

отопления (варианты) и регенеративная насадка (варианты) для осуществления способов. – Введ. 26.02.2006. Дистергефт И.Г., Дистергефт И.И. – Екатеринбург, 2008. – 76 с.

3. Куклев А.В., Разработка технологии снижения поверхностного окисления и обезуглероживания стальных заготовок при нагреве с применением кратковременных технологических защитных покрытий: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.16.02 / А.В. Куклев; ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт чёрной металлургии им. И.П. Бардина». – Москва, 2014. – 158 с.

4. Патент РФ № 2571032. Способ защиты стальных заготовок от окисления при нагреве перед обработкой давлением. – Введ. 20.12.2014 – Москва: ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет» «МИСиС», 2015. – 3 с.

УДК 621

*Е. Л. Швыдкий, К. Е. Болотин, И. А. Смольянов, Ф. Е. Тарасов, С. А. Бычков*  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО АЛЮМИНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СОСУДЕ**

Применение технологии электромагнитного перемешивания в металлургии имеет большой потенциал. В черной металлургии применение электромагнитных перемешивателей для дуговых печей демонстрируют очевидные преимущества для клиентов в энерго-, ресурсосбережении и выходе годного [1]. В машинах непрерывного литья оснащенных электромагнитными перемешивателями достигается повышение качества литых заготовок [2]. В цветной металлургии на стадии приготовления расплава в миксерах [3] и отливки [4] применение технологии электромагнитного перемешивания позволяет повысить производительность технологического процесса и качество отливаемых полуфабрикатов и изделий, оснащенных электромагнитным перемешивателем, производительность значительно возрастает.

Помимо применения в металлургии в последнее время широкое распространение получила технология производства композитных материалов [5] с использованием электромагнитного перемешивания, а также выращивание полупроводниковых кристаллов под воздействием электромагнитного поля [6].

Широкое применение данной технологии объясняется такими преимуществами как, бесконтактное воздействие, легкость в управлении и модульность. Однако для каждой технологической задачи необходимо разрабатывать уникальный перемешиватель. В связи с вышеперечисленным возникает потребность в разработке индукторов различных конструкций и характеристик, которые будут способны развивать перемешивания требуемой интенсивности и характера.

Поскольку жидкие металлы являются непрозрачной жидкостью, а электропроводность электролизов очень мала инструмент численного моделирования является наиболее выгодным для исследований в области магнитной гидродинамики [7]. В данной работе представлена модель электромагнитного перемешивается жидкого алюминия.

Геометрия модели состоит электромагнитного перемешивателя с расплавом показанными на рис. 1. Проводники индуктора подключены к трехфазному источнику переменного тока и генерируют вращающее магнитное поле. Магнитное поле через магнитопровод и вставки проникает в расплавленный металл. Расплавленный алюминий обладает хорошей электропроводностью (около 3 МСм/м) и находясь под воздействием переменного магнитного поля в нем индуцируется вихревой ток. Поскольку магнитное поле проникает с низу емкости с металлом, электрический ток возникает преимущественно на нижней поверхности, экспоненциально затухая. Взаимодействие магнитного поля, создаваемого вихревыми тока-

ми в расплаве, с вращающимся полем индуктора порождает поле усилий в расплаве, которое вызывает движение жидкости.

Первым этапом решения является электромагнитный расчет и определение поля усилий, действующих на расплав. Как видно из рис. 2 результирующая картина распределения электромагнитного усилия имеет два полюса и создает момент вокруг оси z.

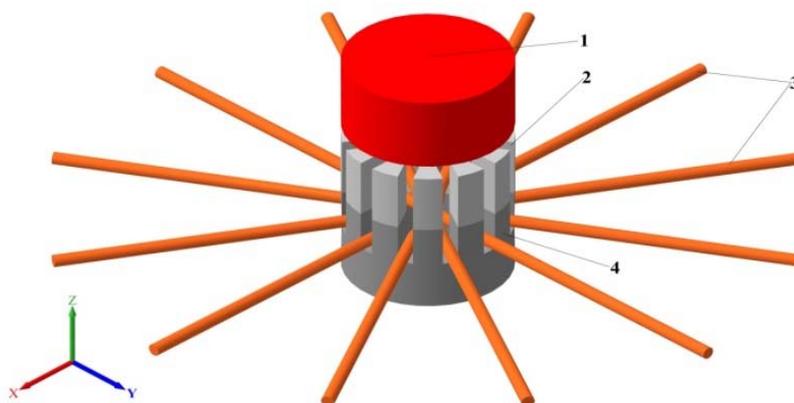


Рис. 1. Геометрия лабораторного электромагнитного перемешивателя:  
1 – расплавленный металл; 2 – магнитодиэлектрические вставки;  
3 – медные трубки индуктора; 4 – магнитопровод

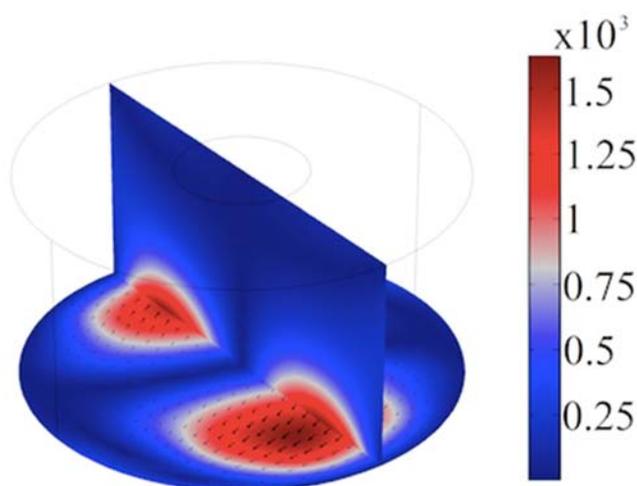


Рис. 2. Плотность электромагнитных сил в объеме расплавленного металла, Н/м

Электромагнитное усилие является источником членом в гидродинамической задаче. Поскольку перемешивателям индукционного типа характерны высокие плотности усилий они генерируют неустойчивые турбулентные течения. Для данного применения хорошо зарекомендовали себя полуэмпирические модели, использующих подход опреснения по Рейнольдсу (RANS) [7]. В связи с вышеперечисленным для решения была выбрана модель k- $\omega$  SST (Shear Stress Transport). Результатом решения гидродинамической задачи является поле скоростей, экспортируемое в уравнения задачи теплообмена.

Начальным условием решения тепловой задачи является распределение температуры по объему жидкого металла. Задан градиент от нижней к верхней поверхности с перепадом в 15 градусов. К допущениям на данном этапе исследования относятся граничные условия тепловой изоляции расплава, а также свободноконвективные течения не учитываются.

На рисунке 3 показана динамика выравнивания температуры по объему расплавленного металла. Видно, как на второй секунде металл с нижнего слоя начинает проникать в верхний, более холодный. Затем под действием центробежных сил горячий металл отжимается к стенкам емкости и после восьми секунд температура полностью гомогенизируется.

Представленная численная модель реализована в коммерческом пакете Comsol Multiphysics позволяющий организовывать вычисления связанных задач с большим количеством степеней свободы. Показана возможность применения вращающегося магнитного поля для интенсивного переживания объема жидкого металла.

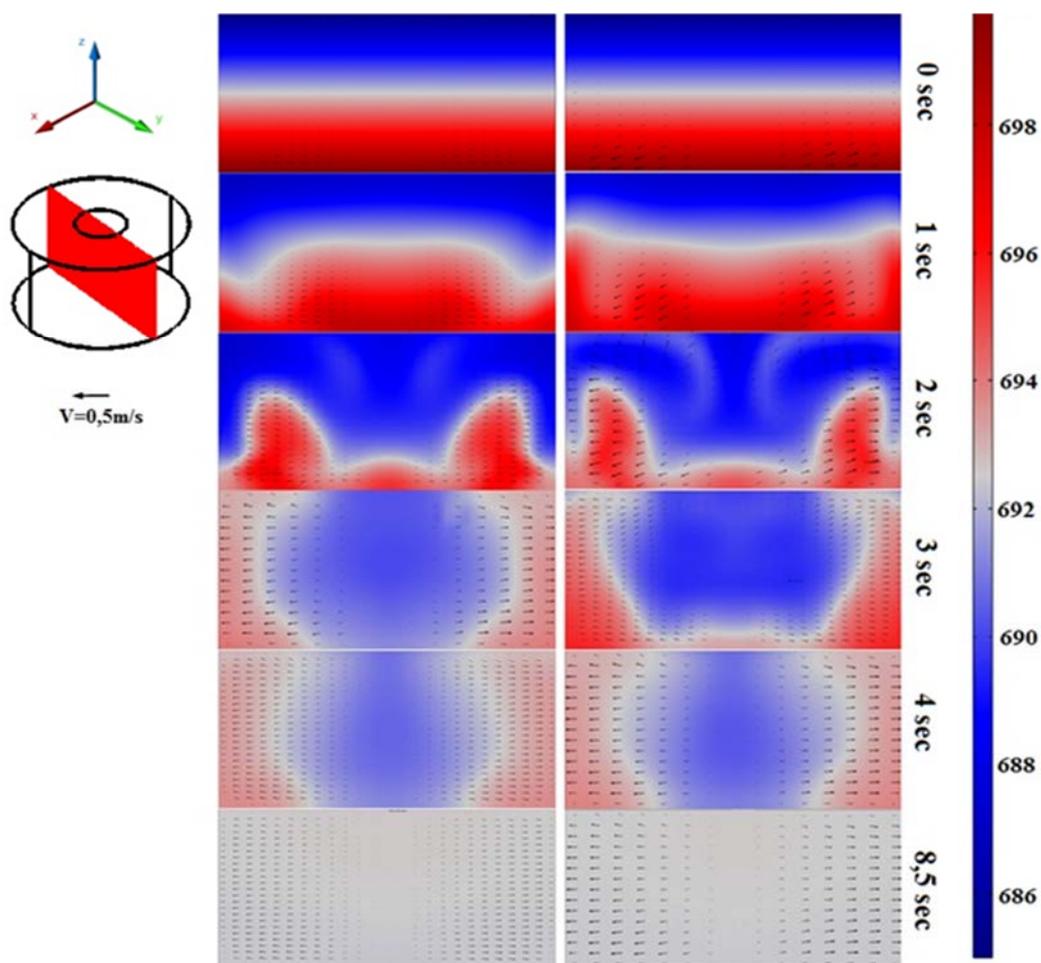


Рис. 3. Динамика распределения температуры и поле скоростей расплава во время электромагнитного перешивания

#### Список использованных источников

1. Fhdila R.B. [и др.]. A stirring history // ABB Review, 2015.
2. Yang Y. [и др.]. Design of magnetic fields for half and full type electromagnetic swirl flow generators // Steel Research Int., 2015.
3. Тимофеев В.Н., Хацаюк М.Ю. Анализ электромагнитных процессов магнитогидродинамического перемешивателя жидких металлов // Электричество, №1, 2017.
4. Сарапулов Ф.Н. [и др.]. Снижение энергозатрат в металлургическом производстве за счет применения МГД-технологий // Промышленная энергетика, № 12, 2016.
5. Sillekens W.H. [и др.]. The ExoMet project: EU/ESA research on high-performance light-metal alloys and nanocomposites // Metallurgical and Materials Trans. A, 2014.
6. Geza V. [и др.]. Anisotropy of flow and transitions between mixing regimes in a physical model of directional solidification // Magneto hydrodynamics, 2015.
7. Spitans S. [и др.]. Numerical modeling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field: part I. implementation and verification of model // Metallurgical and Materials Trans. B, 2013.

8. Хацаюк М.Ю. Индукционная установка с МГД воздействием в процессе приготовления и разлива высоколегированных алюминиевых сплавов // дис. канд. техн. наук. Екатеринбург, 2013.

УДК 536.2; 621.1

*Л. А. Шмакова, Ю. Р. Гильметдинова, Н. А. Семенов, В. А. Микула*

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА НА УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА И ДЛИНУ ТРУБНОГО ЭЛЕМЕНТА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ КОМПРИМИРОВАННОГО ВОЗДУХА**

### **Аннотация**

*В работе рассмотрено теплообменный элемент высокотемпературного воздухонагревателя компримированного воздуха. Высокотемпературный воздухонагреватель является одним из ключевых элементов в схеме гибридной ПГУ–ВЦГ с внешним сжиганием топлива на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива. Проанализировано влияние диаметра трубного теплообменного элемента на удельные затраты поверхностей нагрева и длину трубного элемента.*

*Ключевые слова: высокотемпературный нагрев, теплообменный элемент; воздух; затраты; диаметр; длина.*

### **Abstract**

*The article deals with heat-exchange element of high-temperature compressed air heater. The high-temperature air heater is one of the key elements in the scheme of hybrid integrated gasification combined cycle with external fuel combustion based on processes of coal heat treatment and "external" combustion of fuel. The influence of the tubular heat-exchange element diameter on the heating surface unit costs and length of piped element is analyzed in this paper.*

*Keywords: high-temperature heating; heat-exchange element; air; costs; diameter; length.*

Энергосбережение в современном технократическом обществе является наиболее важной мерой в вопросах сохранения природных ресурсов, так как из года в год растет стоимость этих ресурсов. К тому же в последние годы остро встал вопрос экологических загрязнений. Все эти факторы подталкивают исследователей на поиски новых источников энергии или же на создании экономически оправданных и экологически чистых технологий.

Одним из перспективных направлений по разработке высокоэффективного способа использования природных ресурсов в виде угля является развитие ПГУ на твердом топливе. На базе Уральского федерального университета ведутся исследования гибридной ПГУ–ВЦГ с внешним сжиганием твердых топлив.

Одним из ключевых элементов в схеме гибридной ПГУ–ВЦГ с внешним сжиганием топлива на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива является высокотемпературный воздухонагреватель, в нем нагревается сжатый воздух (до 750–1000 °С), направляемый затем в камеру сгорания газовой турбины.

Ранее отмечалось, что при разработке высокотемпературных воздухонагревателей основной проблемой является конструкционный материал труб [3]. Исходя из этого, геометрические характеристики теплообменной трубы подбираются таким образом, чтобы удовлетворить двум основным требованиям: высокой эффективности теплопередачи и эксплуатационной надежности при минимальных стоимостных показателях.

Удельные денежные затраты (капитальные и эксплуатационные) на передачу одного