

УДК 621.74: 537.84

**РАСЧЕТНЫЙ СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
ОДНОФАЗНЫХ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕЙ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА**

А.И.Глухенький, канд.техн.наук, **Ю.М.Гориславец**, докт.техн.наук, **А.В.Токаревский**, **В.Ю.Максименко**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина. e-mail: ugoris@ied.org.ua

Проведено комп'ютерне 3D моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів в електромагнітній системі, що складається з однофазного перемішувача і рідкого металу, що знаходиться в ванні відражательної печі. Електромагнітна задача для такої системи вирішувалась шляхом чисельного рішення диференціального рівняння для векторного магнітного і скалярного електричного потенціалів, а гідродинамічна – за допомогою рішення рівнянь Нав'є-Стокса для турбулентного течія рідкого металу з використанням к-ε моделі. Розглянуті конструктивні варіанти перемішувача в формі однофазних індукторів з II- і III-образними ферромагнітними сердечниками. Показано, що при рівних ампервитках і живленні їх током промислової частоти вони створюють практично однакові за структурою і інтенсивністю вихреві течія рідкого металу в ванні печі, однак при цьому споживана повна потужність во другому випадку приблизно в 2 рази вище. Встановлено суттєві відмінності цих індукторів за силового впливу на рідкий метал і характеру його руху в ванні печі при живленні їх током пониженої частоти (нижче 20 Гц). Бібл. 5, рис. 4.

Ключевые слова: однофазный индуктор, жидкий металл, компьютерное моделирование, электромагнитные силы, вихревое течение.

В современной металлургии с целью интенсификации процессов плавки и приготовления сплавов в печах и миксерах широко применяется электромагнитное перемешивание жидких металлов [3]. При этом для приведения металла в движение наиболее часто используются многофазные перемешиватели с бегущим магнитным полем [4, 5]. В то же время, в ряде случаев успешную альтернативу им могут составить однофазные электромагнитные перемешиватели жидких металлов с пульсирующим магнитным полем [2]. В первую очередь они могут быть использованы для перемешивания металла в отражательных печах для плавки алюминия и приготовления алюминиевых сплавов. Однофазный перемешиватель при его установке вдоль боковой стенки ванны такой печи позволяет создать в ней эффективное двухконтурное вихревое течение жидкого металла. В отличие от перемешивателей с бегущим полем в этом случае в движение вовлекаются не только пристеночные области жидкого металла, но и, что очень важно, центральная область (зона) ванны печи. Достоинством однофазного перемешивателя является также предельная конструктивная простота, которая предопределяет его высокую эксплуатационную надежность и ремонтпригодность. Повышенные по отношению к перемешивателям бегущего магнитного поля тепловыделения в жидком металле при их использовании не могут считаться недостатком, поскольку эти тепловыделения служат для полезного нагрева металла и покрытия тепловых потерь печи.

Ранее в работе [2] нами были представлены результаты компьютерного 2D моделирования электромагнитных и гидродинамических процессов в отражательной печи с однофазными перемешивателями пульсирующего магнитного поля различного конструктивного исполнения. В результате проведенных исследований было установлено, что наиболее эффективными среди электромагнитных перемешивателей пульсирующего магнитного поля являются перемешиватели, выполненные в виде однофазных индукторов с II- и III-образными ферромагнитными сердечниками. Несмотря на существенную разницу в силовом и тепловом воздействии на жидкий металл эти перемешиватели при сопоставимых габаритах и равных ампервитках обеспечивают практически одинаковую объемную производительность перемешивания жидкого металла в ванне отражательной печи. Эта производительность оказалась также примерно на одном уровне с производительностью электромагнитного перемешивателя с бегущим магнитным полем.

Цель настоящей работы – на основе компьютерного 3D моделирования электромагнитных и гидродинамических процессов в электромагнитной системе, состоящей из однофазного индуктора и

жидкого металла, находящегося в ванне отражательной печи, провести сопоставительный анализ двух конструктивных решений электромагнитного перемешивателя пульсирующего магнитного поля в виде П- и Ш-образных индукторов и обосновать выбор его рациональной конструкции.

Схематическое изображение двух однофазных индукторов, предназначенных для перемешивания жидкого металла, с обозначением основных размеров показано на рис. 1. П-образный индуктор содержит две катушки, расположенные на боковых стержнях (кернах) (рис. 1, а), а Ш-образный индуктор имеет одну катушку, которая размещена на среднем стержне сердечника (рис. 1, б). Индукторы пристыкованы к длинной боковой стенке ванны печи симметрично относительно металла как по длине, так и высоте.

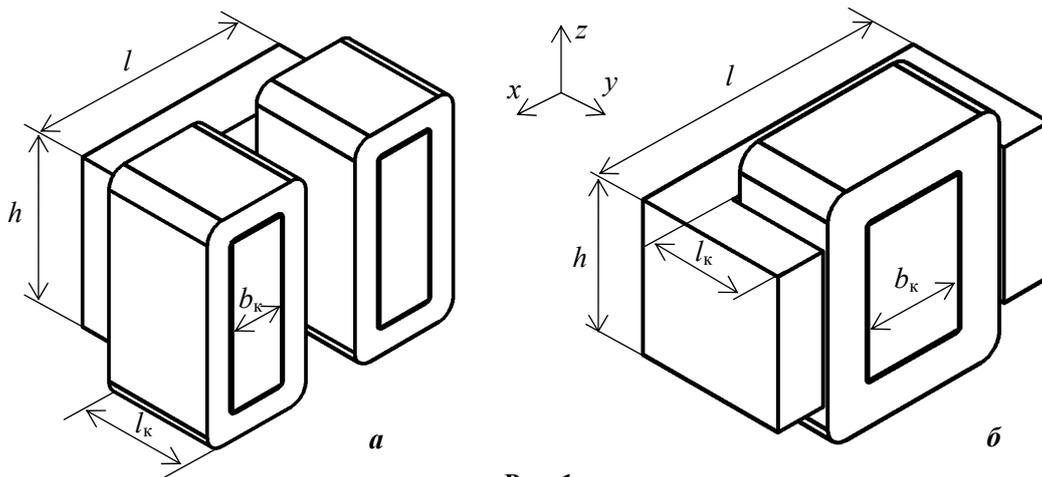


Рис. 1

Компьютерное моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов выполнялось в безындукционном приближении. Расчет электромагнитного поля проводился в соответствии с методикой, изложенной в работе [1], путем численного решения в трехмерной постановке дифференциального уравнения для векторного магнитного $\dot{\mathbf{A}}$ и скалярного электрического $\dot{\phi}$ потенциалов

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \dot{\mathbf{A}} + (\sigma + j\omega\varepsilon_0 \varepsilon_r) \nabla \dot{\phi} = \dot{\mathbf{J}}_{\text{вн}},$$

где μ_0 и ε_0 – магнитная и диэлектрическая проницаемости вакуума, μ_r и ε_r – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости, σ – удельная электропроводность, ω – угловая частота, $\dot{\mathbf{J}}_{\text{вн}}$ – плотность внешнего (стороннего) тока, распределение которого задано.

Отличие в подходе к решению электромагнитной задачи в настоящей работе состоит в том, что если в работе [1] с целью упрощения расчетов расчетная область ванны с жидким металлом разбивалась на две подобласти, из которых в электромагнитной задаче учитывалась только одна из них (которая примыкает к индуктору), то здесь рассматривалась вся ванна с жидким металлом, составляющая единую расчетную подобласть. Такая постановка задачи позволяет получить более точное решение, поскольку оно учитывает замыкание индуцированных токов во всем объеме ванны печи.

Гидродинамическая задача, как и ранее, решалась для области, занятой жидким металлом, посредством численного решения дифференциальных уравнений Навье-Стокса для турбулентного течения с использованием k-ε модели турбулентности

$$\rho_m (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{\text{эф}} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

где \mathbf{u} – скорость движения жидкого металла, ρ_m – плотность металла, p – давление, $\eta_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективной динамической вязкости металла, \mathbf{f} – удельные электромагнитные силы в жидком металле, полученные в результате решения электромагнитной задачи.

Моделирование проводилось для отражательной печи, ванна которой имеет размеры (в плане): (3×2) м², а высота металла в ней – 0,5 м. Размеры индукторов принимались следующими: длина сердечника $l=0,6$ м, высота $h=0,3$ м, длина керна (равная длине катушки) $l_k=0,1$ м, ширина керна $b_k=0,2$ м. Предполагалось, что между индуктором и жидким металлом находится неэлектропроводная (керамическая) стенка толщиной 0,1 м. Расчеты выполнялись при питании индукторов током промышленной частоты ($f=50$ Гц) при заданных ампервитках катушек $I_w=60$ кА (амплитудное значение).

Токовая нагрузка обоих индукторов принята одинаковой, т.е. суммарные ампервитки двух катушек П-образного индуктора равны ампервиткам катушки Ш-образного индуктора.

Расчетные области для среднего по высоте горизонтального сечения ванны печи с результатами расчетов в виде изолиний векторного магнитного потенциала и поля скоростей жидкого металла для каждого индуктора показаны на рис. 2. Рис. 2, а соответствуют П-образному индуктору, а рис. 2, б – Ш-образному. Анализ полученного в результате расчетов распределения электромагнитного поля показал, что в электромагнитном отношении системы с П- и Ш-образными индукторами существенно отличаются один от одного. Индуцируемые этими индукторами токи по-разному протекают в жидком металле. Если при Ш-образном индукторе они образуют один замкнутый контур, то при П-образном токи в металле циркулируют по двум контурам. Отличия в распределении токов и магнитных полей в этих системах приводят к различному распределению электромагнитных сил в жидком металле. Основная компонента электромагнитных сил f_y , которая определяет характер и интенсивность движения металла, в среднем по высоте сечения ванны печи имеет два одинаковых максимума для Ш-образного индуктора и один – для П-образного. Это хорошо согласуется с данными, полученными ранее в работе [2] в результате проведенного компьютерного 2D моделирования этих электромагнитных систем.

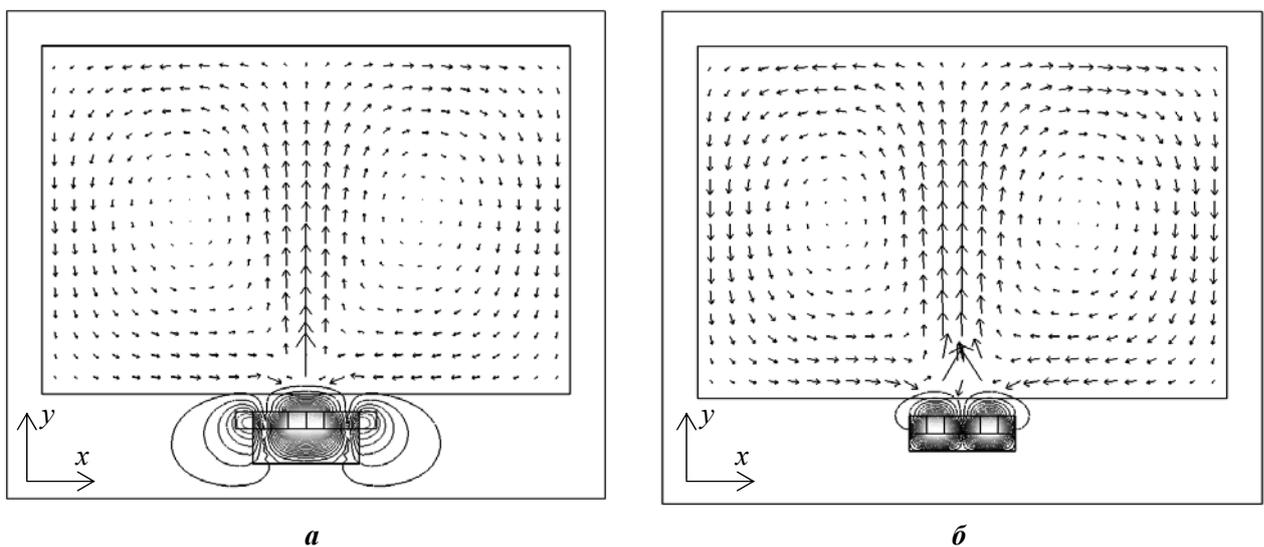


Рис. 2

Однако, несмотря на столь существенное различие исследуемых систем, полученные в результате решения гидродинамической задачи структуры течений жидкого металла в обоих случаях оказались очень похожими. Как П-образный (рис. 2, а), так и Ш-образный (рис. 2, б) индукторы создают в ванне печи двухконтурное вихревое течение жидкого металла с вовлечением в движение центральной зоны расплава.

Гидродинамическая эффективность обоих конструктивных решений оценивалась с помощью усредненной по всему объему жидкого металла V_m скорости расплава

$$W = \frac{1}{V_m} \int \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} dV.$$

На рис. 3 показаны зависимости этой скорости от длины индуктора (длины ферромагнитного сердечника) l при постоянстве всех остальных геометрических размеров, значения которых указаны выше. Сплошные линии на этом рисунке соответствуют П-образному индуктору, пунктирные – Ш-образному. Как следует из рисунка, при одинаковых ампервитках катушек скорость W несколько выше у Ш-образного индуктора, которая к тому же оказалась менее чувствительной к изменению его длины. Можно считать, что оптимальная с точки зрения эффективности перемешивания металла длина l для обеих конструкций находится в диапазоне 0,6...0,7 м. На этом же рисунке представлены также зависимости полной мощности каждого индуктора S , рассчитанной без учета потерь в катушках и ферромагнитном сердечнике. Расчет мощности S выполнялся в соответствии с методикой, изло-

женной в работе [2]. Отсюда видно, что для достижения примерно одинакового уровня скорости W

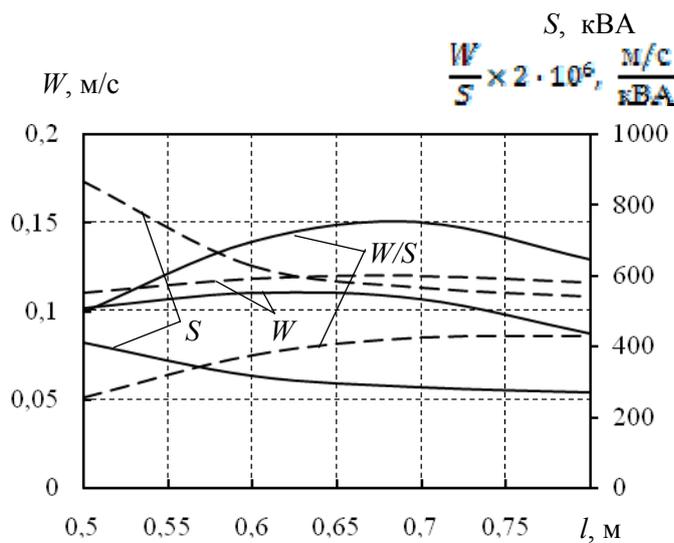


Рис. 3

Все предыдущие расчеты в этой работе выполнялись при питании катушек обоих индукторов током промышленной частоты. Как известно, частота тока существенно влияет на характер силового действия электромагнитного поля на жидкий металл. С уменьшением частоты, с одной стороны, ухудшается электромагнитное взаимодействие индуктора с расплавом, с другой – расширяется зона приложения объемных электромагнитных сил в жидком металле. Было проведено компьютерное моделирование электромагнитного поля и течения жидкого металла в ванне печи для обоих индукторов при питании их током разной частоты. На рис. 4 показаны результаты этого моделирования в виде зависимостей усредненной скорости W от частоты питающего тока при одинаковых ампервитках катушек индукторов. Сплошной линией, как и ранее, показана зависимость W для П-образного индуктора, пунктирной – для Ш-образного.

Как следует из рис. 4, в диапазоне частот 20...50 Гц скорость W для обоих индукторов примерно одинаковая и мало изменяется от частоты. Ниже 20 Гц эта скорость становится существенно зависимой от частоты, причем характер кривых в этом диапазоне частот достаточно сильно отличается друг от друга. В работе [1] проведен анализ этой зависимости для Ш-образного индуктора, которая на рис. 4 представлена пунктирной кривой. Было установлено, что для такого конструктивного решения существует некоторая критическая частота (в районе примерно 10 Гц), при которой наблюдается реверс, т.е. изменение направления движения вихревого течения жидкого металла в ванне печи. Выше этой частоты двухконтурное течение направлено от стенки, к которой примыкает индуктор, (как это показано на рис. 2, б), а ниже этого значения течение направлено в противоположную сторону.

Совсем иначе ведет себя П-образный индуктор. Во всем диапазоне изменения частоты питающего тока вихревое течение, созданное этим индуктором, направлено в одну сторону (рис. 2, а), т.е. в этом случае отсутствует реверс движения. Усредненная скорость металла для него, начиная примерно с 10 Гц, резко падает до нуля с уменьшением частоты. Исходя из представленных на рис. 4 расчетных данных, можно сделать вывод, что наиболее рациональным для обоих индукторов является

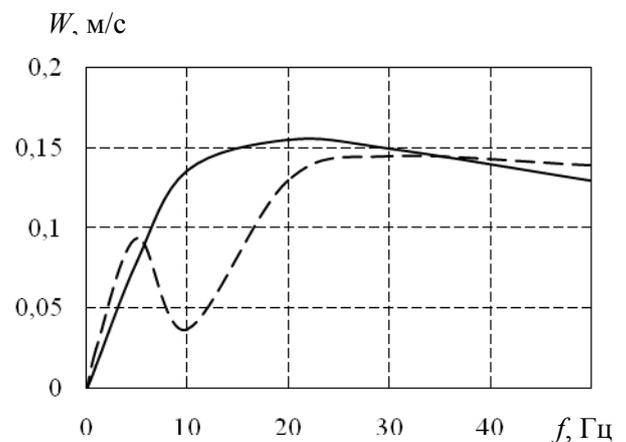


Рис. 4

полная мощность Ш-образного индуктора должна быть примерно в 2 раза выше мощности П-образного индуктора. В этом плане более рациональной (эффективной) следует считать конструкцию перемешивателя с П-образным индуктором.

Представление об эффективности каждого индуктора в зависимости от его длины может дать такой параметр как отношение усредненной скорости жидкого металла к полной мощности индуктора, т.е. W/S . Изменение этого параметра также показано на рис. 3, откуда следует, что оптимальная в указанном смысле длина П-образного индуктора составляет 0,7 м, а для Ш-образного она оказалась несколько большей. При длине сердечников этих индукторов 0,7 м мощность тепловыделений в жидком металле соответственно равна 15 и 23,4 кВт.

питание их током промышленной частоты, поскольку это не требует применения специальных преобразователей частоты.

Выводы. Проведенный расчетный сопоставительный анализ двух конструктивных решений однофазных перемешивателей жидкого металла с пульсирующим магнитным полем показал, что более экономичным следует считать перемешиватель, выполненный в виде однофазного индуктора с П-образным ферромагнитным сердечником и двумя катушками, расположенными на его стержнях. Питание указанного перемешивателя целесообразно осуществлять током промышленной частоты.

1. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Токаревский А.В. Трехмерное моделирование однофазного электромагнитного перемешивателя жидких металлов // Технічна електродинаміка. – 2013. – №5. – С. 77–84.

2. Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 61–66.

3. Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Горюк М.С., Слажнев Н.А., Скоробагатько Ю.П. Современные устройства для электромагнитного перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах повышенной емкости // Металл и литье Украины. – 2008. – №5.

4. Non ferrous casting: Equipment MHD Technology. – Riga, Latvia: Krāsainie lējumi, 2004. – 22 p.

5. Schmitz W. The HTM (High Turbulence Mixer) process and its application in the metallurgical industry / Proceedings of the International Congress on Electromagnetic Processing of Materials. – Paris-La-Defense, France, May 27-29, 1997. – Vol. 1. – Pp. 55–60.

УДК 621.74 : 537.84

РОЗРАХУНКОВИЙ ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОДНОФАЗНИХ ПЕРЕМІШУВАЧІВ РІДКОГО МЕТАЛУ

О.І.Глухенький, канд.техн.наук, **Ю.М.Гориславец**, докт.техн.наук, **А.В.Токаревський**, **В.Ю.Максименко**

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ- 57, 03680, Україна.

e-mail: ugoris@ied.org.ua

Проведено комп'ютерне 3D моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів в електромагнітній системі, яка складається з однофазного перемішувача та рідкого металу, що знаходиться у ванні відбивної печі. Електромагнітна задача для такої системи розв'язувалася шляхом чисельного рішення диференціального рівняння для векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів, а гідродинамічна – за допомогою рішення рівнянь Нав'є-Стокса для турбулентної течії рідкого металу з використанням k-ε моделі. Розглянуто конструктивні варіанти перемішувача у вигляді однофазних індукторів з П- і Ш-подібними ферромагнітними осерддями. Показано, що при рівних ампервитках і живленні їх струмом промислової частоти вони створюють практично однакові за структурою та інтенсивністю вихрові течії рідкого металу у ванні печі, хоча при цьому споживана повна потужність в другому випадку приблизно в 2 рази більша. Встановлено істотні відмінності цих індукторів по силовому впливу на рідкий метал і характеру його руху у ванні печі при живленні їх струмом зниженої частоти (нижче 20 Гц). Бібл. 5, рис. 4.

Ключові слова: однофазний індуктор, рідкий метал, комп'ютерне моделювання, електромагнітні сили, вихрова течія.

COMPUTATIONAL COMPARATIVE ANALYSIS OF SINGLE-PHASE LIQUID METAL STIRRERS

O.I.Glukhenkiy, Yu.M.Goryslavets, A.V.Tokarevskiy, V.Yu.Maksymenko

Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail: ugoris@ied.org.ua

The computer 3D modelling of electromagnetic and hydrodynamic processes in electromagnetic system consisting of single-phase stirrer and liquid metal in bath reverberatory furnace is executed. The electromagnetic problem for such system is solved by numerical calculation of differential equations for the magnetic vector and scalar electric potentials. The hydrodynamic problem is solved by calculation of the Navies-Stokes equations for turbulent flow using the k-ε model. The stirrer design options in the form of single-phase inductor with П- and Ш-shaped ferromagnetic cores is considered. It is shown that at the same ampere-turns and feeding them commercial frequency current, they provide practically the identical vortex liquid metal flow in structure and intensity, although the total network power consumption in the second case approximately 2-fold higher. The considerable differences between these inductors in power action on liquid metal and in nature of its motion in furnace bath were found at low supply current frequency (below 20 Hz). References 5, figures 4.

Keywords: single-phase inductor, liquid metal, computer simulation, electromagnetic forces, vortex flow.

1. Glukhenkiy A.I., Gorislavets Yu.M., Tokarevskiy A.V. Three-dimensional simulation of single-phase electromagnetic stirrer of liquid metal // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No. 5. – Pp. 77–84. (Rus)

2. Dubodelov V.I., Fiksen V.N., Glukhenkiy A.I., Gorislavets Yu.M. MHD mixers of aluminum alloys with pulsed magnetic field // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2009. – No. 1. – Pp. 61–66. (Rus)

3. Dubodelov V.I., Fiksen V.N., Goriuk M.S., Slazhnev N.A., Skorobogatko Yu.P. Modern devices for electromagnetic stirring of molten aluminum in high-capacity furnaces and mixers // Metal i litio Ukrainy. – 2008. – No. 5. (Rus)

4. Non ferrous casting: Equipment MHD Technology. – Riga, Latvia: Krāsainie lējumi, 2004. – 22 p.

5. Schmitz W. The HTM (High Turbulence Mixer) process and its application in the metallurgical industry / Proceedings of the International Congress on Electromagnetic Processing of Materials. – Paris-La-Defense, France, May 27-29, 1997. – Vol. 1. – Pp. 55–60.

Надійшла 20.03.2014