

УДК 621.74 : 537.84

## ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ЖИДКОЙ СТАЛИ В КОВШЕ ПУЛЬСИРУЮЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Ю.М. Гориславец, докт. техн. наук, А.И. Глухенький, канд. техн. наук, А.И. Бондар

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина  
e-mail: ugoris@ied.org.ua

*Предложено перемешивать жидкий металл в металлургическом ковше с помощью пульсирующего магнитного поля, которое создает однофазный электромагнитный перемешиватель, расположенный сверху над ковшом. Выполнено компьютерное моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов в системе "перемешиватель – ковш с жидким металлом" применительно к установке "ковш – печь", которая используется для внепечной обработки жидкой стали. Эффективность перемешивания оценивалась по усредненной по меридианному сечению ковша скорости движения металла. Получены значения усредненной и максимальной скоростей, а также мощности джоулевого тепловыделения в металле для разных радиусов катушки перемешивателя, уровней расположения его относительно поверхности металла и частоты питающего тока. Библ. 4, рис. 7.*

**Ключевые слова:** электромагнитное перемешивание, жидкий металл, металлургический ковш, пульсирующее магнитное поле, компьютерное моделирование.

**Введение.** В настоящее время широкое распространение в металлургии получили установки "ковш – печь", предназначенные для внепечной обработки расплавленного металла, поступающего из плавильных агрегатов. В таких установках осуществляется очистка (рафинирование) расплава от газовых и твердых неметаллических включений, легирование металла с целью получения необходимого сплава, удаление серы (десульфурация), гомогенизация расплава по температуре и химсоставу. Все эти операции требуют перемешивания жидкого металла, которое в настоящее время выполняют за счет продувки металла инертным газом либо электромагнитным способом. Считается, что электромагнитное перемешивание является технологически более эффективным и экономически выгодным [2].

Признанным лидером в технологии электромагнитного перемешивания металла, в частности жидкой стали в ковшах, считается фирма АВВ (Германия) [4]. Электромагнитный перемешиватель для внепечной обработки этой фирмы выполнен в виде двухгранного линейного индуктора бегущего магнитного поля, который пристыковывается к боковой стенке ковша. Для уменьшения экранирующего влияния на электромагнитное поле металлического кожуха ковша часть его (в месте стыковки перемешивателя) выполнена из немагнитной нержавеющей стали. Под воздействием бегущего магнитного поля в ковше создается одноконтурное вихревое течение металла в вертикальной плоскости. Реверсирование магнитного поля позволяет менять направление движения жидкого металла.

Известна также идея использования пульсирующего магнитного поля для электромагнитного перемешивания металлического расплава в печных агрегатах. В работе [1] на основе математического моделирования исследовано несколько конструктивных решений электромагнитных перемешивателей пульсирующего магнитного поля применительно к отражательной печи для алюминия. Показано, что в технологическом плане использование пульсирующего магнитного поля в ряде случаев может быть более эффективным по сравнению с бегущим полем.

**Целью** настоящей работы является исследование возможности использования пульсирующего магнитного поля для перемешивания жидкой стали в металлургических ковшах для внепечной обработки металла.

Исследование проводилось на основе компьютерного моделирования электромагнитного поля и гидродинамики течения жидкого металла в ковше, созданного однофазным перемешивателем, расположенным сверху ковша (над зеркалом металла).

Отсутствие при данной компоновке металлического кожуха между перемешивателем и металлом допускает работу перемешивателя на промышленной частоте, что обеспечивает существенные эксплуатационные выгоды. В то же время конструкция перемешивателя должна иметь достаточную теплоизоляцию для его защиты от прямого теплового излучения с поверхности жидкой стали.

**Описание исследуемой системы.** Схематическое изображение одного из возможных вариантов электромагнитного перемешивателя пульсирующего магнитного поля применительно к металлургическому ковшу показано на рис. 1. Он представляет собой кольцевую катушку 1, на которую одеты сверху шихтованные П-образные ферромагнитные сердечники 2. При питании ее переменным током в жидком металле возникают электромагнитные силы, направленные в основном нормально к поверхности металла (вниз). Под действием этих сил создается тороидальное вихревое течение, обеспечивающее перемешивание стали в ковше.

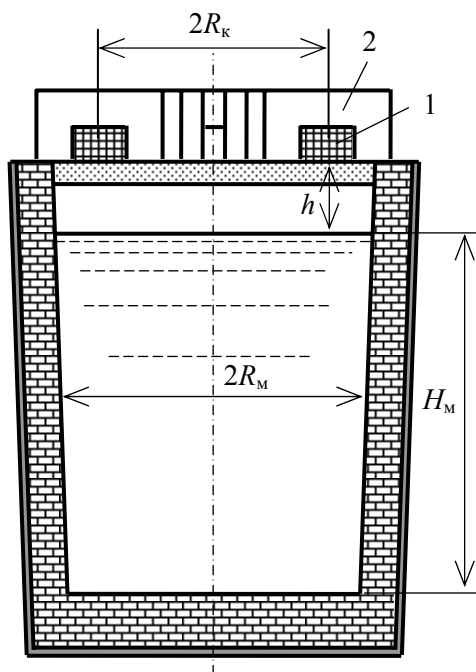


Рис. 1

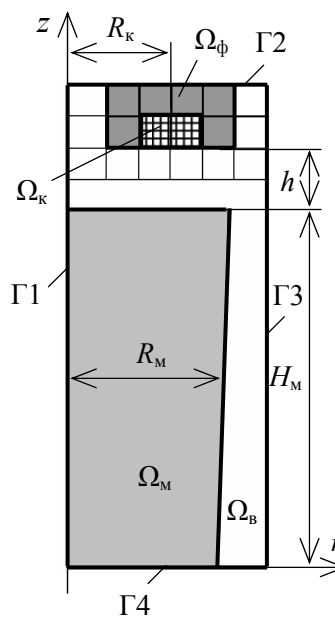


Рис. 2

**Расчетная модель электромагнитных и гидродинамических процессов.** Вследствие цилиндрической симметрии исследуемой системы расчеты электромагнитного поля и гидродинамики в ковше выполнялись в одном меридианном сечении. Для этого реальные ферромагнитные сердечники перемешивателя заменялись сплошным цилиндрическим ферромагнитным телом, образованным вращением П-образной фигуры вокруг оси ковша (оси  $z$ ). Для упрощения электромагнитной задачи магнитная проницаемость сердечника принималась постоянной, т.е. не зависящей от напряженности магнитного поля, а потерями в сердечнике пренебрегалось. Пренебрегались также вихревые токи в катушке. Кроме того, не учитывалось влияние металлического кожуха ковша на распределение электромагнитного поля перемешивателя (кожух для электромагнитного поля считался прозрачным).

Для получения возможности исследования влияния местоположения катушки перемешивателя относительно объема металла как по радиусу тигля (по оси  $r$ ), так и по высоте (по оси  $z$ ) расчетная область над жидким металлом была разбита на элементарные (квадратные) подобласти (ячейки), в каждой из которых задавались те или иные физические свойства элементов системы (ферромагнетика, катушки с током, воздушного пространства). Эти свойства задавались таким образом, чтобы в заданном месте образовалась область перемешивателя в виде катушки с П-образным сердечником. Разбивка области, приведенная на рис. 2, позволяет катушке, занимающей две горизонтально расположенные элементарные подбласти

сти, с ферромагнитным сердечником (с шестью подобластями) занимать две позиции по высоте и три по радиусу.

Расчетная область всей системы (ковша с жидкой сталью и электромагнитного перемешивателя), которая представлена на рис. 2, является кусочно-неоднородной и включает в себя область жидкого металла  $\Omega_m$ , область ферромагнитного сердечника  $\Omega_f$ , область сечения катушки  $\Omega_k$  и область изоляционных (неэлектропроводных) материалов и окружающего (воздушного) пространства  $\Omega_v$ . Электромагнитное поле в такой системе может быть описано дифференциальным уравнением для единственной  $\varphi$ -компоненты векторного магнитного потенциала  $A_\varphi$  (в комплексном представлении):

$$\nabla \times \mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A_\varphi + j\omega\sigma A_\varphi - \sigma \mathbf{u} \times (\nabla \times A_\varphi) = J_k. \quad (1)$$

Это уравнение записано в общем виде для всех указанных областей. В нем  $\omega = 2\pi\nu$  – угловая частота ( $\nu$  – частота питающего тока),  $\sigma$  – удельная электропроводность материала области,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\mu_r$  – относительная проницаемость области,  $\mathbf{u}$  – скорость движения (жидкого металла),  $J_k = Iw/S_k$  – амплитудное значение внешней ("сторонней") плотности тока, которое задавалось в области катушки  $\Omega_k$  сечением  $S_k$ ,  $Iw$  – ампер-витки катушки.

На внешних границах расчетной области системы задавались следующие граничные условия: на границе Г1 – условие симметрии, на границах Г2-Г4 –  $A_\varphi = 0$ .

Расчет электромагнитной задачи проводился численно методом конечных элементов с помощью пакета мультифизического моделирования Comsol [3]. По результатам расчетов (полученным значениям векторного магнитного потенциала) определялись электромагнитные силы в жидком металле, а также такие интегральные величины, как активная, реактивная и полная мощности перемешивателя, тепловыделения в жидком металле и др.

Удельные электромагнитные силы в жидком металле рассчитывались в соответствии с выражением

$$\mathbf{f} = 0,5 \operatorname{Re} (J_\varphi \times \mathbf{B}^*), \quad (2)$$

где  $J_\varphi$  – расчетная плотность тока в жидком металле;  $\mathbf{B}^*$  – сопряженный комплекс индукции магнитного поля,  $\mathbf{B} = \nabla \times A_\varphi$ .

Потери, которые выделяются в стали в виде тепла, находились путем интегрирования локальных тепловыделений по всему объему жидкого металла:

$$P_M = \frac{1}{2} \int_{S_M} \int_0^{2\pi} \frac{J_\varphi J_\varphi^*}{\sigma} ds d\varphi, \quad (3)$$

где  $S_M$  – площадь области  $\Omega_m$ .

Реактивная мощность системы вычислялась следующим образом:

$$Q = \pi\omega R_k A_k J_k S_k, \quad (4)$$

где  $R_k$  – средний радиус катушки (рис. 1);  $A_k = \frac{1}{S_k} \operatorname{Re} \int_{S_k} A_\varphi ds$  – среднее значение векторного магнитного потенциала в области катушки  $\Omega_k$ .

Полная мощность перемешивателя

$$S = \sqrt{(P_M + P_K)^2 + Q^2}, \quad (5)$$

где  $P_K$  – потери в катушке.

Гидродинамическая задача рассчитывалась для области  $\Omega_m$ , занимаемой жидкой сталью. Скорость  $\mathbf{u}$  жидкого металла определялась путем численного решения уравнений Навье-Стокса для турбулентного течения с использованием  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности:

$$\rho_m (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{эфф} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (7)$$

где  $\rho_m$  – плотность жидкого металла;  $p$  – давление;  $\eta_{\text{эфф}}$  – коэффициент эффективной динамической вязкости металла;  $\mathbf{f}$  – удельные электромагнитные силы в жидком металле, вычисленные в соответствии с выражением (2).

Граничные условия для этой задачи задавались следующим образом. На оси системы принималось условие симметрии. На стенках ковша граничное условие задавалось в виде логарифмического профиля скорости для пограничного слоя. Верхняя поверхность жидкого металла, находящегося под слоем шлака, для упрощения задачи считалась недеформируемой. На этой границе принималось такое же условие, как и на твердой стенке.

В качестве параметра, характеризующего эффективность перемешивания стали, использовалось усредненное по меридианному сечению области  $\Omega_m$  значение скорости металла, которое определялось в соответствии с выражением

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{S_m} \int_{S_m} \sqrt{u_r^2 + u_z^2} ds. \quad (8)$$

**Результаты компьютерного моделирования.** Расчеты электромагнитных и гидродинамических процессов выполнялись применительно к сталеразливочному ковшу емкостью 90 т металлургического завода «Азовсталь», изготовленного ОАО «Новокраматорский машиностроительный завод». Средний (по высоте) радиус жидкого металла в этом ковше составляет  $R_m = 1,2$  м, высота металла –  $H_m = 2,8$  м. Расчетная область над тиглем, где предполагается устанавливать перемешиватель, разбита на подобласти (ячейки) размером  $(0,25 \times 0,25)$  м<sup>2</sup>, что позволяет схематически располагать его на расстоянии  $h = 0,25$  и  $0,5$  м от зеркала жидкого металла. Средний радиус катушки с поперечным сечением  $(0,5 \times 0,25)$  м<sup>2</sup> в этом случае мог принимать значения  $R_k = 0,55; 0,8$  и  $1,05$  м, что соответствует безразмерному параметру  $R_k/R_m = 0,46; 0,67$  и  $0,87$ . Физические параметры жидкой стали задавались следующими: удельная электропроводность  $\sigma_m = 0,8 \cdot 10^6$  См/м, плотность  $\rho_m = 6,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент динамической вязкости  $\eta_m = 41,4 \cdot 10^{-4}$  Н·с/м<sup>2</sup>.

Ввиду малости (как показали проведенные оценки) индуцированного за счет движения жидкого металла поля последним слагаемым в левой части уравнения (1) пренебрегалось. Это позволило электромагнитную и гидродинамическую задачи разделить и рассматривать отдельно, т.е. вначале определялось электромагнитное поле системы и вычислялись электромагнитные силы, развиваемые в жидком металле, а затем рассчитывались уравнения гидродинамики (6), (7).

На рис. 3 показаны расчетные вихревые течения жидкого металла, полученные при

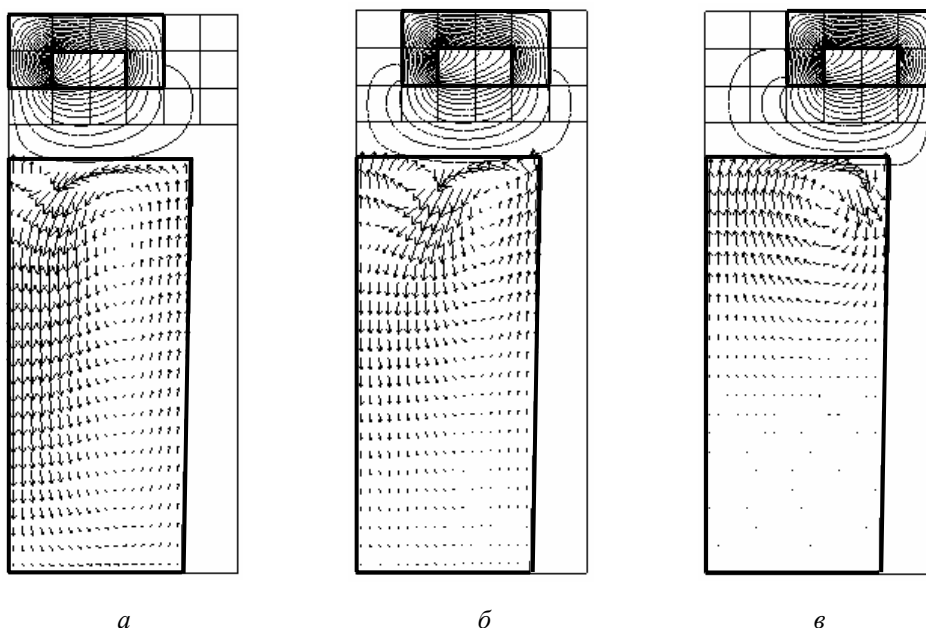


Рис. 3

$h = 0,5$  м для трех положений поперечного сечения катушки относительно оси ковша, т.е. для  $R_k/R_M = 0,46$  (рис. 3 а), для  $R_k/R_M = 0,67$  (рис. 3 б) и для  $R_k/R_M = 0,87$  (рис. 3 в). Расчеты выполнялись на частоте  $\nu = 50$  Гц при заданных постоянных ампер-витках катушки  $I_w = 40$  кА (эффективное значение). Из этого рисунка видно, что относительный размер катушки (средний радиус  $R_k$ ) существенно влияет на интенсивность и структуру течения металла в ковше. При  $R_k/R_M = 0,46$  и  $0,67$  в нем возникают два тороидальных вихря – один основной, охватывающий большую часть меридианного сечения, и второй (вторичный), который развивается в относительно небольшой верхней приосевой области ковша. В случае  $R_k/R_M = 0,87$  течение в ковше видоизменяется – меняется направление вращения основного вихря на противоположное. Кроме того, видно, что с ростом  $R_k/R_M$  глубина проникновения основного вихря вглубь металла уменьшается.

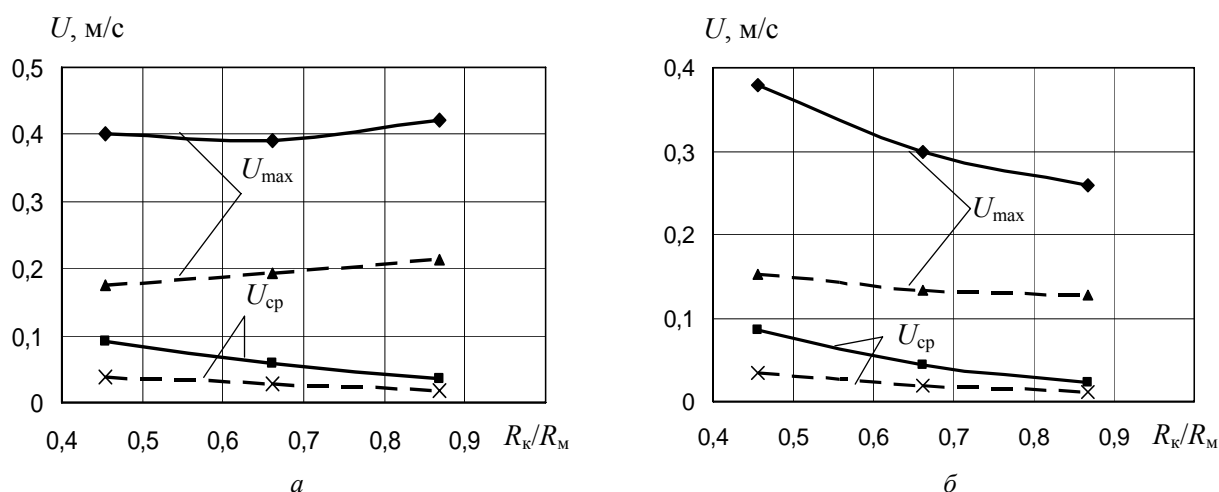


Рис. 4

Рис. 4 демонстрирует изменения усредненной  $U_{cp}$  и максимальной  $U_{max}$  скоростей металла в зависимости от геометрических размеров катушки перемешивателя: относительного радиуса  $R_k/R_M$  и расстояния ее до поверхности металла  $h$ . Следует заметить, что максимальная скорость  $U_{max}$  в ковше во всех случаях находится на поверхности металла под катушкой. Данные этого рисунка получены на частоте питающего тока  $\nu = 50$  Гц для двух условий: постоянства ампер-витков катушки  $I_w = 40$  кА = const (рис. 4 а) и постоянства полной мощности перемешивателя  $S = 1000$  кВА = const (рис. 4 б). Сплошные линии здесь соответствуют  $h = 0,25$  м, а пунктирные –  $h = 0,5$  м. Из этого рисунка следует, что с целью увеличения усредненной скорости жидкого металла катушка перемешивателя должна находиться как можно ближе к зеркалу металла (что и следовало ожидать), а ее радиус должен быть минимально возможным, исходя из конструктивных соображений.

Помимо геометрических соотношений исследовалось также влияние частоты  $\nu$  питающего тока перемешивателя на интенсивность движения жидкой стали в ковше. Результаты этого исследования представлены на рис. 5 в виде зависимостей усредненной и максимальной скоростей жидкого металла для  $R_k/R_M = 0,67$  и  $h = 0,25$  м. Сплошные линии на этом рисунке получены при условии  $I_w = 40$  кА = const, а пунктирные – при  $S = 1000$  кВА = const. Отсюда следует, что при соблюдении первого условия обе скорости достигают максимальных значений в районе 50 Гц. При этом эти скорости практически не меняются при изменении частоты в достаточно широком диапазоне (примерно от 30 до 50 Гц). Соблюдение второго условия приводит к тому, что зависимости обеих скоростей имеют явно выраженный экстремум на частоте примерно  $\nu = 3$  Гц. При этой частоте указанные скорости достигают максимальных значений.

Важной характеристикой электромагнитного перемешивателя является также мощность джоулевого тепловыделения в жидком металле. Знание ее позволяет оценить возможность компенсации потерь тепла в тигле, а также возможность подогрева металла в нем элек-

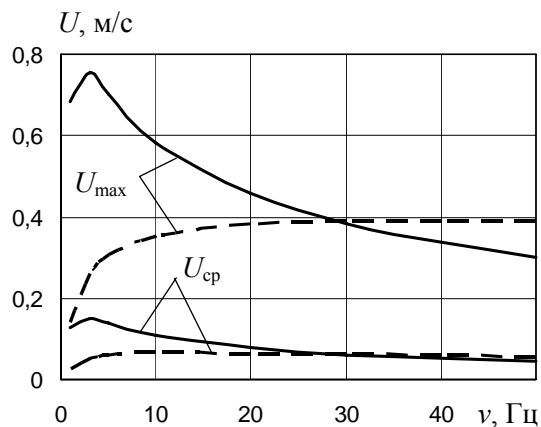


Рис. 5

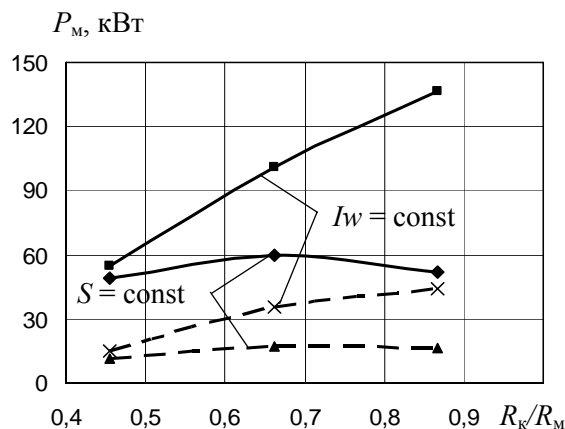


Рис. 6

тромагнитним способом. На рис. 6 для частоти 50 Гц приведенные расчетные значения мощности  $P_m$ , выделяемой в стали, при  $h = 0,25$  м (сплошные кривые) и при  $h = 0,5$  м (пунктирные кривые).

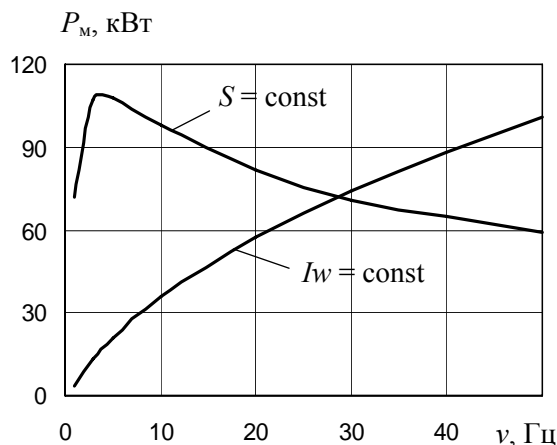


Рис. 7

Как следует из этого рисунка, соблюдение условия  $Iw = \text{const}$  приводит к росту мощности  $P_m$  с увеличением радиуса катушки, а при соблюдении условия  $S = \text{const}$  мощность тепловыделения практически не меняется, хотя ампервитки катушки при этом растут.

Влияние частоты  $\nu$  на тепловыделения в стали демонстрирует рис. 7. При  $Iw = \text{const}$  мощность  $P_m$  растет с увеличением частоты (полная мощность  $S$  при этом растет линейно), а при  $S = \text{const}$  эта же мощность, как следует из рисунка, достигает максимального значения примерно на частоте  $\nu = 3$  Гц (ампер-витки катушки  $Iw$  с ростом частоты при этом условии уменьшаются по экспоненте).

**Выводы.** Показана возможность осуществления перемешивания жидкого металла в металлургическом сталеразливочном ковше с помощью электромагнитного перемешивателя пульсирующего магнитного поля, расположенного сверху над ковшом. Практическая реализация предложенного решения будет зависеть от возможности решения защиты такого перемешивателя от теплового излучения (рабочая температура жидкой стали составляет порядка  $1600$  °С) и возможности конструктивного исполнения крепления перемешивателя (верхней крышки ковша), обеспечивающего минимальные потери в нем от наводимых катушкой вихревых токов.

1. Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 1. – С.61–66.
2. Эйдем М. Электромагнитная индукция перемешивает жидкую сталь // Steel Times International. – Выпуск № 4 на русском языке к Международной выставке (сентябрь 1996 г.). – С. 16–17.
3. Comsol Multiphysics. – <http://www.comsol.com>.
4. <http://new.abb.com/metals/abb-in-metals/offering/products/metallurgy-products/electromagnetic-stirrers-and-breaks-for-steel/lf-ems-for-ladle-furnace-operation>.

УДК 621.74 : 537.84

**Ю.М. Гориславец**, докт. техн. наук, **О.І. Глухенький**, канд. техн. наук, **О.І. Бондар**

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Перемешивания рідкої сталі в ковші пульсуючим магнітним полем**

Запропоновано перемішувати рідкий метал у металургійному ковші за допомогою пульсуючого магнітного поля, яке створює однофазний електромагнітний перемішувач, розташований зверху над ковшем. Виконано

комп'ютерне моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів у системі "перемішувач – ківш з рідким металом" для установки "ківш – піч", яка використовується для позапічної обробки рідкої сталі. Ефективність перемішування оцінювалася за усередненою по меридіанному перерізу ковша швидкістю руху металу. Отримано значення усередненої та максимальної швидкостей, а також потужності джоулевого тепловиділення в металі для різних радіусів котушки перемішувача, рівнів розміщення його відносно поверхні металу і частоти струму живлення. Бібл. 4, рис. 7.

**Ключові слова:** електромагнітне перемішування, рідкий метал, металургійний ківш, пульсуюче магнітне поле, комп'ютерне моделювання.

**Yu.M. Goryslavets, O.I. Glukhenkyi, O.I. Bondar**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **Stirring of liquid metal in ladle furnace by pulsing magnetic field**

*It was proposed to stir liquid metal in metallurgical ladle furnace using pulsing magnetic field, which creates single phase electromagnetic stirrer, disposed above the ladle. The computer modelling of electromagnetic and hydrodynamic processes in system "stirrer – ladle with liquid metal" was carried out in relation to installation "ladle – furnace", which is used for ladle processing of liquid steel. The effectiveness of stirring was estimated by averaged velocity of metal on the meridian section of ladle. Values of averaged and maximum velocity, as well as resistive losses in metal for different radius of coil of stirrer, location levels of it relative to the surface of metal and applied power frequency were obtained. References 4, figures 7.*

**Key words:** electromagnetic stirrer, liquid metal, metallurgical ladle furnace, pulsing magnetic field, computer modelling.

Надійшла 13.07.2016

Received 13.07.2016

УДК 621.372.061

## **ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ІНДУКТИВНО-ЄМНІСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ Г-ПОДІБНОЇ СТРУКТУРИ В СИСТЕМАХ КОМБІНОВАНОГО ЖИВЛЕННЯ**

**В.П. Кабан**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна  
e-mail: lotox@ied.org.ua

*Наведено результати порівняльного аналізу основних схем індуктивно-ємнісних перетворювачів Г-подібної структури у випадку застосування їх у системах комбінованого живлення електротехнологічних навантажень. Виявлено схеми з найменшою установленою потужністю елементів та видано рекомендації щодо їх застосування. Бібл. 2, рис.2, табл.2.*

**Ключові слова:** індуктивність, ємність, перетворювач, комбіновані системи живлення.

Комбіновані системи найчастіше застосовують для побудови систем живлення деяких електротехнологічних навантажень, які потребують незмінного струму та опір яких змінюється в неповному діапазоні. В цьому випадку існує можливість постачати електроенергію в навантаження від двох джерел: джерела струму та напруги [2]. Застосування такого способу живлення дає змогу значно зменшити установлену потужність устаткування. В той же час, якщо навантаження живиться змінним струмом, а джерелом струму є індуктивно-ємнісний перетворювач (ІСП), то його техніко-економічні показники можуть погіршуватись залежно від величини напруги, яка постачається в навантаження, та самої схеми ІСП.

**Метою роботи** є виявлення найбільш ефективної з точки зору встановленої потужності елементів схеми ІСП Г-подібної структури для застосування в системах комбінованого