

УДК 537.814

## ИССЛЕДОВАНИЕ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ТОКОНЕСУЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ВАННЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Ячиков И.М., д.т.н., профессор кафедры вычислительной техники и программирования*  
*Портнова И.В., инженер кафедры вычислительной техники и программирования (iragzt@mail.ru)*  
*Ларина Т.П., ст. преподаватель кафедры электротехники и электротехнических систем*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

**Аннотация.** При воздействии внешнего вертикального магнитного поля на токонесущий расплав, находящийся в ванне дуговой печи постоянного тока (ДППТ), возникают объемные электромагнитные силы, которые приводят его в движение. Возникающее течение металла и шлака в ванне дуговой печи может приводить к эффективному их перемешиванию, но может нести и отрицательные моменты, например связанные с повышением износа футеровки в районе подового электрода. Процессы кондукционного перемешивания в ванне ДППТ при выплавке металлов и сплавов остаются слабоизученными. Возникают как теоретические вопросы, связанные с характером течений в ванне под действием внешнего и собственного магнитных полей заданной напряженности, так и практические, связанные с отсутствием простых и надежных источников внешних магнитных полей. Целью данной работы является качественная апробация возможностей физической «прозрачной» модели, изучение на ней характера течений токонесущей жидкости под действием внешнего вертикального магнитного поля и анализ возможности перенесения результатов моделирования на процессы, протекающие в 5-т ванне промышленной дуговой сталеплавильной печи постоянного тока. Показана принципиальная возможность изучения характера течения токонесущего расплава под воздействием внешних магнитных полей на моделях с использованием неметаллических электропроводящих прозрачных жидкостей. В работе использовался водный раствор поваренной соли, который позволил с помощью видеосъемки провести оценку скорости жидкости на ее свободной поверхности и вблизи подового электрода. Проведено физическое моделирование влияния внешнего вертикального магнитного поля на характер течения токонесущей жидкости в ванне при различных комбинациях подключения подового электрода и разных токах, протекающих через ванну. Установлен характер течения токонесущей жидкости в ванне под действием внешнего вертикального магнитного поля при подключении центрального или смещенного от оси ванны подового электрода. Выявлено, что при смещении оси подового электрода от оси ванны средняя скорость вращения жидкости в горизонтальной плоскости увеличивается. Получена оценка значения напряженности вертикального магнитного поля (около 5 кА/м), при создании которого в ванне металла пятитонной сталеплавильной дуговой печи должно наблюдаться кондукционное перемешивание.

**Ключевые слова:** дуговая печь постоянного тока, токонесущий расплав, ванна дуговой печи, подовый электрод, напряженность магнитного поля, характер течения, объемные электромагнитные силы, скорость расплава.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-1-28-34

При воздействии внешнего магнитного поля на токонесущий расплав, находящийся в ванне дуговой печи постоянного тока (ДППТ), возникают объемные электромагнитные силы, которые приводят его в движение. Такое воздействие на металл и шлак может нести как положительные эффекты, связанные с кондукционным перемешиванием, интенсифицирующим протекание тепломассобменных процессов, так и отрицательные – возникновение интенсивных течений, вымывающих футеровку печи, сильное отклонение дуги от вертикали или характерное ее движение по поверхности расплава [1].

Кондукционное перемешивание металла в ванне ДППТ является перспективным процессом [2 – 7], однако оно практически не используется. Прежде всего, это связано с отсутствием эффективных с точки зрения энергопотребления управляемых источников внешних

магнитных полей, а также с недостаточно изученными вопросами характера течений в ванне ДППТ под действием магнитного поля заданной напряженности и конфигурации.

Один из возможных энергоэффективных способов кондукционного перемешивания связан с изменением напряженности магнитного поля в разных областях токонесущего расплава ванны от внешних проводников с током заданной конфигурации [8 – 10]. Внешнее вертикальное магнитное поле предлагается создавать шиной токоподвода к подовому электроду, выполненной в виде пространственной винтовой линии, имеющей один или несколько витков одного или разного диаметра или плоской спирали. Внутри винтовой линии может находиться сердечник из ферромагнитного материала, перемещающий который в вертикальном и (или) горизонтальном направлениях можно управлять изменением величины

напряженности магнитного поля в разных областях токонесущего расплава ванны [8, 9].

Теоретическое и экспериментальное изучение течения токонесущего расплава под действием собственных и внешних магнитных полей связано с серьезными, а в ряде случаев непреодолимыми сложностями [11–15]. Экспериментальное изучение структуры потоков жидкого металла – очень непростая задача даже в лабораторных условиях на «холодных», т. е. имеющих температуру плавления, близкую к комнатному значению, жидких металлах [16–18]. В частности, невозможно изучение общего характера магнитогидродинамических течений из-за непрозрачности металлов.

Более удобными, с точки зрения наблюдений, являются прозрачные токопроводящие жидкости. Однако встают проблемы, связанные с их низкой электропроводностью, например проводимость пресной воды –  $(2–5) \cdot 10^{-3} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ , морской воды –  $(3–5) \cdot 10^{-3} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ . Для сравнения: удельная проводимость жидкой стали –  $(0,6–0,9) \cdot 10^6 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ , жидкого олова при температуре плавления –  $2,1 \cdot 10^6 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ .

Низкая электропроводность подобных жидкостей не позволяет в моделируемой ванне обеспечить необходимые плотности тока, так как при его увеличении возникают и резко развиваются нежелательные побочные эффекты, такие как электролиз и нагрев. При исследовании электровихревых течений на «холодной» модели объемная электромагнитная сила (сила, действующая на единицу токонесущего объема жидкости) пропорциональна квадрату плотности тока, поэтому изучение таких течений на моделях с использованием неметаллических жидкостей практически невозможно [19].

При исследовании воздействия внешнего магнитного поля на токонесущий расплав объемную электромагнитную силу (ОЭМС) в произвольной точке можно записать как [2, 19]

$$\vec{f} = \mu_0 \vec{J} \vec{H}, \quad (1)$$

где  $\vec{J}$  – вектор плотности тока;  $\vec{H}$  – вектор напряженности магнитного поля, создаваемого внешними токами;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Из этого выражения видно, что при моделировании течения токонесущей жидкости, кроме плотности тока, на ОЭМС оказывает влияние значение напряженности внешнего магнитного поля. Отсюда возникает принципиальная возможность изучения течений, возникающих при кондукционном перемешивании на моделях с использованием неметаллических проводящих жидкостей.

Целью данной работы является исследование на физической «холодной» модели характера течения токонесущей жидкости в ванне ДППТ под действием внешнего вертикального магнитного поля.

Рассмотрим действие на токонесущий расплав, находящийся в ванне ДППТ, внешнего вертикального магнитного поля. Запишем выражение (1) через проек-

ции плотности тока и магнитного поля в цилиндрической системе координат, в которой ось  $z$  совпадает с осью ванны:

$$\vec{f} = \mu_0 (J_\phi H_z - J_z H_\phi) \vec{e}_r + \mu_0 (J_z H_r - J_r H_z) \vec{e}_\phi + \mu_0 (J_r H_\phi - J_\phi H_r) \vec{e}_z. \quad (2)$$

Рассмотрим ОЭМС в ванне под действием вертикальной составляющей магнитного поля  $H_z$ . В этом случае выражение (2) принимает следующий вид:

$$\vec{f} = \vec{f}_r + \vec{f}_\phi = -\mu_0 J_\phi H_z \vec{e}_r - \mu_0 J_r H_z \vec{e}_z, \quad (3)$$

из которого следует, что объемная электромагнитная сила  $\vec{f}$  имеет две проекции:  $f_r$  и  $f_\phi$ . Радиальная  $J_r$  и азимутальная  $J_\phi$  составляющие тока приводят к азимутальному и радиальному движению жидкости.

Для условий растекания тока по ванне, даже если напряженность внешнего магнитного поля во всех точках жидкой ванны одинакова, объемные электромагнитные силы имеют вихревой характер из-за того, что ток, проходя по ванне от подового электрода к области пятна дуги, пространственно неоднороден, т. е.  $(\text{rot } \vec{f})_\phi \neq 0$  [19].

Таким образом, при наличии только вертикальной составляющей внешнего магнитного поля, объемная электромагнитная сила в ванне ДППТ имеет лишь две проекции, расположенные в горизонтальной плоскости:  $f_r$  и  $f_\phi$ , при этом электромагнитная сила носит вихревой характер.

Для изучения движения токонесущей жидкости в магнитном поле была создана экспериментальная установка (рис. 1), ее геометрические характеристики приведены в таблице. В качестве ванны использовалась пластиковая емкость, по форме подобная ванне ДППТ. В качестве модельной жидкости применялся раствор поваренной соли, который содержал примерно 25 г NaCl в 100 г воды (это почти максимально возможное содержание при 20 °C). Электрический ток к жидкости подводился через металлический стрежень (катод), размещенный по оси ванны и погруженный в раствор на 2–3 мм. В качестве анодов, имитирующих подовые электроды, использовались круглые металлические пластины. На подине ванны размещались четыре круглых подовых электрода, причем ось первого совпадала с осью ванны, а оси трех остальных располагались на расстоянии  $\Delta L = 40$  мм от оси ванны. Двухгранный угол между осями двух смежных электродов и осью ванны составлял 90°.

Под ванной устанавливался электромагнит, представляющий собой катушку из 2400 витков с сердечником 34×34 мм. На электромагнит подавался постоянный электрический ток от источника, включающего в себя лабораторный регулируемый автотрансформатор и двухполупериодный выпрямитель. Кроме этого,

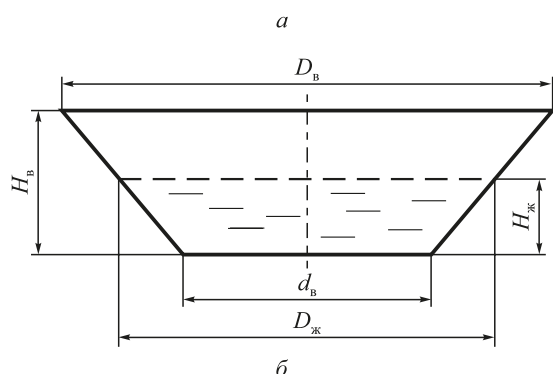
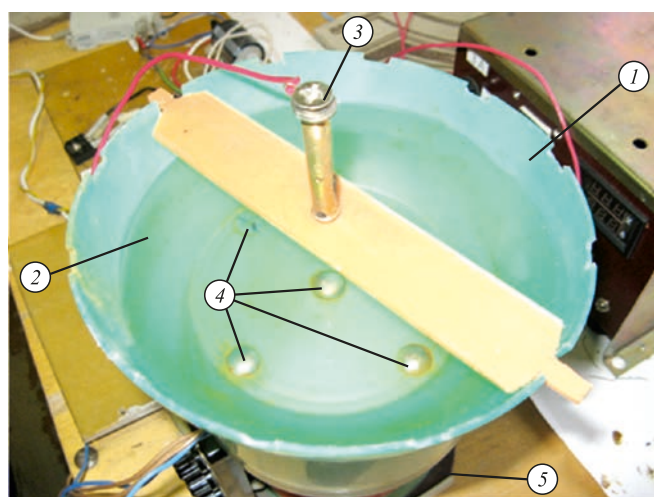


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки (а) и основные размеры ванны (б):

1 – пластиковая ванна; 2 – водный раствор поваренной соли; 3 – катод; 4 – аноды (подовые электроды); 5 – электромагнит

Fig. 1. General view of the experimental installation (a) and basic dimensions of the bath (b):

1 – plastic bath; 2 – water solution of sodium chloride; 3 – cathode; 4 – anodes (bottom electrodes); 5 – electromagnet

имелась возможность переключать направление тока. Напряженность магнитного поля измеряли магнитометром ИМАГ-400Ц, имеющим максимальную погрешность  $\pm 1\%$ .

Результаты измерения внешнего магнитного поля, создаваемого электромагнитом, вблизи подины модельной ванны при отсутствии жидкости и вблизи свободной поверхности при ее наличии для разных токов, проходящих через электромагнит, показаны на рис. 2.

От независимого регулируемого источника питания постоянного тока подавалось напряжение между катодом и анодом. Ток, проходящий через водный раствор поваренной соли, можно было плавно изменять в диапазоне от 0 до 4 А.

Проведена серия экспериментов, в которых визуально и с использованием видеосъемки изучался характер движения жидкости при изменении тока, проходящего через водный раствор поваренной соли и направление внешнего магнитного поля для различных комбинаций подключения подовых электродов.

При подключении подового электрода (как центрального, так и смещенного от оси ванны) прозрачность модельной жидкости позволила установить, что в начальные моменты времени наблюдается вращение жидкости в горизонтальной плоскости, причем оно направлено взаимно обратно вблизи верхнего и нижнего электрода (рис. 3, а). Это объясняется противоположными направлениями силы Лоренца (из-за разных направлений радиальной проекции плотности тока), действующими на элементы токонесущей жидкости вблизи верхнего и нижнего электрода. За некоторое время (3 – 8 с) верхнее течение, как более сильное, «вытесняет» нижнее, и дальнейшее вращение жидкости по всему объему ванны происходит в одном направлении. Это можно объяснить тем, что объемная электромагнитная сила пропорциональна плотности тока и напряженности магнитного поля, а в районе катода плотность тока  $J_k$  (из-за разных площадей токоподводов) в 9 раз

больше, чем в районе анода  $\left(\frac{J_k}{J_a} = \frac{S_a}{S_k} = \left(\frac{d_a}{d_k}\right)^2\right)$ . Это не

компенсируется более низким значением напряженности магнитного поля вблизи катода относительно анода.

### Геометрические параметры модельной ванны и токоподводов

#### Geometrical parameters of the model bath and the current supplies

Параметр	Обозначение	Значение
Диаметр ванны, мм	$D_b = 2R_b$	140
Диаметр подины, мм	$d_b$	100
Диаметр ванны по жидкости, мм	$D_k = 2R_k$	129
Высота ванны, мм	$H_b$	40
Диаметр катода в месте контакта с жидкостью, мм	$d_k$	5
Угол откоса ванны, мм	$\varphi_0$	60
Расстояние между осями подовых электродов и ванны, мм	$\Delta L$	40
Диаметр подового электрода, мм	$d_a$	15
Высота наполнения ванны, мм	$H_k$	26

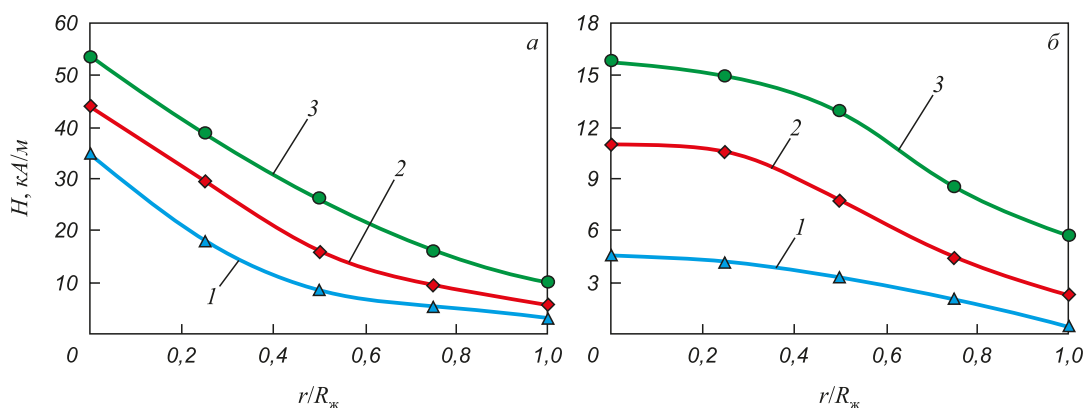


Рис. 2. Напряженность магнитного поля вблизи свободной поверхности жидкости (а) и на подине (на расстоянии ~10 мм от сердечника) (б) при разных токах, проходящих через электромагнит: 1 – 1 А; 2 – 1,51 А; 3 – 2 А

Fig. 2. The magnetic field strength near the free surface of the liquid (a) and on the hearth (at ~ 10 mm from the core) (б) at different currents that pass through the electromagnet: 1 – 1 A; 2 – 1.51 A; 3 – 2 A

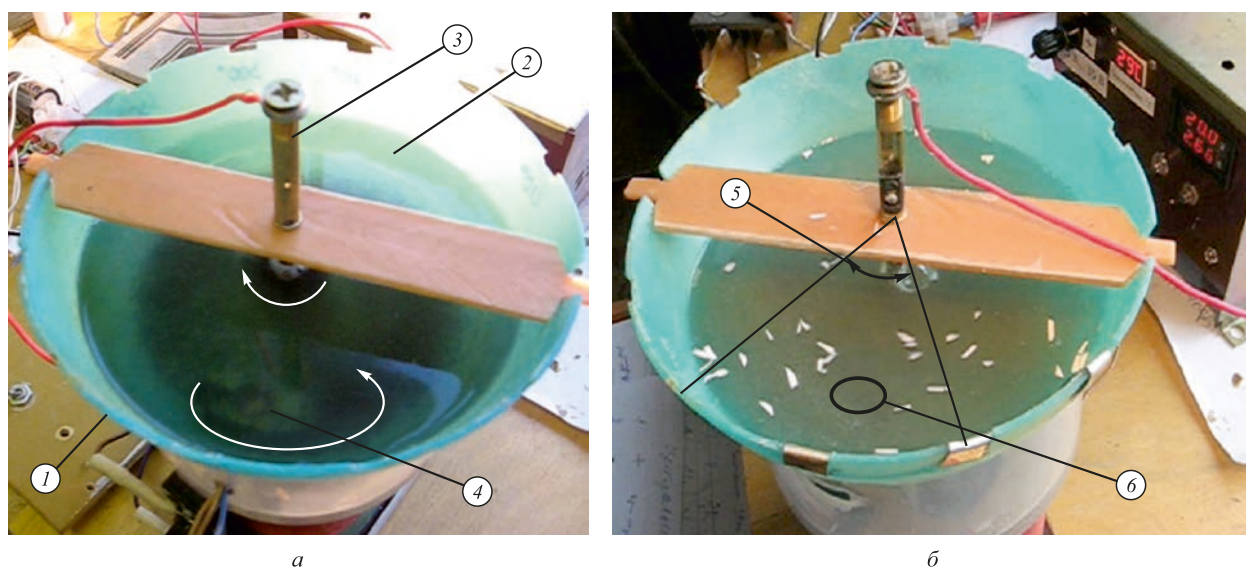


Рис. 3. Движение жидкости в ванне при подключении одного смещенного от оси подового электрода: а – модельная ванна с «маячками» в виде твердых частиц при анализе характера течения вблизи подины; б – модельная ванна с «маячками» в виде мелких кусочков бумаги при измерении скорости жидкости на ее поверхности; 1 – ванна; 2 – электролит; 3 – катод; 4 – анод; 5 – измерительный сектор; б – место расположения подового электрода; → – направление движения жидкости

Fig. 3. Movement of liquid in the bath when connecting one electrode displaced from the axis of the bottom: а – a model bath with “beacons” in the form of solid particles when analyzing the nature of the flow near the bottom; б – model bath with “beacons” in the form of small pieces of paper when measuring the velocity of a liquid on its surface; 1 – bath; 2 – electrolyte; 3 – cathode; 4 – anode; 5 – measuring sector; б – location of the bottom electrode; → – direction of liquid movement

После установления движения в ванне при смене направления магнитного поля наблюдается торможение жидкости и направление ее течения меняется на противоположное. В областях вблизи боковых стенок ванны течение более инерционно во времени, поэтому оно продолжается относительно долго (8 – 12 с), оставаясь противоположным новому движению, и лишь спустя некоторое время медленно тормозится и меняет направление. При отключении внешнего магнитного поля или тока течение жидкости постепенно затухает приблизительно за 10 с.

При подключении смещенного от оси ванны на  $\Delta L$  подового электрода наблюдалась застойная зона шириной около 1 см между стенкой ванны и рабочим подовым электродом. Ее площадь практически не меняется при изменении значения и направления магнитного поля.

При использовании подового электрода, ось которого совпадает с осью ванны, при тех же параметрах тока и внешнего магнитного поля, что и при смещенном от оси ванны на  $\Delta L$  подовом электроде, течение жидкости более слабое. Наиболее интенсивное движение име-



ет место в центральной области ванны  $\left(r < \frac{R_{\text{ж}}}{3}\right)$ . При приближении к боковой стенке скорость жидкости снижается и визуально наблюдается застойная зона, размер которой уменьшается по мере увеличения тока через ванну и (или) внешнего магнитного поля.

Прозрачность используемой жидкости позволила в начальные моменты времени наблюдать процессы перемешивания жидкой ванны, однако в результате электролиза водный раствор соли достаточно быстро мутнеет. Исходя из этого, количественные измерения скорости жидкости проводились на ее свободной поверхности при подключении подового электрода, смещенного от оси ванны. Видеосъемка поверхности ванны проводилась со скоростью 30 кадров/с цифровой камерой Canon PowerShot A710IS.

Количественно скорость жидкости на ее свободной поверхности определялась из наблюдения за движением «маячков», в качестве которых использовались мелкие твердые частицы, образующиеся при разрушении электролизом электродов или мелкие кусочки бумаги (рис. 3, б).

Определялось количество кадров при прохождении «маячков», расположенных на расстоянии  $r$  от оси ванны сектора  $\alpha = 90^\circ$ , поэтому приближенно путь, пройденный частицами жидкости, находился как длина дуги  $r\pi/2$ . При этом подовый электрод располагался на биссектрисе угла  $\alpha$ .

На рис. 4 показаны экспериментальные зависимости азимутальной скорости течения жидкости на свободной поверхности в зависимости от безразмерного расстояния до оси ванны при разных токах, проходящих через ванну. Видно, что при смещении подового электрода от оси ванны общий уровень скоростей жидкости выше, чем для подового электрода, совпадающего с осью ванны. Объясняется это увеличением доли горизонтальной составляющей тока. При смещении подового электрода

от оси ванны азимутальная скорость течения жидкости в секторе над подовым электродом имеет сложный характер (рис. 4, б). В других секторах характер течения близок к показанному на рис. 4, а.

Рассмотрим, насколько реально создать условия движения металла с такими же характерными скоростями применительно к промышленной печи. Возьмем в качестве оригинала ванну сталеплавильной печи ДППТ-5 стандартной конфигурации с одним подовым электродом при следующих параметрах:  $I' = 6$  кА; радиус ванны по жидкому металлу  $R'_b = 1245$  мм; высота ванны по жидкому металлу и шлаку  $H'_b = 340$  мм.

В качестве определяющих критериев можно выбрать число  $N = \frac{I\mu_0 H L}{\rho v^2} = idem$  и число Рейнольдса

$Re = \frac{LW}{\nu} = idem$ . Критерий  $N$ , ответственный за интенсивность азимутального вращения токонесущей жидкости под действием внешнего магнитного поля, впервые введен в работе [20]. Он определяет соотношение электромагнитных сил, возникающих под действием внешнего магнитного поля на токонесущий расплав, и сил вязкости.

Оценим основные масштабы и симплексы по порядку величин:  $M_I = \frac{I'}{I} \sim 10^3$  – масштаб токов;  $M_L = \frac{L'}{L} \sim 10$  – геометрический масштаб;  $M_\rho = \frac{\rho'}{\rho} \sim 10$  – отношение плотностей жидкостей;  $M_\nu = \frac{\nu'}{\nu} \sim 1$  – отношение кинематических вязкостей. Данные, относящиеся к оригиналу, записываются со штрихом. Пусть азимутальные скорости течения металла в реальной ванне будут того же порядка, что и на модели ( $\sim 10$  мм/с), тогда  $M_W = \frac{W'}{W} \sim 1$ . Из определяющих критериев получим масштаб по напряженности магнитного поля:

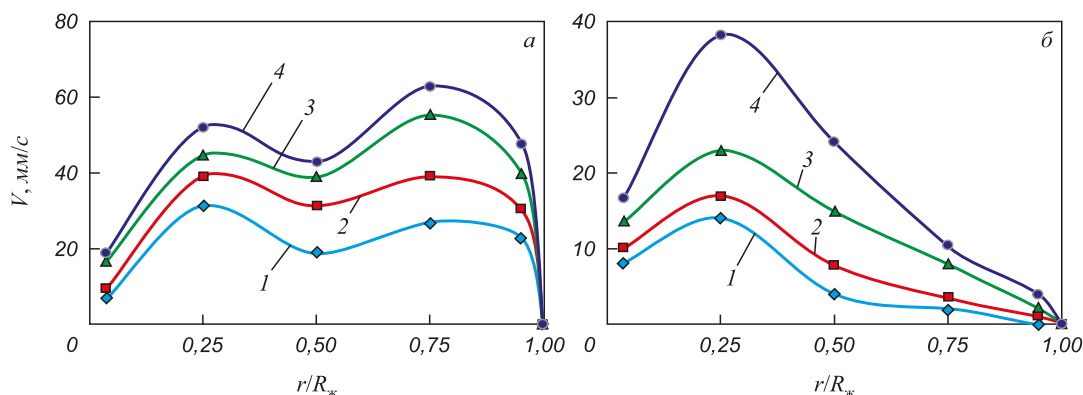


Рис. 4. Азимутальные скорости течения жидкости по радиусу ванны при разных токах, проходящих через осевой подовый электрод (а) и смещенный подовый электрод (ток через электромагнит 2 А) (б):  
1 – 1 А; 2 – 2 А; 3 – 2,8 А; 4 – 3,8 А

Fig. 4. Azimuthal velocities of liquid flow along the radius of the bath at different currents passing through axial bottom electrode (a) and displaced bottom electrode (current through the solenoid – 2 A) (b):  
1 – 1 A; 2 – 2 A; 3 – 2,8 A; 4 – 3,8 A

$$M_H = \frac{H'}{H} = \frac{M_w^2 M_L M_p}{M_I} \sim 10^{-1}.$$

Таким образом, напряженность магнитного поля на промышленной печи должна быть на порядок меньше, чем на лабораторной установке, т. е. порядка 5 кА/м.

Математическое моделирование применительно к промышленной сталеплавильной печи ДППТ-5 при различных конструкциях токоподводящей шины, рассмотренное в работах [8, 9], показало, что создание магнитных полей в ванне расплава с напряженностью порядка 10 кА/м вполне реально.

Необходимо отметить, что внешнее вертикальное магнитное поле в ДППТ существенно воздействует и на электрическую дугу. При ее случайном отклонении от вертикали возникают электромагнитные силы, приводящие дугу к быстрому вращению относительно вертикальной оси. Это приведет к стабилизации ее анодной привязки к расплаву и уменьшению пульсаций тока дуги, но для детального анализа этих процессов требуются дополнительные исследования.

**Выводы.** Показана принципиальная возможность изучения характера течения токонесущего расплава под воздействием внешних магнитных полей на моделях с использованием немагнитических электропроводящих прозрачных жидкостей.

Экспериментально на «холодной» модели установлен характер течения жидкости в ванне ДППТ при подключении центрального или смещенного от оси ванны подового электрода.

При воздействии на токонесущую жидкость вертикального магнитного поля возникает ее азимутальная закрутка, причем направление вращения расплава в горизонтальной плоскости меняется при изменении направления вертикального магнитного поля на противоположное.

Показано, что при смещении оси подового электрода от оси ванны увеличивается средняя скорость вращения жидкости в горизонтальной плоскости. Так, при смещении подового электрода на расстояние 4/5 радиуса подины средняя скорость течения жидкости на поверхности ванны возрастает примерно в 2 раза, при этом размер застойной зоны вблизи боковых стенок ванны сокращается на 70 %.

Определен порядок напряженности вертикального магнитного поля для кондукционного перемешивания ванны ДППТ малой вместимости.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миронов Ю.М. Теоретическая электротехника электрических электродных печей. – Чебоксары: ЧувГУ, 1997. – 232 с.
2. Гельфгат Ю.М., Лиелаусис О.А., Щербинин Э.В. Жидкий металл под действием электромагнитных сил. – Рига: Зинатне, 1975. – 248 с.
3. Повх И.Л., Капуста А.Б., Чекин Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии. – М.: Металлургия, 1974. – 240 с.
4. Верте Л.А. Магнитная гидродинамика в металлургии. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.
5. Электровихревые течения / В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин. – Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.
6. Власюк В.Х., Шарамкин В.И. О влиянии вертикального магнитного поля на тепло- и массообмен в параболоидной жидкометаллической ванне с током // Магнитная гидродинамика. 1987. № 2. С. 112 – 118.
7. Власюк В.Х. Соотношение электровихревой и гравитационной конвекций // Магнитная гидродинамика. 1988. № 4. С. 75 – 80.
8. Ячиков И.М., Портнова И.В. Поведение магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной конструкции токоподводящей шины к подовому электроду // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 76 – 81.
9. Ячиков И.М., Залаяудинов Р.Ю. Исследование магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной форме токоподводящей шины к подовому электроду // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 3. С. 58 – 63.
10. Yachikov I.M. Modelling of electrovortex flows and heat/mass transfer in the dc arc furnace bath // Magnetohydrodynamics. 2016. Vol. 52. No. 1. P. 301 – 310.
11. Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Гусева А.А., Токарев Ю.Н. Численное и экспериментальное исследование структуры закрученного электровихревого течения // Тепловые процессы в технике. 2012. № 8. С. 345 – 352.
12. Vasyuk V.Kh., Shcherbinin E.V. Stability of an electrically induced vertical flow in an external magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2004. Vol. 40. No. 3. P. 223 – 236.
13. Ивочкин Ю.П., Виноградов Д.А., Тепляков И.О. Численный расчет магнитного поля с использованием технологии CUDA применительно к моделированию электровихревых течений // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2015. № 2. С. 13 – 18.
14. Ivochkin Yu., Oksman A., Kazak O. etc. Nuclear and experimental investigation of the electrovortex flow in hemispherical container under action of external magnetic field // Proceeding of the 8th Pamir International Conference on Fundamental and Applied MHD. Borgo, Corsica, France. 2011. Vol. 1. P. 85 – 88.
15. Петрунин А.А., Штерн В.Н. Бифуркация полоидального поля в течениях, вызванном радиальным электрическим током // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1993. № 2. С. 4 – 11.
16. Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Гусева А.А. и др. Исследование деформации свободной поверхности и ее влияния на интенсивность электровихревого течения жидкого металла // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4. № 11. С. 487 – 495.
17. Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Протокивиллов И.В. Физическое моделирование электровихревых течений при ЭШП // Современная электрометаллургия. 2013. № 1. С. 3 – 7.
18. Тепляков И.О. Исследование структуры электровихревого течения жидкого металла в полусферической полости: Автореф. ... дисс. канд. техн. наук. – М., 2013. – 24 с.
19. Моделирование электромагнитных процессов в электродуговых печах постоянного тока / И.М. Ячиков, О.И. Карандаева, Т.П. Ларина, И.В. Портнова. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – 139 с.
20. Миллере Р.П., Шарамкин В.И., Щербинин Э.В. Действие продольного магнитного поля на электровихревое течение в цилиндрической ванне // Магнитная гидродинамика. 1980. № 1. С. 81 – 85.

Поступила 8 июня 2016 г.

# STUDY OF THE BEHAVIOR OF CURRENT-CARRYING LIQUID IN THE BATH OF DC ARC FURNACE BY AN EXTERNAL VERTICAL MAGNETIC FIELD ON A PHYSICAL MODEL

I.M. Yachikov, I.V. Portnova, T.P. Larina

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov,  
Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

**Abstract.** When an external vertical magnetic field is applied to a current-carrying melt in the bath of a DC arc furnace, volumetric electromagnetic forces arise that drive it. Flows of metal and slag occur in the bath of the DC arc furnace. This can lead to their efficient mixing, but can also carry negative aspects, for example, associated with an increase in wear of lining in the region of the bottom electrode. The processes of conductive mixing in the bath of the DC arc furnace during smelting of metals and alloys remain poorly understood, there arise both theoretical questions related to the nature of the flows in the bath under the action of external and intrinsic magnetic fields of a given intensity, and practical with the absence of simple and reliable sources of external magnetic fields. The purpose of this paper is to qualitatively test the capabilities of a physical "transparent" model, to study the nature of currents of a current-carrying liquid under the action of an external vertical magnetic field, and to analyze the possibility of transferring simulation results to processes occurring in a five-ton bath of an industrial DC arc furnace. The principal possibility of studying the current flow behavior of a current-carrying melt under the influence of external magnetic fields on models using non-metallic electrically conducting transparent liquids is shown. In this work the authors have used a water solution of table salt, it allowed to estimate the velocity of the liquid on its free surface and near the bottom electrode using video. The physical modeling of the effect of an external vertical magnetic field on the current flowing current in a bath was carried out for different combinations of connecting the bottom electrode and different currents flowing through the bath. The current flowing current in the bath under the influence of an external vertical magnetic field was established when the central electrode or the bottom electrode is displaced from the axis of the bath. It was revealed that when the axis of the bottom electrode is displaced from the bath axis, the average rotation speed of the liquid in the horizontal plane increases. An estimate of the value of the vertical magnetic field strength (about 5 kA/m) is obtained, which should be accompanied by conductive mixing the metal bath of the five-ton steel-smelting arc furnace.

**Keywords:** DC arc furnace, current-carrying melt, bath of a DC arc furnace, bottom electrode, intensity of magnetic field, flow pattern, volumetric electromagnetic forces, velocity melt.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-1-28-34

## REFERENCES

1. Mironov Yu.M. *Teoreticheskaya elektrotehnika elektricheskikh elektrodnykh pechei* [Theoretical electrical engineering of electric electrode furnaces]. Cheboksary: ChuvGU, 1997, 232 p. (In Russ.).
2. Gel'fgat Yu.M., Lielausis O.A., Shcherbinin E.V. *Zhidkii metall pod deistviem elektromagnitnykh sil* [Liquid metal under the influence of electromagnetic forces]. Riga: Zinatne, 1975, 248 p. (In Russ.).
3. Povkh I.L., Kapusta A.B., Chekin B.V. *Magnitnaya gidrodinamika v metallurgii* [Magnetic hydrodynamics in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 240 p. (In Russ.).
4. Verte L.A. *Magnitnaya gidrodinamika v metallurgii* [Magnetic hydrodynamics in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 288 p. (In Russ.).
5. Boyarevich V.V., Freiberg Ya.Zh., Shilova E.I., Shcherbinin E.V. *Elektrovikhrevye techeniya* [Electrovortex flows]. Riga: Zinatne, 1985, 315 p. (In Russ.).
6. Vlasjuk V.Kh., Sharamkin V.I. On the influence of a vertical magnetic field on heat and mass transfer in a paraboloidal liquid metal bath with current. *Magnitnaya gidrodinamika*. 1987, no. 2, pp. 112–118. (In Russ.).
7. Vlasjuk V.Kh. Ratio of electro-vortex and gravitational convection. *Magnitnaya gidrodinamika*. 1988, no. 4, pp. 75–80. (In Russ.).
8. Yachikov I.M., Portnova I.V. Behavior of magnetic field in the bath of a DC arc furnace with a different design of the current lead circuit to the bottom electrode. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2015, no. 1, pp. 76–81. (In Russ.).
9. Yachikov I.M., Zalyautdinov R.Yu. The research of magnetic field of metal in DC arc furnace with different forms of busbars to the bottom electrode. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 3, pp. 58–63. (In Russ.).
10. Yachikov I.M. Modeling of electrovortex flows and heat/mass transfer in the DC arc furnace bath. *Magnetohydrodynamics*. 2016, vol. 52, no. 1, pp. 301–310.
11. Ivochkin Yu.P., Teplyakov I.O., Guseva A.A., Tokarev Yu.N. Numerical and experimental study of the structure of a swirling vortex flow. *Teplovye protsessy v tekhnike*. 2012, no. 8, pp. 345–352. (In Russ.).
12. Vlasjuk V.Kh., Shcherbinin E.V. Stability of an electrically induced vertical flow in an external magnetic field. *Magnetohydrodynamics*. 2004, vol. 40, no. 3, pp. 223–236.
13. Ivochkin Yu.P., Vinogradov D.A., Teplyakov I.O. Numerical calculation of the magnetic field using the CUDA technology for the simulation of the electrovortex currents. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsial'noi sfere*. 2015, no. 2, pp. 13–18. (In Russ.).
14. Ivochkin Yu., Oksman A., Kazak et al. Nuclear and experimental investigation of the electrovortex flow in hemispherical container under action of external magnetic field. *Proceeding of the 8th Pamir International Conference on Fundamental and Applied MHD*. Borgo, Corsica, France, 2011, vol. 1, pp. 85–88.
15. Petrunin A.A., Shtern V.N. Bifurcation of a poloidal field in a flow caused by a radial electric current. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*. 1993, no. 2, pp. 4–11. (In Russ.).
16. Ivochkin Yu.P., Teplyakov I.O., Guseva A.A. etc. Investigation of the deformation of a free surface and its effect on the intensity of an electrovortex flow of liquid metal. *Teplovye protsessy v tekhnike*. 2012, vol. 4, no. 11, pp. 487–495. (In Russ.).
17. Ivochkin Yu.P., Teplyakov I.O., Protokovilov I.V. Physical modeling of the electric vortex currents at electroslag refining. *Sovremennaya elektrometallurgiya*. 2013, no. 1, pp. 3–7. (In Russ.).
18. Teplyakov I.O. *Issledovanie struktury elektrovikhrevogo techeniya zhidkogo metalla v polusfericheskoi polosti: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk*. [Investigation of the structure of the electrovortex flow of liquid metal in hemispherical cavity: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Moscow: 2013, 24 p. (In Russ.).
19. Yachikov I.M., Karandaeva O.I., Larina T.P., Portnova I.V. *Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v elektrodugovykh pechakh postoyannogo toka* [Modeling of electromagnetic processes in DC EAF]. Magnitogorsk: MG TU, 2005, 139 p. (In Russ.).
20. Millere R.P., Sharamkin V.I., Shcherbinin E.V. Action of the longitudinal magnetic field on the electrovortex flow in a cylindrical bath. *Magnitnaya gidrodinamika*. 1980, no. 1, pp. 81–85. (In Russ.).

## Information about the authors:

**I.M. Yachikov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Computer Engineering, and Applied Mathematics  
**I.V. Portnova**, Engineer of the Chair of Computer Engineering, and Applied Mathematics (iragzt@mail.ru)  
**T.P. Larina**, Senior Lecturer of the Chair Electrical Technics and Electronic Systems

Received June 8, 2016