

15. Chuchueva, I.A., Inkina, N.E. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*, 2015, no. 8, pp. 195–238.

16. Heinhold, I. *Ingenieur statistic*. München; Wien: Springer Verlag, 1964. 352 p.

Бубнов Кирилл Николаевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант,
e-mail: kirill.bubnov.96@mail.ru
Bubnov Kirill Nikolayevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Master student, e-mail: kirill.bubnov.96@mail.ru

Барочкин Алексей Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru
Barochkin Aleksei Yevgenyevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Thermal Power Plants Department, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru

Жуков Владимир Павлович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru
Zhukov Vladimir Pavlovich,
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Applied Mathematics Department, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой тепловых электрических станций, телефон (4932) 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru
Ledukhovsky Grigory Vasilievich,
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Head of Thermal Power Plants Department, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: lgv83@yandex.ru

УДК 669.187.2; 537.84

ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В РАСПЛАВЕ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

А.Л. КУХАРЕВ

ГОУВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», г. Луганск, Украина
E-mail: alex.kuharev@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Современным направлением совершенствования технологии производства стали в высокоомощных дуговых печах является интенсификация магнитогидродинамических эффектов для перемешивания расплава. В связи с этим актуальным является исследование особенностей теплопереноса в расплаве печи с учетом взаимодействия электровихревой и термогравитационной конвекции.

Материалы и методы. Результаты получены с помощью трехмерной математической модели магнитогидродинамических и тепловых процессов, построенной при использовании безындукционного приближения с учетом $k-\varepsilon$ модели турбулентности. В качестве теплогенерирующих источников модель учитывает тепловые потоки от электрических дуг и джоулев нагрев. Обработка результатов произведена с использованием методов визуализации вихревых структур.

Результаты. Предложена конструкция печи, содержащая три сводовых и три подовых электрода, обеспечивающая формирование дополнительных электровихревых течений в расплаве. Показано, что при заданных условиях моделирования и токах в электродах 80 кА в результате взаимодействия электровихревой и термогравитационной конвекции в расплаве печи формируется многовихревая структура течений. Установлено, что вблизи оси ванны доминирует электровихревая конвекция, тер-

термогравитационная конвекция, обусловленная неравномерным нагревом расплава, приводит к уменьшению размеров основного электровихревого течения и формированию дополнительного течения вблизи боковых стенок печи. Зафиксированы максимальные значения скорости 2 м/с в областях расплава, находящихся под электрическими дугами. При этом скорость нисходящего течения под электрическими дугами уменьшается, а скорость восходящего течения в области подовых электродов увеличивается. Выявлено влияние термогравитационной конвекции на азимутальные течения расплава в основном в области подовых электродов, что приводит к увеличению азимутальной скорости и смещению центров вихрей к центру ванны.

Выводы. Верификация предложенной модели выполнена путем сопоставления результатов расчета с данными экспериментов, полученных на лабораторных установках с различными схемами расположения электродов. Результаты предполагается использовать для дальнейшего улучшения энергетических и конструктивных параметров дуговых печей.

Ключевые слова: дуговая печь, магнитная гидродинамика, электровихревые течения, термогравитационная конвекция

CHARACTERISTICS OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN THE MELT OF MULTI-ELECTRODE ARC FURNACE

A.L. KUKHAREV

Lugansk Vladimir Dalh National University, Lugansk, Ukraine

E-mail: alex.kuharev@mail.ru

Abstract

Background. The modern direction of improving the technology of steel production in high-power arc furnaces is the intensification of magnetohydrodynamic effects for melt mixing. In this regard, it is relevant to study the characteristics of heat transfer in the melt of this furnace, taking into account the interaction of electrovortex and thermogravitational convection.

Materials and methods. The results were obtained using a three-dimensional mathematical model of magnetohydrodynamic and thermal processes, constructed using a non-inductive approximation, taking into account the $k-\varepsilon$ turbulence model. As heat-generating sources, the model takes into account the heat flows from electric arcs and Joule heating. Processing of the results was carried out using visualization methods of vortex structures.

Results. A furnace design containing three arched and three bottom electrodes and providing the formation of additional electrovortex flows in the melt is proposed. It is shown that under the given simulation conditions and currents in 80 kA electrodes a multivortex flow is formed in the furnace melt as a result of the interaction of electrovortex and thermogravitational convection. Electroconvective convection dominates near the bath axis. Thermogravitational convection, due to uneven heating of the melt, leads to a reduction in the size of the main electrovortex flow and the formation of an additional flow near the side walls of the furnace. Maximum speeds of 2 m/s are fixed in the melt areas under electric arcs. In this case, the speed of the downward flow under the electric arcs decreases, and the speed of the upward flow in the region of the bottom electrodes increases. The effect of thermogravitational convection on the azimuthal melt flow is manifested mainly in the region of the bottom electrodes, leading to an increase in the azimuthal velocity and displacement of the vortices to the center of the bath.

Conclusions. The verification of the proposed model was carried out by comparing the calculation results with the experimental data obtained in laboratory installations with various electrode arrangements. The results will be used to further improve the energy and design parameters of arc furnaces.

Key words: arc furnace, magnetohydrodynamics, electrovortex flows, thermogravitational convection

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.2.013-022

Введение. В настоящее время среди электрометаллургических агрегатов к отдельной группе можно отнести высоко-мощные дуговые сталеплавильные печи, в которых емкость ванны расплава превышает 100 т, а установленная мощность

превышает 100 МВА при токах в электродах 50–150 кА [1–2]. Для снижения нагрузок на электроды и распределения вводимой электрической мощности такие печи, как правило, выполняются многоэлектродными, причем для усиления магнитогидро-

намических эффектов при перемешивании расплава предложены различные схемы расположения сводовых и подовых электродов [1, 3].

В патенте [4] нами предлагается конструкция дуговой печи, которая содержит три подовых и три сводовых электрода, причем угол между смежными осями сводовых и подовых электродов составляет 60° . Такая компоновка электродов в ванне, как показано в [5], при питании постоянным током или током низкой частоты (0,01–1 Гц) обеспечивает подавление скин-эффекта и улучшение равномерности распределения электромагнитных сил в расплаве.

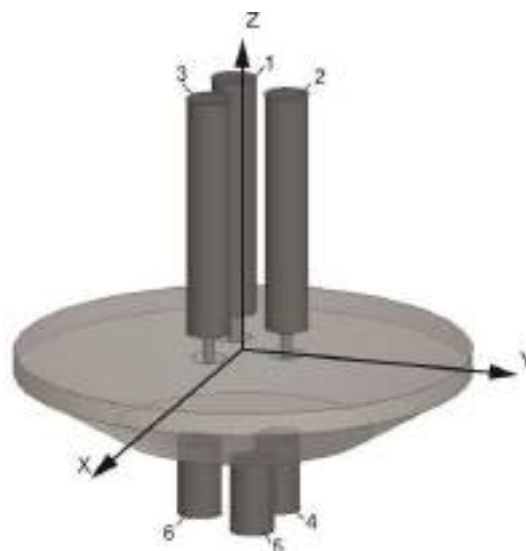
В [6] показано, что основными механизмами теплопереноса в расплаве таких печей является электровихревая и термогравитационная конвекция. Однако вопросы взаимодействия электровихревой и термогравитационной конвекции для многоэлектродных печей все еще недостаточно проработаны.

Целью исследования является изучение особенностей электровихревой и термогравитационной конвекции в расплаве шестиэлектродной дуговой печи при ее питании постоянным током.

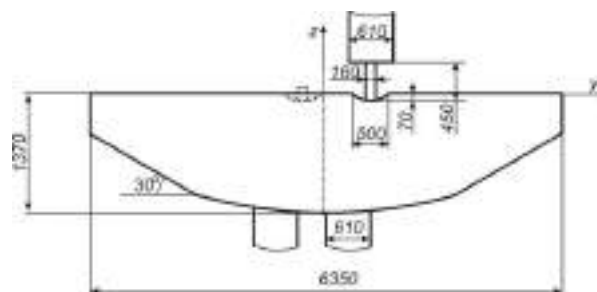
Методы исследования. Предлагаемая шестиэлектродная дуговая печь в данном исследовании имела ванну цилиндросфероконической формы емкостью 180 т. Геометрическая модель и профиль ванны представлены на рис. 1 с указанием основных геометрических размеров ванны.

При построении модели считалось, что весь металл находится в расплавленном состоянии (заключительный период плавки), поэтому влияние футеровки на теплоперенос не учитывалось. Электрические дуги представлялись в модели однородными цилиндрическими проводниками, располагаемыми в центрах поперечного сечения соответствующих сводовых электродов. Также предполагалось наличие вогнутых менисков в области расплава под электрическими дугами.

Шлаковый слой в модели не учитывался, электроды и дуги учитывались только при расчете электромагнитного поля [5]. В гидродинамических и тепловых расчетах влияние электрических дуг учитывалось посредством введения соответствующих граничных условий в области менисков.



а)



б)

Рис. 1. Геометрическая модель ванны печи: а – общий вид; б – профиль ванны в направлении оси Y; 1, 2, 3 – сводовые электроды; 4, 5, 6 – подовые электроды

При разработке математической модели в качестве основного допущения принято магнитогидродинамическое приближение, при котором рассматриваемые процессы описываются системой уравнений магнитной гидродинамики [1, 7], при этом не учитываются химические реакции, а среды в пределах выделенных зон считаются однородными, изотропными и немагнитными. Так как магнитное число Рейнольдса $Re_m < 1$, то перенос магнитного поля потоком электропроводной жидкости не учитывался [1, 7].

Ввиду различных особенностей ведения технологического процесса в печах на данном этапе не учитывался теплообмен между шлаком и расплавом, а также влияние топливно-кислородных горелок. Так как число Рейнольдса для течений расплава составляет $Re = 10^4 - 10^5$, то для описания турбулентности используем $k-\varepsilon$ модель, которая при ее относительной простоте обес-

печивает наиболее близкие к экспериментальным данным распределения скоростей [1, 8]. При принятых допущениях базовые уравнения модели имеют следующий вид:

- уравнение энергии

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = -\rho C_p (\vec{v} \cdot \nabla T) + \lambda_{\text{э}} \nabla^2 T + Q; \quad (1)$$

- уравнение Навье – Стокса

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \eta_{\text{э}} \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} + \vec{F}; \quad (2)$$

- уравнение неразрывности потока

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0; \quad (3)$$

- уравнения k - ε модели турбулентности

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} k) = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] +$$

$$+ G_k + G_b - \rho \varepsilon;$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] +$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k};$$

- уравнение Колмогорова–Прандтля

$$\eta_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (6)$$

- уравнение для турбулентной теплопроводности

$$\lambda_T = \frac{C_p \eta_T}{Pr_T}; \quad (7)$$

- уравнение состояния для описания зависимости плотности от температуры

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)], \quad (8)$$

где переменные модели: \vec{v} – скорость движения расплава, м/с; p – давление, Па; T – температура, К; $\eta_{\text{э}} = \eta + \eta_T$ – эффективный коэффициент динамической вязкости, Па·с; $\lambda_{\text{э}} = \lambda + \lambda_T$ – эффективный коэффициент теплопроводности расплава, Вт/(м·К); k – турбулентная кинетическая энергия, м²с⁻²; ε – диссипация кинетической энергии турбулентности, м²/с³; G_k – специфическая генерация турбулентности от средних градиентов скорости; G_b – специфическая генерация турбулентности от силы Архимеда; $C_{3\varepsilon}$ – коэффициент, зависящий от направлений потока и гравитационной силы.

Силы Лоренца в расплаве $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ и плотность джоулева нагрева $Q = |\vec{J}|^2 / \sigma$ определялись на основании расчета электромагнитного поля, базовые уравнения и граничные условия для электромагнитного поля подробно описаны в [5]. Моделирование печи проводилось при значениях токов в электродах 80 кА.

Характеристики электрических дуг определялись нами на основании численного решения уравнения Эленбааса – Геллера [9].

Постоянные параметры модели, определяемые свойствами расплава жидкой стали и постоянными модели турбулентности, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Постоянные параметры модели

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Плотность	ρ_0	кг/м ³	6900
Характерная температура	T_0	К	1900
Коэффициент динамической вязкости	η	Па·с	0,007
Коэффициент молекулярной теплопроводности	λ	Вт/(м·К)	35
Теплоемкость	C_p	Дж/(кг·К)	792
Коэффициент объемного расширения	β	К ⁻¹	0,00014
Турбулентное число Прандтля	Pr_T		0,85
Постоянные модели турбулентности	$C_{1\varepsilon}$		1,44
	$C_{2\varepsilon}$		1,92
	C_μ		0,09
	σ_ε		1,0
	σ_k		1,3

Используемые граничные условия (ГУ) приведены в табл. 2. Отметим, что в мощных дуговых печах в ходе плавки формируют шлаковый слой, покрывающий верхнюю поверхность расплава. Таким образом, на этой поверхности применялось условие теплоизолированности.

Таблица 2. Граничные условия

Наименование поверхности	Накладываемые ГУ	
	гидродинамические	тепловые
Нижняя и боковая стенки ванны	Условие прилипания: $v = 0$	Условие первого рода: $T_r = 1900 \text{ K}$
Области менисков электрических дуг	Условие прилипания: $v = 0$	Условие второго рода: $q_r = 6,43 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ [8]
Верхняя поверхность расплава	Условие прилипания: $v = 0$	Условие теплоизоляции: $q_r = 0$

Результаты исследования. На первом этапе были исследованы течения расплава без учета термогравитационной конвекции, при этом уравнение (8) не использовалось, а в уравнениях (4) и (5) полагалось $G_b = 0$.

Результаты моделирования течений в вертикальном сечении ванны, проходящем через ось Y , без учета термогравитационной конвекции приведены на рис. 2, где сплошными линиями показаны линии тока (линии скорости), а стрелками – направления потоков.



Рис. 2. Траектории течения расплава в вертикальном сечении ванны вдоль оси Y без учета термогравитационной конвекции

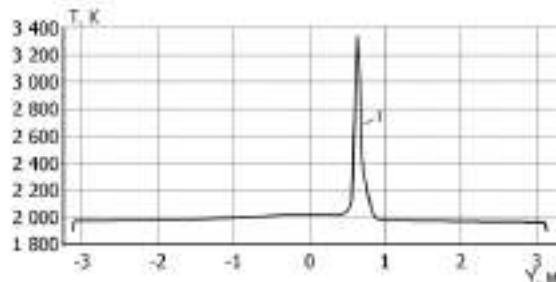
Анализ полученных результатов (рис. 2) показывает, что структура течений расплава – многоточечная. В зоне под электрическими дугами формируются мощные струи расплава, направленные под углом приблизительно 20° (относительно осей электрических дуг) к подине печи. Ширина этих струй в средней по глубине части ванны составляет около 800 мм. Максимальная скорость в струе расплава достигает 2,2 м/с. В нижней части ванны расплав растекается к периферии со скоростями 0,2–0,5 м/с. Далее расплав медленно ($v < 0,2 \text{ м/с}$) поднимается на поверхность на участке, удаленном приблизительно на 2500 мм от оси ванны, и далее

направляется к соответствующей области дуги, где вновь вовлекается электромагнитными силами вглубь ванны. На рис. 2 это течение обозначено как первый контур циркуляции расплава.

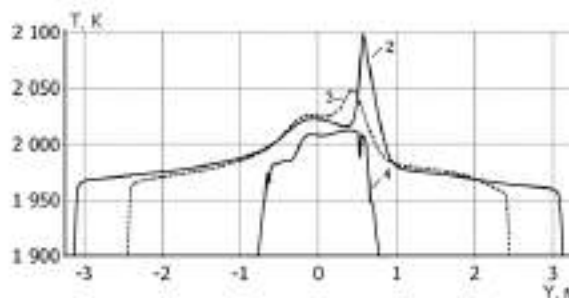
В областях между электрическими дугами формируются восходящие вихревые потоки с максимальной скоростью вблизи подовых электродов (0,5–0,7 м/с). Ширина струи восходящего течения в средней части ванны составляет около 1200 мм. Отчетливо наблюдается второй контур циркуляции, в котором расплав вблизи оси ванны движется вверх, а на поверхности медленно движется к периферии.

Кроме того, в районе пятна дуги между первым и вторым контуром имеется малый вихрь, движущийся в противоположную сторону относительно первого контура циркуляции. Под электрической дугой течение в этом контуре направлено вниз, но уже примерно в середине глубины ванны оно разворачивается вверх под действием течения второго вихря. На поверхности расплава его движение направлено от центра ванны к области электрической дуги с максимальной скоростью около 0,5–1 м/с непосредственно под мениском дуги.

Учет в модели термогравитационной конвекции, формируемой вследствие неравномерного нагрева расплава (рис. 3), несколько изменяет структуру течений.



а)



б)

Рис. 3. Графики распределения температуры вдоль оси Y : 1 – при $Z = -70 \text{ мм}$; 2 – $Z = -310 \text{ мм}$; 3 – $Z = -715 \text{ мм}$; 4 – $Z = -1320 \text{ мм}$

В общем случае взаимодействие электровихревой и термогравитационной конвекции можно пояснить с помощью показанной на рис. 4 схемы, согласно которой в области электрических дуг электровихревые и естественно-конвективные течения являются противоположенными, а в области подовых электродов направления электровихревой и термогравитационной конвекции совпадают.

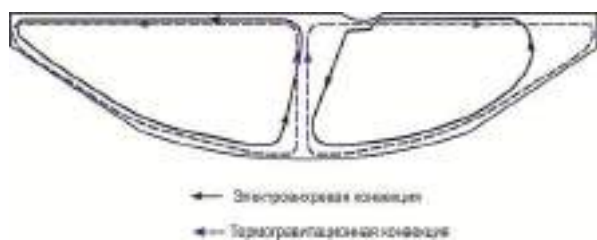


Рис. 4. Упрощенная схема взаимодействия электровихревой и термогравитационной конвекции

Также для оценки влияния термогравитационной конвекции нами использовался критерий Ричардсона:

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2}. \quad (9)$$

График распределения локального числа Ричардсона вдоль диаметра ванны приведен на рис. 5. Его анализ показывает, что вблизи оси ванны $Ri \approx 1$, это говорит о том, что влияние электровихревой конвекции велико, а влияние сил плавучести незначительно. Вблизи боковых стенок $Ri > 3$ (перепад температур около 50 К), что на структуре течений в вертикальной плоскости проявляется в уменьшении размеров первого контура циркуляции и формировании четвертого контура (рис. 6). При этом интенсивность течений во втором и третьем контурах увеличивается.

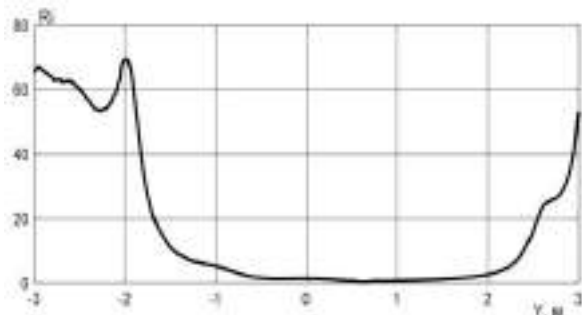
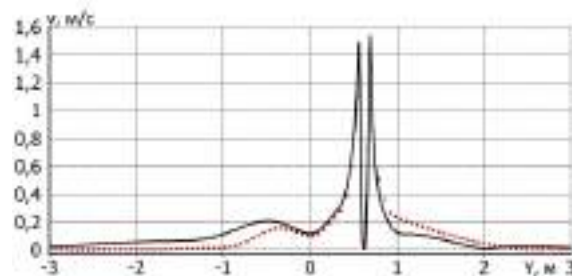


Рис. 5. Распределение локального числа Ричардсона вдоль оси Y при $Z = -75$ мм

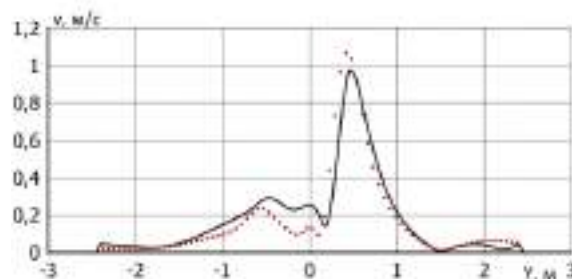


Рис. 6. Траектории течений в вертикальном сечении ванны вдоль оси Y с учетом термогравитационной конвекции

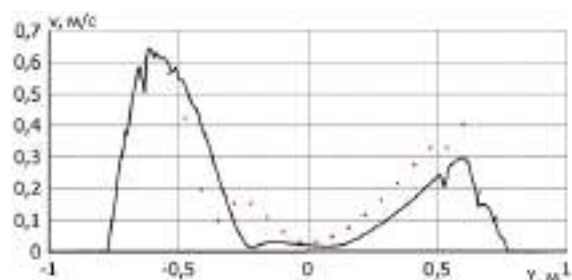
Численное изменение скоростей при учете термогравитационной конвекции поясняется графиками распределения скорости (рис. 7), где сплошными линиями показаны профили скорости с учетом термогравитационной конвекции, а точечным пунктиром — без учета термогравитационной конвекции.



а)



б)



в)

Рис. 7. Графики распределения скорости вдоль оси Y: а — при $Z = -70$ мм; б — $Z = -715$ мм; в — $Z = -1320$ мм

Анализ графиков (рис. 7) показывает, что в областях под электрическими дугами значения скоростей нисходящих потоков при учете термогравитационной конвекции

уменьшаются, а скорости восходящих потоков в приосевой области ванны и в области подовых электродов увеличиваются. В среднем изменение скоростей составляет 15–25 %.

Следует отметить, что взаимодействие электровихревой и термогравитационной конвекции происходит и в горизонтальных сечениях ванны, приводя к азимутальной закрутке течений в области электрических дуг и в области подовых электродов (рис. 8). Как в одной, так и в другой области эти течения формируются в виде трех пар вихрей. Причем вблизи поверхности расплава струи сходятся к линиям, соединяющим центр ванны и оси электрических дуг, а в области подовых электродов – к линиям, соединяющим центр ванны и оси соответствующих подовых электродов.

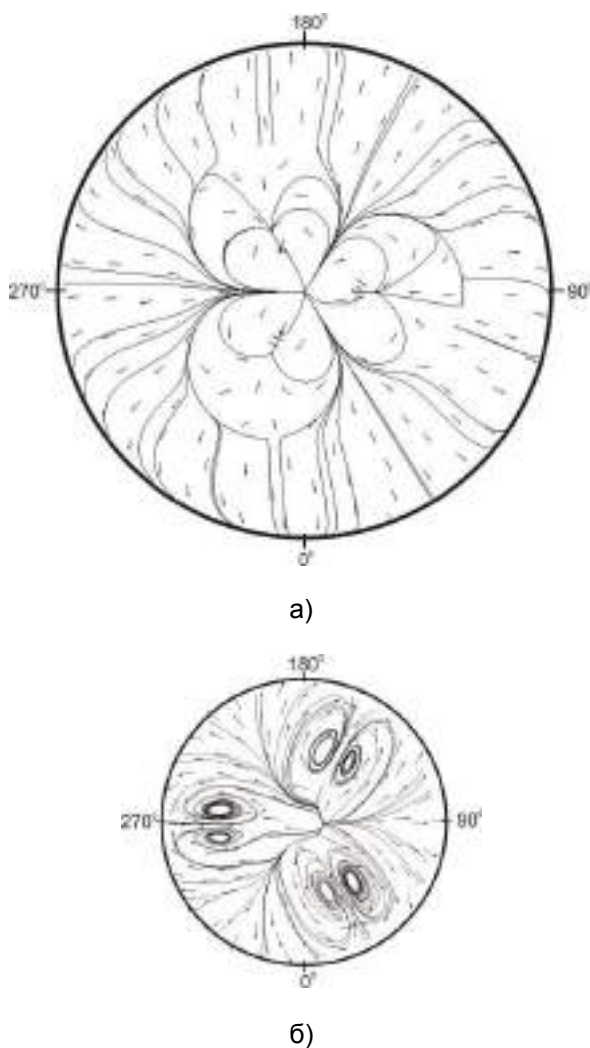


Рис. 8. Траектории течений расплава в горизонтальных сечениях ванны с учетом термогравитационной конвекции: а – при $Z = -70$ мм; б – $Z = -1320$ мм

Следует отметить, что азимутальное закручивание потоков в условиях электровихревой и термогравитационной конвекции представляет достаточно сложное явление, обусловленное появлением азимутальных электромагнитных сил на участках, образуемых сходящимися к электродам линиями электрического тока, взаимодействием собственного электромагнитного поля ванны с внешними магнитными полями, наличием эффектов вязкого трения [7].

Нами были проанализированы и сопоставлены графики азимутальных скоростей и электромагнитных сил вблизи поверхности расплава и вблизи подовых электродов. Графики построены по угловой координате φ вдоль диаметра распада электродов. За начало отсчета 0° принято направление оси X (рис. 8). Вблизи поверхности расплава максимальные значения v_φ наблюдаются в областях боковых поверхностей пятен электрических дуг (рис. 9,а), где v_φ составляет около 1,1 м/с (при $83^\circ, 95^\circ, 203^\circ, 215^\circ, 323^\circ, 325^\circ$). Изменение знака азимутальной скорости вблизи координат $90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$ соответствует областям расхождения потоков, а вблизи координат $30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$ – областям замыкания потоков.

В нижней части ванны (рис. 9,в) v_φ достигает 0,3 м/с вблизи боковых поверхностей подовых электродов (вблизи координат $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ, 360^\circ$). Области расхождения потоков соответствуют координатам $90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$, а области замыкания потоков – координатам $30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$.

Приближенное подобие графиков распределения азимутальных скоростей и электромагнитных сил, а также совпадение координат их экстремумов позволяет предположить, что в большей степени азимутальные течения вызваны соответствующими электромагнитными силами. При этом влияние термогравитационной конвекции на закрутку потоков вблизи поверхности расплава незначительное. А в области подовых электродов влияние естественно-конвективных течений, движущихся в направлении от периферии к центру ванны, проявляется в увеличении азимутальной скорости приблизительно на 20 %, а также в смещении центров вихрей к центру ванны приблизительно на 500 мм.

Верификация данной модели выполнена путем сопоставления результатов расчета с данными экспериментов, полу-

ченных на разработанной нами шестиэлектродной установке [10], а также на двухэлектродных экспериментальных установках Объединенного института высоких температур РАН [7] и Массачусетского технологического университета [8].

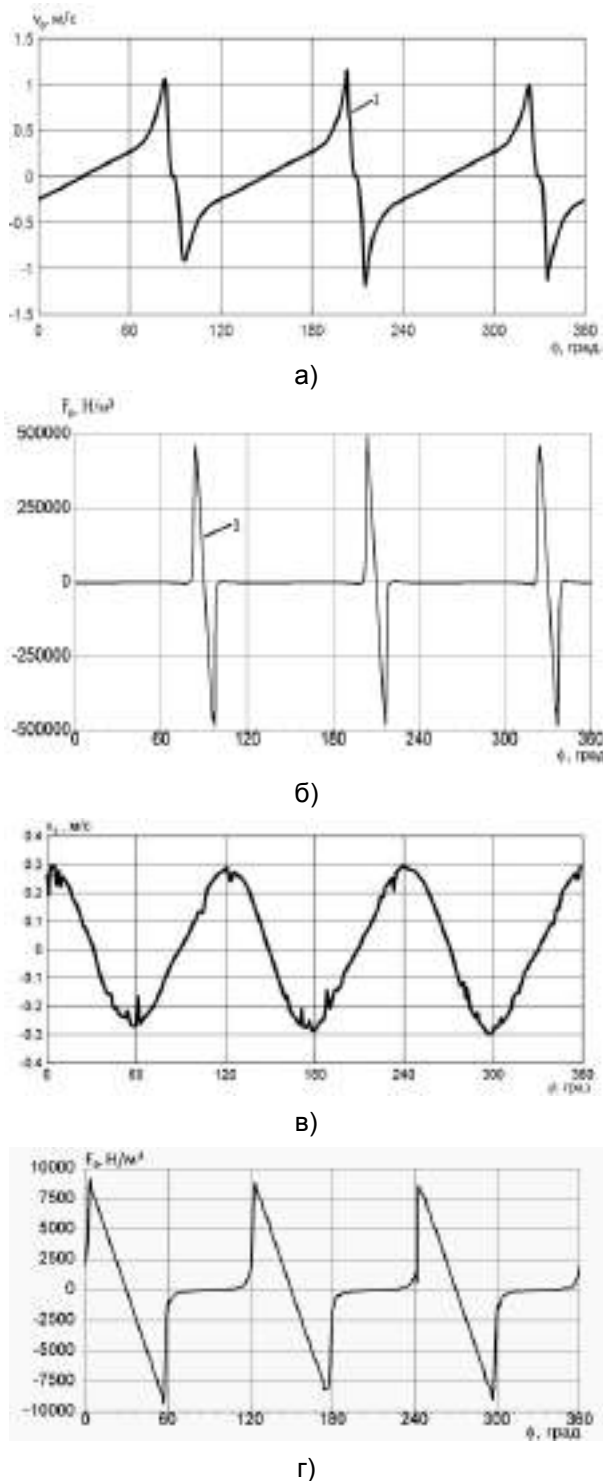


Рис. 9. Графики азимутальных компонент скорости и электромагнитных сил: а, б – при $Z = -70$ мм; в, г – $Z = -1320$ мм;

Отмечено удовлетворительное качественное и количественное совпадение результатов расчета скорости течения и температуры, при чем среднее отклонение экспериментальных данных от расчетных не превышает 15 %. В качестве примера на рис. 10 показано сопоставление расчетных и экспериментальных данных на графике распределения скорости по глубине ванны вдоль ее оси (результаты получены на установке Объединенного института высоких температур, сплав – индий-галлий-олово, температура – 283 К, ток – 250 А [7]).

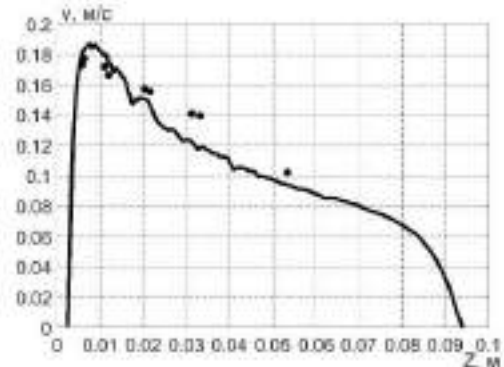


Рис. 10. График распределения скорости по глубине ванны вдоль ее оси: — – расчет; ● – эксперимент

Кроме того, приведенная структура азимутальных течений подобна структуре, полученной на трехэлектродной лабораторной установке со ртутью [11]. Таким образом, разработанную математическую модель можно считать приемлемой для решения прикладных задач и приведенные результаты расчета можно использовать для дальнейшего улучшения энергетических и конструктивных параметров многоэлектродных дуговых печей.

Выводы. На основании численного исследования конвективного теплопереноса в предложенной шестиэлектродной печи при питании ее постоянным током показано, что структура течений в такой печи – многовихревая. На основании полученного распределения локального числа Ричардсона показано, что вблизи оси ванны доминирует электровихревая конвекция, а вблизи боковых стенок – термогравитационная конвекция, обусловленная неравномерным нагревом расплава.

Влияние термогравитационной конвекции обуславливает уменьшение шири-

ны основного электровихревого течения и формирование дополнительного течения вблизи боковых стенок печи, при этом скорость нисходящего течения под электрическими дугами уменьшается, а скорость восходящих потоков в области подовых электродов увеличивается. В среднем указанное изменение скоростей составляет 15–25 %.

Показано, что в областях электрических дуг и подовых электродов формируются азимутальные течения в виде трех пар вихрей, которые в большей степени обусловлены наличием азимутальных электромагнитных сил. Влияние термогравитационной конвекции в основном проявляется в области подовых электродов, приводя к увеличению азимутальной скорости и смещению центров вихрей к центру ванны.

Список литературы

1. Недопекин Ф.В., Казак О.В., Семко А.Н. Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в сталеплавильных печах постоянного тока. – Донецк: ДонГУ, 2014. – 315 с.
2. Адати Т., Селлан Р. Сверхмощная 420-тонная электродуговая печь компании Tokyo Steel, Япония // *Металлургическое производство и технология*. – 2012. – № 2. – С. 8–17.
3. **Multi-Electrode Arc Furnace Technology with Improved Metal Processing Capability Using Current Driven Mixing** / Н. Mölder, J. Järvik, Т. Vaimann, R. Gordon // *Proc. 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. – Venice, 2012. – P. 313–316. DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221394
4. Пат. 119279 Украина МПК H05B 7/144, F27D 11/10. Система электропитания многоэлектродной дуговой печи / А.Л. Кухарев, А.А. Ковальчук; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.
5. Кухарев А.Л. Электромагнитное поле в ванне многоэлектродной печи // *Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля*. – 2018. – № 5(11). – С. 247–251.
6. Кухарев А.Л. Течения расплава в многоэлектродной дуговой печи в условиях электровихревой и естественной конвекции // *Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля*. – 2019. – № 7(25). – С. 217–223.
7. Ивочкин Ю.П. Исследование механизмов термогидродинамических и МГД процессов с жидкометаллическими рабочими телами: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14; Нац. исслед. ун-т МЭИ. – М., 2015. – 407 с.
8. **Murthy A., Szekely J., El-Kaddah N.** Experimental measurement and numerical compu-

tation of velocity and turbulence parameters in a heated liquid metal system // *Metallurgical Transactions B*. – 1988. – Vol. 19, No. 0. – P. 765–775.

9. Кухарев А.Л., Корсунов К.А., Сергиенко С.Н. Расчет параметров электрической дуги в электропечных установках для производства стали и ферросплавов // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. – 2017. – № 5(48). – С. 52–57.

10. Кухарев А.Л., Петренко В.В. Экспериментальная многоэлектродная установка для исследования энергетических процессов в токопроводящих расплавах // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. – 2018. – № 4(25). – С. 64–71.

11. Дементьев С.Б., Чайковский А.И., Чудновский А.Ю. Формирование электровихревых течений в ваннах с многоэлектродным токоподводом // *Магнитная гидродинамика*. – 1988. – № 1. – С. 85–89.

References

1. Nedopekin, F.V., Kazak, O.V., Semko, A.N. *Modelirovanie gidrodinamicheskikh i teplofizicheskikh protsessov v staleplavil'nykh pechakh postoyannogo toka* [Modeling of hydrodynamic and thermophysical processes in direct current steelmaking furnaces]. Donetsk: DonNU, 2014. 315 p.
2. Adati, T., Sellan, R. Sverkhmoshchnaya 420-tonnaya elektrodugovaya pech' kompanii Tokyo Steel, Yaponiya [Ultra high power 420-ton electric arc furnace at Tokyo Steel, Japan]. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya*, 2012, no. 2, pp. 8–17.
3. Mölder, H., Järvik, J., Vaimann, T., Gordon, R. Multi-Electrode Arc Furnace Technology with Improved Metal Processing Capability Using Current Driven Mixing. *Proc. 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. Venice, 2012, pp. 313–316. doi: 10.1109/EEEIC.2012.6221394
4. Kukharev, A.L., Koval'chuk, A.A. *Sistema elektropitaniya mnogoelektrodnoy dugovoy pechi* [Power supply system of multi-electrode arc furnace]. Patent Ukraine, no. 119279, 2017.
5. Kukharev, A.L. Elektromagnitnoe pole v vanne mnogoelektrodnoy pechi [Electromagnetic field in the bath of multielectrode furnace]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya*, 2018, no. 5(11), pp. 247–251.
6. Kukharev, A.L. Tcheniya rasplava v mnogoelektrodnoy dugovoy pechi v usloviyakh elektrovikhreвой i estestvennoy konveksii [Melt flow in the multielectrode arc furnace under conditions of electro-vortex and natural convection]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya*, 2019, no. 7 (25), pp. 217–223.

7. Ivochkin, Yu.P. *Issledovanie mekhanizmov termogidrodinamicheskikh i MGD protsessov s zhidkometallicheskimimi rabochimi telami*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Study of the mechanisms of thermohydrodynamic and MHD processes with liquid metal working bodies. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2015. 407 p.

8. Murthy, A., Szekely, J., El-Kaddah, N. Experimental measurement and numerical computation of velocity and turbulence parameters in a heated liquid metal system. *Metallurgical Transactions B*, 1988, vol. 19, no. 10, pp. 765–775.

9. Kukharev, A.L., Korsunov, K.A., Sergienko, S.N. Raschet parametrov elektricheskoy dugi v elektroprechnykh ustanovkakh dlya proizvodstva stali i ferrosplavov [Calculation of electric arc parameters in electric furnace for the production of steel and ferroalloys]. *Sbornik nauchnykh trudov*

Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, no. 5(48), pp. 52–57.

10. Kukharev, A.L., Petrenko, V.V. Eksperimental'naya mnogielektrodnaya ustanovka dlya issledovaniya energeticheskikh protsessov v tokoprovodyashchikh rasplavakh [Experimental multielectrode installation for the study of energy processes in conducting melts]. *Resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii*, 2018, no. 4(25), pp. 64–71.

11. Dement'ev, S.B., Chaykovskiy, A.I., Chudnovskiy, A.Yu. Formirovanie elektrovikhrevykh techeniy v vannakh s mnogielektrodnym tokopodvodom [Generation of electrovortex flows in liquid-metal baths with a multielectrode current input]. *Magnitnaya gidrodinamika*, 1988, no. 1, pp. 85–89.

Кухарев Алексей Леонидович,

ГОУВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики и транспортных систем, e-mail: alex.kuharev@mail.ru

Kukharev Aleksei Leonidovich,

Lugansk Vladimir Dahl National University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Mining Electromechanics and Transport Systems Department, e-mail: alex.kuharev@mail.ru

УДК 66.047

УСЛОВИЯ И КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕРЫ МАСШТАБНОГО ПЕРЕХОДА ОТ ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВОК К ПРОМЫШЛЕННЫМ ОБРАЗЦАМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СУШИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ВИХРЕВОГО ТИПА

А.И. СОКОЛЬСКИЙ, Е.В. ГУСЕВ, О.Б. КОЛИБАБА

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: tevp@tvp.ispu.ru; gusev_pcm@mail.ru; koli-baba@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Аппараты вихревого и циклонного типов находят все большее распространение для интенсивного протекания совмещенных технологических процессов обработки (тонкого измельчения, классификации, сушки, смешения, гидрофобизации и др.) дисперсных материалов. Одним из видов данного класса оборудования с активным гидродинамическим режимом являются аппараты с восходящим (или с нисходящим) спирально-закрученным газодисперсным потоком. Исследованию подобных устройств посвящены работы А.Ф. Фролова, В.И. Муштаева, В.М., Ульянова, Б.С. Сажина, которые подтверждают высокую эффективность сушки высоковлажных дисперсных материалов. Одной из задач масштабного перехода от лабораторных установок к промышленным образцам является разработка конструктивных особенностей, определяющих подобие гидродинамических режимов протекающих теплообменных процессов.

Материалы и методы. Для определения гидродинамических характеристик газодисперсного потока использованы методы, основанные на измерении расходов, скоростей, гидравлических сопротивлений. Для снятия кривых сушки и температурных кривых полидисперсного материала (золы гидроудаления ТЭС) различной фракции при различных условиях конвективного подвода теплоты применен