттєво впливають на знос опори голкового циліндра круглов'язальної машини і як наслідок на якість полотна, що виробляється.

Література

1. Крагельский И. В. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2 т / Крагельский И. В. – М. : Машиностроение, 1978–1979.
2. Піпа Б. Ф. Деталі машин / Піпа Б. Ф., Хомяк О. М., Марченко А. І. – К. : КНУТД, 2011. – 358 с.
3. Машини кругловязальные типа КО-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Черновцы. 1992. – 86 с.
4. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. – Киев, «Наукова думка», 1975. – 704 с.
5. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / Крагельский И. В., Добыч М. Н., Колобаев В. С. – М., «Машиностроение», 1977.
6. Сердюк В. П. Расчет приводов машин легкой промышленности / Сердюк В. П. – К., «Техника», 1978. – 232 с.

Надійшла 4.8.2011 р.

УДК 537.84: 669.001: 519.63

О.В. КАЗАК, А.Н. СЕМКО
Донецкий национальный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОДОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Робота присвячена моделюванню електровихрових течій в металургійній печі постійного струму з подовим електродом. Наводиться постановка задачі, фізична та математична модель процесів що протікають. Розроблений алгоритм розв'язання та отримані результати полів електровихрових течій у розплаві сталі, отримані за допомогою програмно-обчислювального комплексу ANSYS та COMSOL.

Work is devoted to modelling electro vortical field in the of DC EAF with bottom electrode. Statement of a problem, physical and mathematical model of proceeding processes is resulted. The algorithm of the decision of a problem is developed. The result of electro vertical flow fields in molten metal, executed by programmatic-calculable complex ANSYS and COMSOL is received.

Ключевые слова: металлургическая печь, электровихревое течение.

Введение. Металлургическая промышленность является ведущим, а во многом и определяющим направлением развития мирового производства и экономики [1]. Приготовление стали, особенно сталей высокого качества, представляет собой сложный физический процесс, который требует больших затрат

енергии и сопровождается загрязнением окружающей среды. Одним из наиболее перспективных направлений в развитии металлургического производства в мировом масштабе, позволяющим снизить затраты и экологическое загрязнение окружающей среды, является использование электрометаллургических печей постоянного тока с подовым электродом [2, 3].

Возрастающие объемы производимой стали выдвигают новые требования к надежности металлургических агрегатов, что ставит новые задачи перед инженерами разработчиками устройств для приготовления стали, в частности электродуговых сталеплавильных печей постоянного тока [4, 5].

Конструктивной особенностью дуговых печей постоянного тока является наличие подового электрода, который вмонтирован в днище подины и является анодом. Являясь одним из основных элементов печи, подовый электрод служит для бесперебойного подвода тока к переплавляемому металлу. Эксплуатация таких печей показала повышенный износ футеровки в окрестности подового электрода. В среднем подовый электрод служит в несколько раз меньше чем все основные элементы печи, и выходит из строя через 300 – 400 плавов [6]. Это приводит к длительному простоя печи, дорогостоящей и технически сложной замене подины и самого подового электрода. Причинами повышенного износа подового электрода и футеровки вблизи электрода являются [6]:

- размывание футеровки вокруг электрода потоками расплавленного металла, вызванными конвекцией и электромагнитными силами;
- перегрев расплава;
- джоулево тепло, выделяющееся от протекающего по электроду тока;
- физико-химическое взаимодействие расплава с материалом электрода;
- микродуги между электродом и переплавляемым металлом;

Исследование объективной причины, вносящей определяющий вклад в повышенный износ футеровки, 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 [3, 7-10]. Решение таких сопряженных задач мультифизики выдвигает особые требования, которым отвечают пакет прикладных программ ANSYS и COMSOL.

Предполагается разработка и реализация модели 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. На втором этапе расчет гидродинамических параметров, используя результаты первого этапа. Полученное решение позволит оптимизировать процесс выплавки металла, снизить его энергоемкость и затраты на обслуживание оборудования.

1. Физическая постановка задачи. Примерная схема электрической печи разработки фирмы Danieli, работающей на постоянном токе с двумя электродами приведена на рис. 1 [11]. 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 расположены симметрично. Так как вся конструкция осесимметричная, 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 электроды. В реальных печах 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 \vec{j} , будут лежать в меридиональных сечениях, как показано на рис. 2. Из закона полного тока для любого поперечного сечения печи $I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = const$, 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.

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 Лоренца с объемной плотностью $\vec{f}_e = [\vec{j}, \vec{B}]$. Эта сила перпендикулярна плотности тока \vec{j} и вектору магнитной индукции \vec{B} , направление которого определяется по правилу правого винта. Для рассматриваемой схемы сила \vec{f}_e будет направлена к оси симметрии и лежит 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, 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 ($\text{rot } \mathbf{v} \neq 0$) является вихревой характер электромагнитной силы \mathbf{f}_e : $\text{rot } \mathbf{f}_e \neq 0$. Такой характер течения как раз и наблюдается при пространственной неоднородности электрического тока.

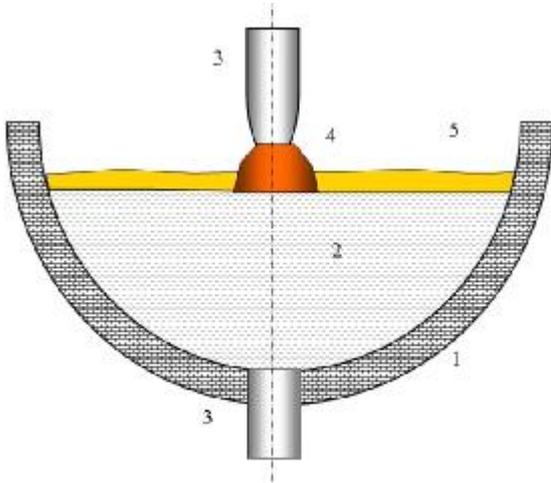


Рис. 1

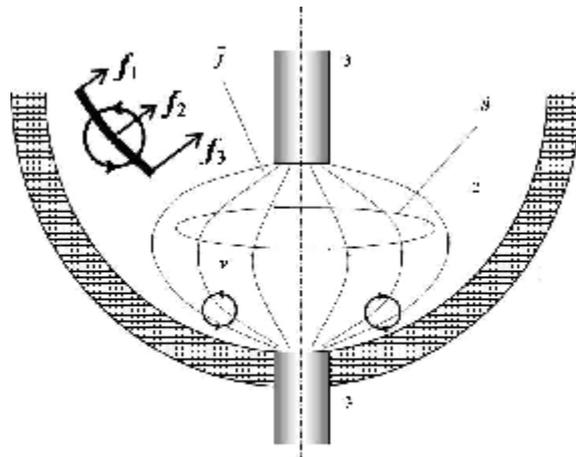


Рис. 2

В данном примере, как и во многих других подобных случаях, вихревое течение расплава возникает при подводе электрического тока к расплаву в отсутствии внешних магнитных полей при пространственной неоднородности электрического тока. Электрический ток в расплаве создает собственное магнитное поле, которое при определенных условиях вызывает вихревое движение расплава [12].

2. Математическая постановка задачи. Примем следующие основные допущения для описания процессов в электрической сталеплавильной печи постоянного тока с подовым электродом:

- среда считается немагнитной (ее магнитная проницаемость мало отличается от единицы; известно, что точка Кюри для железа составляет 760 °С);
- среда является хорошим проводником и ее диэлектрической проницаемостью можно пренебречь;
- процесс считается стационарным;
- 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 зависят только от температуры;
- тепловая конвекция может быть вызвана неоднородным джоулевым нагревом и учитывается зависимостью плотности среды от температуры и давления по заданному закону $\mathbf{r} = \mathbf{r}(p, T)$;
- нагревом среды из-за вязкости (вязкая диссипация энергии) можно пренебречь по сравнению с джоулевым нагревом;
- химические реакции не учитываются.

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

$$(\mathbf{r} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{r} \nabla p + n \Delta \mathbf{v} + \mathbf{g} + \frac{1}{r} [\mathbf{r}, \mathbf{r}]; \quad (1)$$

перенос тепла

$$rc(\mathbf{r} \nabla) T = c \Delta T + \frac{j^2}{s}; \quad (2)$$

уравнение неразрывности

$$\nabla(\mathbf{r} \mathbf{v}) = 0; \quad (3)$$

уравнения Максвелла

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{B}} = 0; \quad (4)$$

$$[\nabla, \dot{\mathbf{H}}] = \dot{\mathbf{j}}; \quad (5)$$

$$[\nabla, \dot{\mathbf{E}}] = 0; \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{D}} = 0; \quad (7)$$

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

$$\dot{\mathbf{D}} = \epsilon \epsilon_0 \dot{\mathbf{E}}, \quad \dot{\mathbf{B}} = \mu \mu_0 \dot{\mathbf{H}}, \quad \dot{\mathbf{j}} = \mathbf{S} \left(\dot{\mathbf{E}} + \left[\dot{\mathbf{v}}, \dot{\mathbf{B}} \right] \right); \quad (8)$$

закон сохранения заряда

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{j}} = 0; \quad (9)$$

уравнение состояния среды в виде зависимости

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(T). \quad (10)$$

Здесь $\dot{\mathbf{v}}$ – скорость жидкости, \mathbf{r} – плотность, p – давление, $\dot{\mathbf{g}}$ – ускорение свободного падения, \mathbf{n} – коэффициент кинематической вязкости, $\dot{\mathbf{j}}$ – плотность тока, $\dot{\mathbf{B}}$ – индукция магнитного поля, T – абсолютная температура, c – удельная теплоемкость среды, \mathbf{C} – коэффициент теплопроводности, \mathbf{S} – удельная проводимость, ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, $\dot{\mathbf{E}}$ – напряженность электрического поля. В уравнении (1) учтены следующие силы: $-\mathbf{r}^{-1} \nabla p$ – сила давления, $\mathbf{n} \Delta \dot{\mathbf{v}}$ – сила вязкого трения, $\dot{\mathbf{g}}$ – сила тяжести, $\mathbf{r}^{-1} [\dot{\mathbf{j}}, \dot{\mathbf{B}}]$ – электромагнитная сила Лоренца.

По предварительным оценкам движение расплава будет носить турбулентный характер. Так число Рейнольдса составит порядка 10^6 , что соответствует развитому турбулентному течению, поэтому для замыкания уравнений (1) и (3), описывающие гидродинамические процессы, использовалась стандартная $k - \epsilon$ модель турбулентности.

Задача решается при следующих граничных условиях:

для электрического поля

$$\dot{\mathbf{E}}_{n1} = \dot{\mathbf{E}}_{n2}, \quad \dot{\mathbf{E}}_{t1} = \dot{\mathbf{E}}_{t2}; \quad (12)$$

для магнитного поля

$$\dot{\mathbf{B}}_{n1} = \dot{\mathbf{B}}_{n2}, \quad \dot{\mathbf{B}}_{t1} = \dot{\mathbf{B}}_{t2}; \quad (13)$$

для плотности тока на границе с изолятором и в сечении электрода

$$\dot{\mathbf{j}}_n = 0, \quad \dot{\mathbf{j}}_t = \dot{\mathbf{j}}_0 = I/S; \quad (14)$$

условия прилипания на границе расплава (условия прилипания использовались как в соприкосновении расплава с футеровкой, так и со шлаком на верхней поверхности расплава. Такое приближение справедливо, т.к. вязкость шлака на поверхности расплава значительно выше вязкости расплава)

$$\dot{\mathbf{v}} = 0; \quad (15)$$

3. Стратегия решения. Рассматриваемая задача не имеет аналитического решения, поэтому решалась численно. По результатам анализа численных методов решения был выбран метод конечных элементов [13] и система ANSYS [14]. 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 [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 в последующем анализе. 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 джоулевого 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 поле скоростей и температур 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 с учетом конвекции. Результатом решения этой задачи является поле скоростей расплава при всех заданных силах.

4. Численное решение задачи. Для расчета используются пакеты ANSYS и COMSOL.

Предварительно были рассчитаны модельные задачи, на которых отработана 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 ANSYS и COMSOL позволяют рассчитывать процессы, в которых поведение жидкости описывается уравнениями магнитной гидродинамики, в 2D и 3D постановке [15-19].

Рассмотрим модельную задачу для осесимметричного объемного проводника по форме и размерам, близкого к реальной сталеплавильной печи (рис. 3). Рассматриваемая модель не имеет точного аналога промышленной электросталеплавильной печи, однако, имеет большое теоретическое значение, для понимания процессов протекающих в расплаве металла, а также широко используется в целом ряде работ как первое приближение к промышленным печам [3, 7-10]. Здесь расплав металла для простоты имеет форму прямоугольного токопроводящего цилиндра. Геометрические размеры расчетной области соответствуют размерам реальной печи и приведены на рис. 3. 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 $\epsilon = 1$.

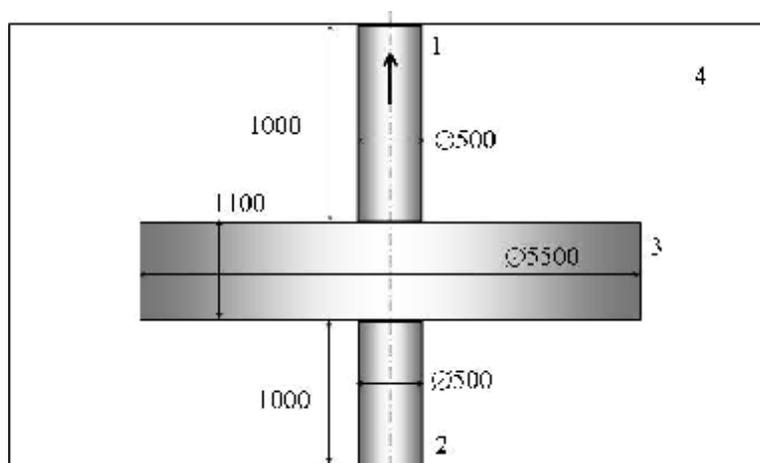


Рис. 3

Расчеты проводились при следующих граничных условиях:

- на торцах электродов задается плотность тока, или значения потенциалов, соответствующее исходной плотности тока (14);
- на боковых поверхностях электродов и цилиндра задаются условия непрерывности нормальной компоненты электрического и магнитного поля (12)- (13);
- на границах расчетной области задаются условия продолжения электромагнитных полей или условия на бесконечности (12)- (13);
- условие прилипания на боковых поверхностях электродов и цилиндра для задачи гидродинамики (15);
- 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.

В результате предварительных расчетов исследовано влияние граничных условий на искусственных границах расчетной области на параметры в центральной зоне. Выяснено незначительное влияние разных граничных условий (магнитная изоляция и неотражающие условия) на параметры в центральной зоне. Различие результатов составило порядка 0,7-0,9 % [15-17].

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, а ее значение составило в среднем 30 % от объемной силы тяжести [18, 19]. Данные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными по повышенному износу футеровки.

На следующем этапе, согласно стратегии решения задачи, были смоделированы гидродинамические процессы в расплаве металла в осесимметричной постановке. На рис. 5 приведены гидродинамические поля модуля скорости, вектора скорости и линии тока для всего объема расплава, а на рис. 6 – в окрестности подового электрода.

Как видно из графиков в расплаве возникает интенсивное вихревое движение. Два симметричных относительно середины модели вихря образуются в области каждого из электродов и там имеют максимальную скорость (см. рис. 6). Поток расплава на оси симметрии восходящий для подового электрода как показано на рис. 6 и направлен вниз для верхнего электрода (катода). Достигая середины объема расплава, поток устремляется вдоль симметрии объема расплава, а затем в противоположную сторону. Максимальная скорость вихревого движения наблюдается на оси электродов и достигает 0,1 м/с. Скорость расплава у торца электродов и в частности анода возле футеровки около 0,05 м/с.

На рис. 7 приведен график распределения касательной составляющей скорости движения расплава на границе вязкого подслоя у торца анода. Как известно, эта скорость характеризует силу вязкого трения в области подового электрода со стороны движущегося потока. На графике видно многократное возрастание значения скорости потока в непосредственной близости от подового электрода, что косвенно подтверждает теоретическое предположения об определяющем воздействии движущегося расплава на повышенный износ футеровки в этой области.

Аналогичные расчеты были проведены в системе COMSOL. Результаты расчетов в ANSYS сравнивались с расчетами в COMSOL. Отмечено хорошее совпадение расчетов разными методами и пакетами, что говорит о надежности методов и достоверности результатов [15-19].

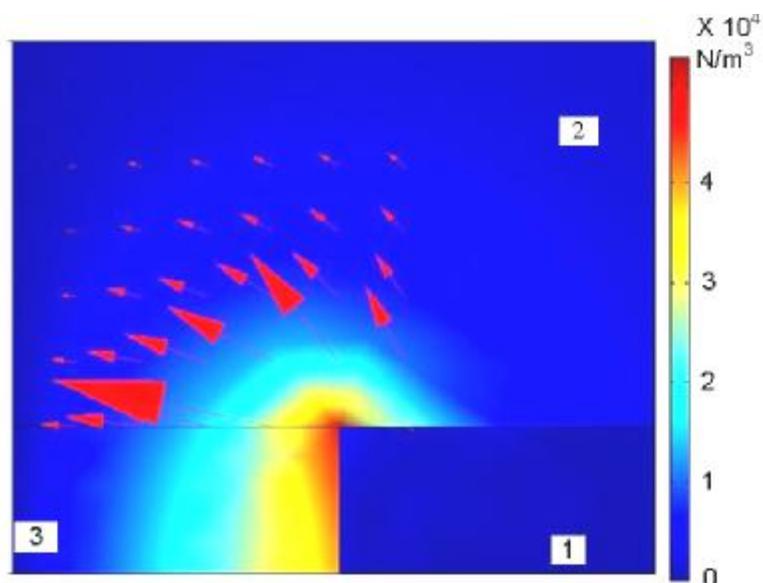


Рис. 4

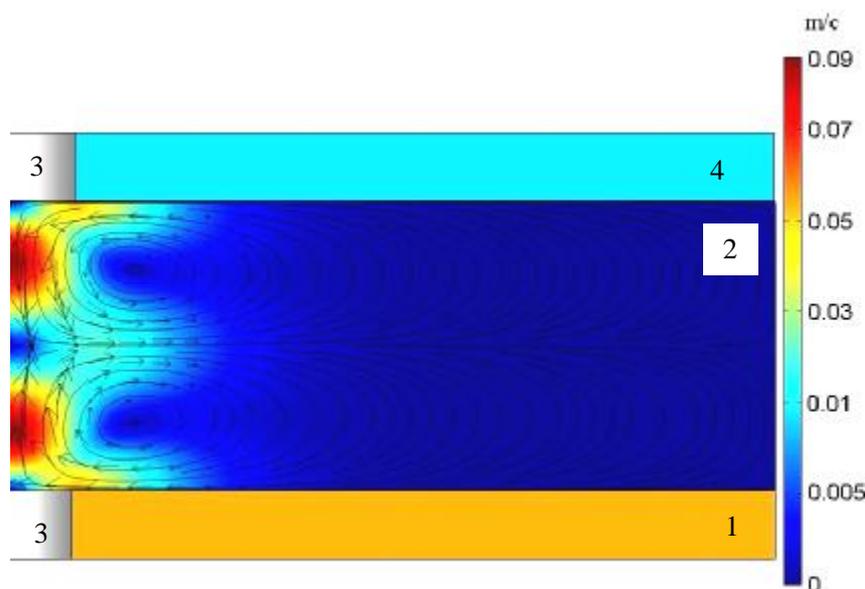


Рис. 5

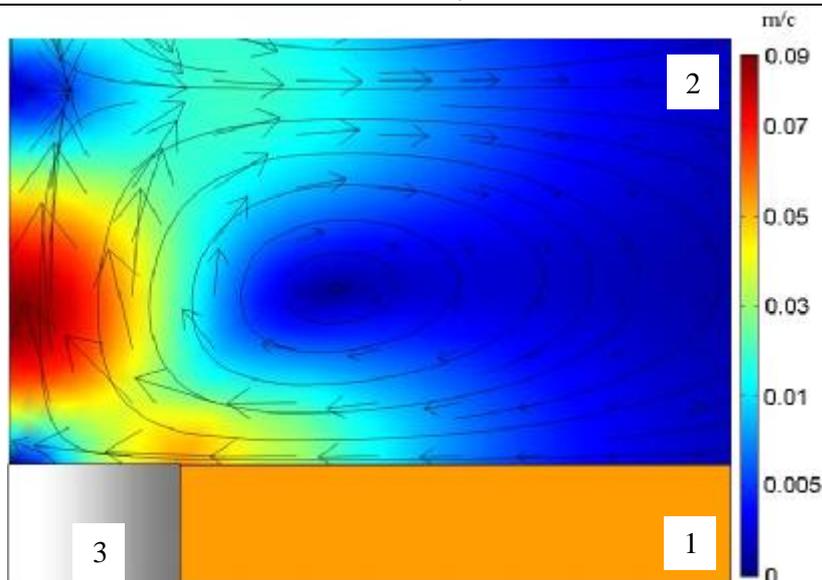


Рис. 6

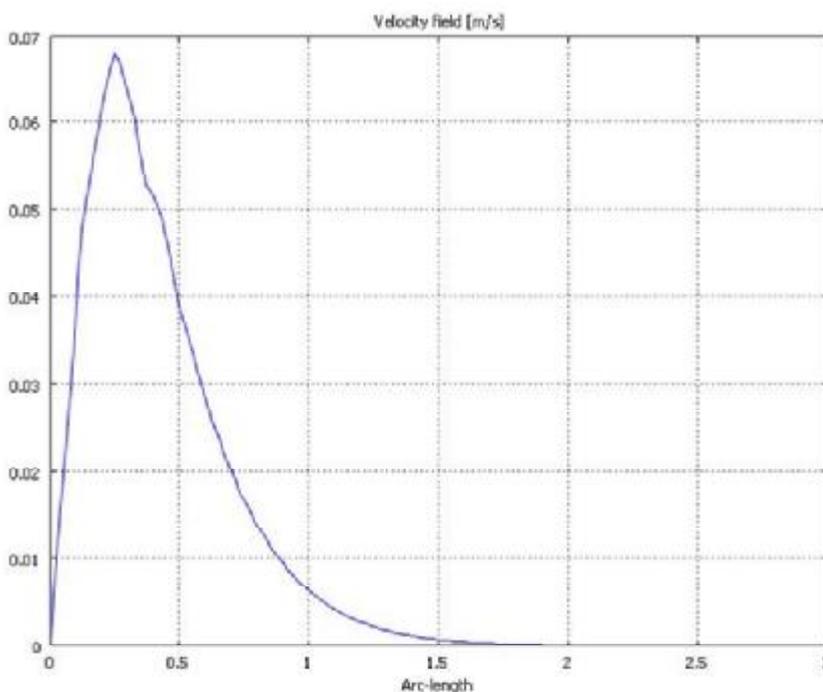


Рис. 7

Заключення. Рассмотрены физические процессы в дуговой сталеплавильной печи с подовым электродом. 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 и температуры, силу Лоренца, джоулево тепло, и конвекцию. Разработана стратегия решения поставленной сопряженной задачи при помощи пакетов мультифизики. В осесимметричной 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.

Показано, что 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 от электродов на расстояниях порядка радиуса электрода. При удалении от электродов эти величины быстро убывают. По оценкам объемная плотность силы Лоренца составляет около 30 % силы тяжести, а скорость электровихревого движения расплава 0,1 м/с.

1. <http://www.worldsteel.org>
2. Nekhamin S.M. DC arc melting furnaces / S.M. Nekhamin, A.G. Lunin, M.M. Krutyanskii, and A.K. Filippov // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2005, Vol. 46, No. 1. – P. 37-39.
3. Wang F. Numerical study of dc arc plasma and molten bath in dc electric arc furnace / F. Wang, Z. Jin, Z. Zhu // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2006, Vol 33, No 1. – P. 39-44.
4. Малиновский В. С. Технично-економические результаты промышленного освоения дуговых печей постоянного тока нового поколения / В. С. Малиновский, И. Б. Власова, В. Д. Малиновский // *Черная металлургия : бюл. НТИ*. – 2010, № 2. – С. 26–40.
5. Малиновский В. С. Дуговые печи постоянного тока нового поколения (ДППТНП) в сталеплавильном производстве / В. С. Малиновский // *Труды 6-го конгресса сталеплавиельщиков*. – 2001. – С. 213–220.
6. Зайцев В. А. Подовые электроды дуговых печей постоянного тока / В. А. Зайцев, Л. Б. Медовар // *СЭМ*. – 2009, № 2. – С. 3–8.
7. Ячиков И. М. Моделирование электровихревых течений в ванне дуговой печи постоянного тока : [монографія] / Ячиков И. М., Карандаева О. И., Ларина Т. Л. – Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 234 с.
8. Ushio M. Mathematical modelling of flow field and heat transfer in high-current arc discharge / M. Ushio, J. Szekely, and C.W. Chang // *Ironmaking and Steelmaking*. – 1981, No. 6. – P. 279-286.
9. Szekely, J. Heat-transfer fluid flow and bath circulation in electric arc furnaces and dc plasma furnaces / J. Szekely, J. McKelliget and M. Choudhary // *Ironmaking and Steelmaking*. – 1983, Vol. 10, No.4. – P. 169-179.
10. Henning B. DC furnace containment vessel design using computational fluid dynamics / B. Henning, M. Shapiro and L.A. le Grange // *Proceedings: Tenth International Ferroalloys Congress; INFACON X: 'Transformation through Technology'* – 1 – 4 February 2004 Cape Town, South Africa. – P. 565-574.
11. <http://www.danieli.com>
12. Бояревич В. В. Электровихревые течения / [В. В. Бояревич, Я. Ж. Фрейберг, Е. И. Шилова и др.]. – Рига : Зинатне, 1985. – 315 с.
13. Trif D. Basics of fluid mechanics and introduction to computational fluid dynamics / D. Trif, T. Petrilă. – Boston: Springer Science Business Media Inc, 2005. – 438 p.
14. ANSYS Advanced analysis techniques guide ANSYS Release 10.0. – U.S.A. Canonsburg, august 2005. – 340 p.
15. Казак О. В. Моделирование электровихревых полей в металлургических печах / О. В. Казак, А. Н. Семко // *Математичне моделювання*. – 2009, № 2 (21). – С. 48–53.
16. Казак О. В. Электровихревые поля в сталеплавильных печах постоянного тока с подовым электродом / О. В. Казак, А. Н. Семко // *Вісник донецького національного університету. Сер. А. Природничі науки*. – 2010. – Вип. 1. – С. 118–125.
17. Kazak O. Modelling Vortex Fields in Metal Smelting Furnaces / O. Kazak, O. Semko // *The International Journal of Multiphysics*. Volume 4, Number 4, 2010 – P. 351-358.
18. Казак О. В. Электровихревые течения в осесимметричных сталеплавильных печах постоянного тока с подовым электродом / О. В. Казак, А. Н. Семко // *Вісник донецького національного університету. Сер. А. Природничі науки*. – 2010. – Вип. 2. – С. 116–122.
19. Казак О. В. Электровихревое движение расплава в печах постоянного тока с подовым электродом / О. В. Казак, А. Н. Семко // *Инженерно-физический журнал*. – 2011, Том 84 № 1. – С. 209–217.

Надійшла 6.7.2011 р.