

УДК 669.187.2:536.24

к.т.н. Кухарев А. Л.
(Стахановский учебно-научный институт
ЛНУ им. В. Даля, г. Стаханов, ЛНР)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В РАСПЛАВЕ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПРИ УЧЁТЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ

Приведена математическая модель и результаты численных исследований тепловых процессов в ванне расплава шестиэлектродной дуговой сталеплавильной печи ёмкостью 180 т при питании её постоянным током 80 кА. Для предложенной конструкции печи на основании анализа полученных графиков распределения скорости движения и температуры расплава показано, что электровихревые течения доминируют над естественной конвекцией, что обеспечивает удовлетворительные условия распределения температуры в объёме расплава.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, магнитная гидродинамика, теплоперенос.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Для современных электрометаллургических агрегатов, работающих с большим объёмом жидкого металла, одной из важнейших задач является эффективное перемешивание расплава, способствующее повышению интенсивности теплопереноса, а также его температурной и химической гомогенизации. Наряду с применением перемешивания расплава за счёт его продувки различными газами в настоящее время также используются электромагнитные способы перемешивания, основанные на различных магнитогидродинамических эффектах [1–3].

В работах [3, 4] показано, что для высокомошных многоэлектродных электропечных установок, в которых токи в электродах достигают 50–150 кА, для перемешивания целесообразно использовать электровихревые течения (ЭВТ), обусловленные взаимодействием протекающего в расплаве электрического тока с собственным магнитным полем.

Однако до настоящего времени большинство известных работ в области ЭВТ и теплообмена в расплаве печей было направлено на изучение процессов, протекающих в двух- и трёхэлектродных печах [1, 2, 5, 6]; в то же время процессы, протекающие в шестиэлектродных печах с различным расположением сводовых и

подовых электродов, всё ещё являются малоизученными [2, 3]. Также для интенсификации теплообмена при ЭВТ актуальными являются вопросы выбора рода питающего тока (постоянный ток, синусоидальный ток низкой частоты, ток сложной формы).

Постановка задачи. Задачей данной работы является разработка математической модели и численное исследование процессов теплопереноса в ванне расплава шестиэлектродной дуговой печи при её питании постоянным током с учётом электровихревых и естественно-конвективных течений.

Изложение материала и его результаты. В работах [3, 4] предлагается усовершенствованная конструкция дуговой печи, которая отличается от обычных трёхэлектродных печей тем, что дополнительно содержит три подовых электрода, причём угол между смежными осями сводовых и подовых электродов составляет 60°. Такая компоновка электродов в ванне, как показано в работе [7], при питании постоянным током или током низкой частоты (0,01–1 Гц) обеспечивает подавление скин-эффекта и улучшение равномерности распределения электромагнитных сил (сил Лоренца) в расплаве.

В качестве объекта моделирования была принята дуговая сталеплавильная печь с ванной цилиндросфероконической формы

ёмкостью 180 т. Геометрическая модель и профиль ванны представлены на рисунке 1. Там же указаны основные геометрические размеры ванны.

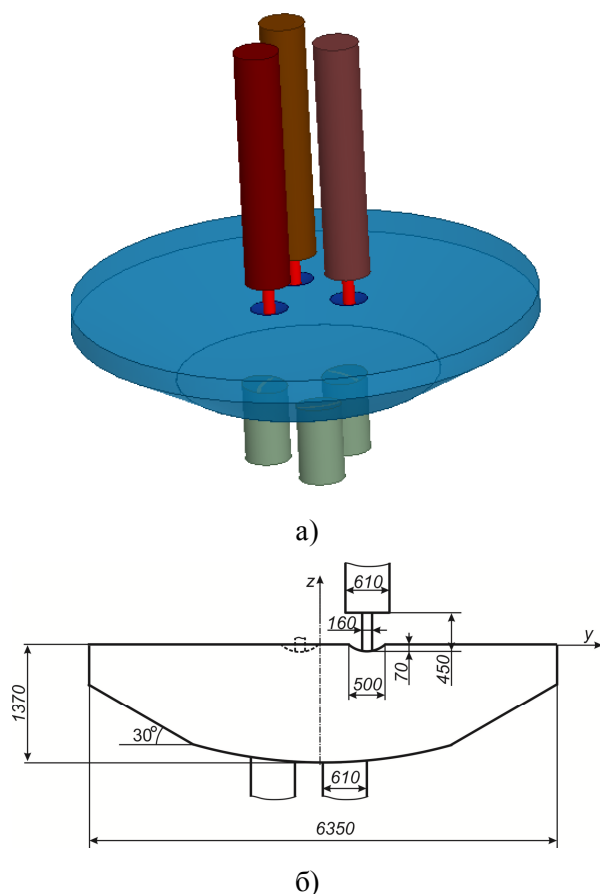


Рисунок 1 Геометрическая модель ванны печи:
а) общий вид; б) профиль ванны
в направлении оси Y

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 расчёте электро-

магнитного поля [7]. В гидродинамических и тепловых расчётах влияние электрических дуг учитывалось посредством введения соответствующих граничных условий в области менисков. Расчёт проводился в пакете Ansys, расчётная сетка для ванны печи состояла из 1,5 млн тетрагональных элементов, причём дополнительное сгущение сетки было выполнено в области сводовых и подовых электродов.

При разработке математической модели в качестве основного допущения принято безындукционное магнитогидродинамическое приближение, при котором рассматриваемые процессы описываются системой уравнений магнитной гидродинамики [2, 5, 6], при этом не учитываются химические реакции, а среды в пределах выделенных зон считаются однородными, изотропными и немагнитными. Также не учитывается перенос магнитного поля потоком электропроводной жидкости, что позволяет производить электромагнитные и гидродинамические расчёты отдельно [2, 5]. 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 при предварительных оценках для режима электровихревого течения расплава критерий Рейнольдса составляет величину порядка 10^4 – 10^5 , для описания турбулентности используем $k-\varepsilon$ -модель, которая при её относительной простоте обеспечивает наиболее близкие к экспериментальным данным распределения скоростей [2, 5, 6]. При принятых допущениях базовые уравнения модели имеют вид:

– уравнение энергии:

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

– уравнение Навье – Стокса:

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

– уравнение неразрывности потока:

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

– уравнения $k - \varepsilon$ -модели турбулентности:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k) = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (5)$$

– 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; $\eta_s = \eta + \eta_T$ — эффективный коэффициент динамической вязкости, Па·с; $\lambda_s = \lambda + \lambda_T$ — 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 джоуля нагрева $Q = |\vec{J}|^2 / \sigma$ определялись на основании расчёта электромагнитного поля при силе тока в электродах 80 кА [7], а характеристики электрических дуг — на основании численного решения уравнения Эленбааса – Геллера [8].

Постоянные параметры модели, определяемые свойствами расплава жидкой стали и постоянными модели турбулентности, приведены в таблице 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
Теплоёмкость	C_p	Дж/(кг·К)	792
Коэффициент объёмного 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		1,44

В нашем случае моделирование гидродинамических и тепловых процессов проводилось совместно, при этом использовались граничные условия (ГУ), приведённые в таблице 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.

Следует отметить, что по сравнению с имеющимися моделями [2, 5, 6] предложенная модель за счёт наложения соответствующих граничных условий и учёта гравитационных сил более точно описывает тепловые режимы работы в расплаве дуговых печей. Верификация данной модели

выполнена путём сопоставления результатов расчёта с данными экспериментов, полученных на разработанной нами многоэлектродной установке [9], а также на экспериментальной установке в Объединённом институте высоких температур РАН [5]. Отмечено удовлетворительное качественное и количественное совпадение результатов расчёта скорости течения и температуры, причём среднее отклонение экспериментальных данных от расчётных не превышает 9 %.

На основании уравнения энергии (1) теплоперенос в расплаве осуществляется за счёт конвекции, эффективной теплопроводности и выделения джоулевой теплоты. Рассмотрим эти эффекты.

Таблица 2

Граничные условия

Наименование поверхности	Накладываемые ГУ	
	Гидродинамические	Тепловые
Нижняя и боковая стенки ванны	Условие прилипания: $v=0$	Условие первого рода $T_z=1900$ К
Области менисков электрических дуг	Условие прилипания: $v=0$	Условие второго рода $q_z=6,43 \cdot 10^7$ Вт/м ² [8]
Верхняя поверхность расплава	Условие прилипания: $v=0$	Условие теплоизолированности: $q_z=0$

Результаты моделирования конвективных течений в отдельных сечениях ванны приведены на рисунке 2, где чёрными сплошными линиями показаны линии циркуляции расплава (линии тока), а стрелками — векторы скорости.

Как видно из рисунков, поле скорости в расплаве достаточно сложное. В зоне под электрическими дугами формируются мощные струи расплава, направленные под углом приблизительно 20° (относительно осей электрических дуг) к подине печи (рис. 2, а). Ширина этих струй в средней по глубине части ванны составляет около 800 мм. Максимальная скорость в струе расплава достигает 2,1 м/с. В нижней части ванны расплав растекается к периферии со скоростями 0,2–0,5 м/с. Далее

расплав медленно ($v < 0,2$ м/с) поднимается на поверхность на участке приблизительно 1900 мм от оси ванны и направляется к соответствующей области дуги, где вновь вовлекается электромагнитными силами вглубь ванны. Обозначим это течение 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. Отчётливо наблюдается второй контур циркуляции, в котором расплав вблизи оси ванны движется вверх, а на поверхности медленно растекается к периферии.

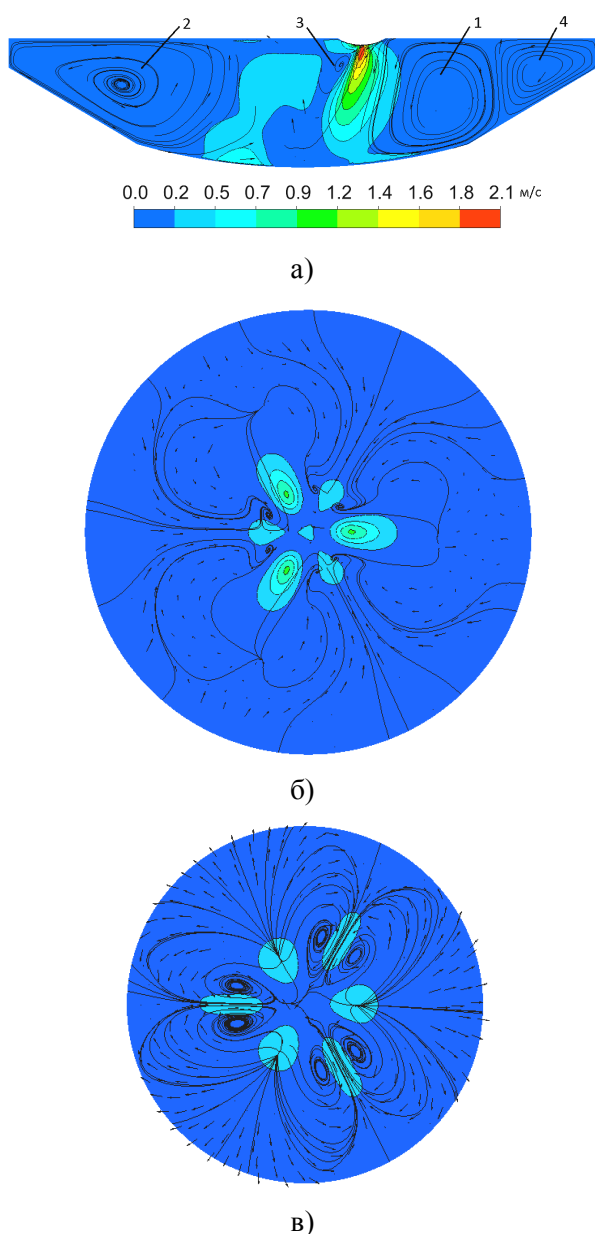


Рисунок 2 Распределение скорости:
 а) в вертикальном сечении (вдоль оси Y);
 б) в горизонтальном сечении при $Z = -715$ мм;
 в) в горизонтальном сечении при $Z = -1120$ мм;

Кроме того, в районе пятна дуги между первым и вторым контуром имеется малый вихрь, движущийся в противоположную сторону относительно первого контура циркуляции (рис. 2, а). Под электрической дугой течение в этом контуре направлено вниз, но уже примерно в середине ванны оно разворачивается вверх под действием течения второго вихря. На поверхности

расплава его движение направлено от электрических дуг к центру ванны с максимальной скоростью около 0,5–1 м/с непосредственно под мениском дуги.

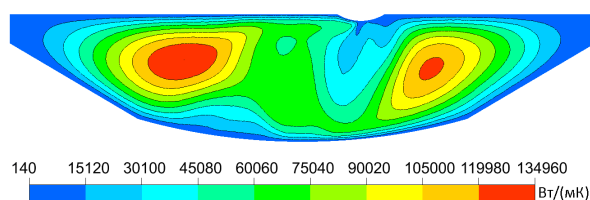
Вблизи боковой стенки печи (рис. 2, а, справа) также имеется четвёртый контур циркуляции расплава, движущийся в противоположную сторону относительно первого контура, в котором скорости циркуляции $v < 0,2$ м/с.

Кроме вихревых структур, циркулирующих в вертикальных сечениях, обнаружено три пары горизонтальных вихрей, циркулирующих в областях над подовыми электродами (рис. 2, в). Причём эти пары горизонтальных вихрей вытянуты вдоль линий, соединяющих центр ванны и оси подовых электродов.

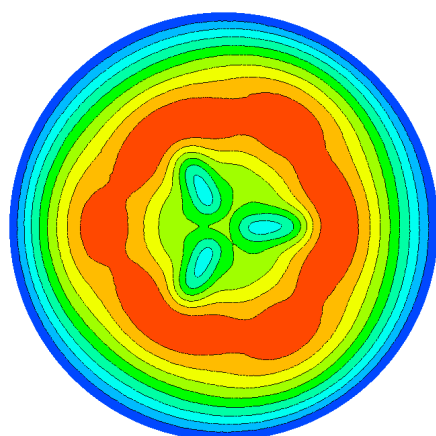
Следует отметить, что при принятых ГУ сопоставление расчётов, выполненных с учётом и без учёта гравитационных сил, показало, что естественная конвекция не оказывает существенного влияния на характер течения расплава в центральной области ванны. В основном учёт сил гравитации проявляется в некотором увеличении скорости восходящего потока второго контура (приблизительно на 5–15 %) и появлении четвёртого контура циркуляции вблизи боковой стенки.

При анализе графиков распределения эффективной теплопроводности (рис. 3) показано, что её значения зависят от степени завихренности потока, количественной мерой которой служит ротор скорости.

Как видно из рисунка 3,а, максимумы эффективной теплопроводности находятся вблизи центров первого и второго контура циркуляции, при этом максимальные значения λ_e составляют около 135000 Вт/(м·К). Таким образом, на этих участках эффективная теплопроводность превышает молекулярную более чем в 3000 раз. Из рисунка 3,б также видно, что область высоких значений эффективной теплопроводности формируется за электродами вдоль окружности с диаметром около 1400 мм, что также способствует эффективному теплопереносу.



а)



б)

Рисунок 3 Распределение эффективной теплопроводности:

- а) в вертикальном сечении (вдоль оси Y);
 б) в горизонтальном сечении при $Z = -715$ мм

Что касается джоулева тепловыделения, то ввиду его малых значений ($\sim 1 \cdot 10^5$ Вт на ванну) оно не оказывает на теплоперенос существенного значения, что обусловлено достаточно большой удельной проводимостью расплава стали [7].

Результаты моделирования распределения температуры в отдельных сечениях ванны приведены на рисунках 4 и 5.

Как видно из рисунков, в ванне печи можно выделить две области, отличающиеся диапазоном температур. Первая область — это зона воздействия электрических дуг на расплав (рис. 4), в которых температуры достигают 4800 К за счёт воздействия плазмы дуги, причём высокие температуры расположены на участках менисков, обращённых к периферии ванны, что, по всей видимости, обусловлено худшими условиями теплообмена на этих участках. В центральной части менисков значения температуры составляют 2900–2600 К.

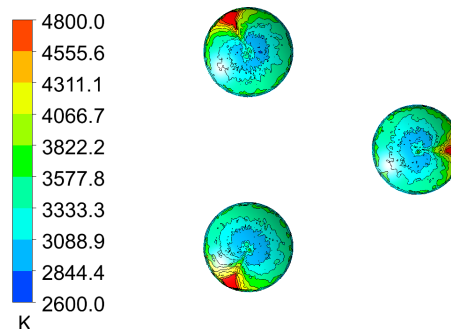
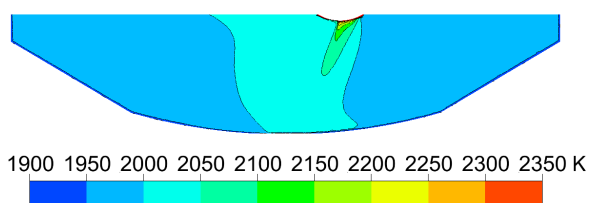
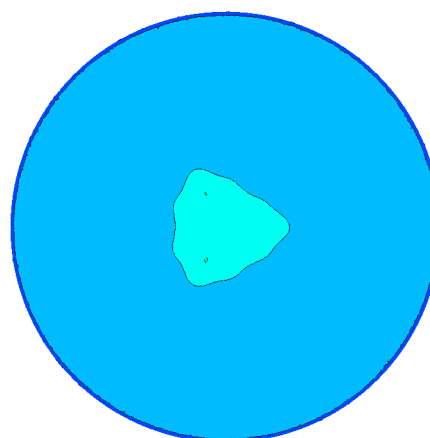


Рисунок 4 Распределение температуры в областях воздействия электрических дуг на расплав



а)



б)

Рисунок 5 Распределение температуры в сечениях ванны:

- а) в вертикальном сечении (вдоль оси Y);
 б) в горизонтальном сечении при $Z = -715$ мм

В остальной части расплава значения температур составляют от 2350 К до 1900 К. Из рисунка 5,а видно, что наибольшие значения температур находятся в центре ванны под электрическими дугами и обусловлены движением расплава по описанным ранее траекториям. Чётко наблюдается вынос температуры струёй перегретого рас-

плава от электрической дуги вглубь ванны. Далее тепловая энергия электрических дуг рассеивается при движении расплава вдоль линий скорости. Минимальная температура характерна для участков, непосредственно находящихся вблизи боковых стенок ванны, т. е. в зонах с низкой скоростью движения расплава. Отметим, что в основной области ванны перегрев расплава относительно температуры стенки составляет приблизительно 50 К и выше.

В горизонтальном сечении (рис. 5, б), находящемся приблизительно в средней по глубине части ванны печи, разность средней температуры в сечении и температуры стенки ΔT_{cp} не превышает 75 К.

Для анализа процессов теплопереноса и температурной гомогенизации расплава произведена численная оценка некоторых интегральных показателей и некоторых критериев подобия, приведённых в таблице 3.

Коэффициент вариации температуры в объёме расплава определялся соотношением

$$\kappa_{вар} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_{cp})^2}}{T_{cp}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где T_i — температура в i -м элементе расчётной сетки, К; N — количество элементов расчётной сетки; T_{cp} — средняя по объёму температура расплава, К, которая рассчитывается путём деления суммы произведения температуры элемента и объёма элемента на общий объём ванны V_{σ} :

$$T_{cp} = \frac{1}{V_{\sigma}} \sum_{i=1}^N T_i V_i. \quad (10)$$

Аналогично данной формуле рассчитывались соответствующие усреднённые по объёму показатели теплообмена, которые сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Показатели теплопереноса в объёме расплава

Параметр	Значение
Средняя по объёму ванны температура, T_{cp} , К	1976
Стандартное отклонение температуры, К	117
Коэффициент вариации температуры, $\kappa_{вар}$, %	6
Средняя по объёму эффективная теплопроводность, $\lambda_{\sigma, cp}$, Вт/(м·К)	52506
Среднее число Nu_{cp} в горизонтальном сечении (при $Z=-715$ мм)	332
Среднее число Re_{cp} в горизонтальном сечении (при $Z=-715$ мм)	$9 \cdot 10^4$

Оценка интенсивности конвективного теплопереноса производилась по числу Нуссельта Nu_{cp} , которое определялось исходя из усреднённого коэффициента теплоотдачи ($\alpha_{cp} = q_{cp} / \Delta T_{cp}$) в среднем горизонтальном сечении (при $Z=-715$ мм):

$$Nu_{cp} = \frac{1}{S} \frac{L_0}{\Delta T_{cp}} \sum_{i=1}^N q_i S_i, \quad (11)$$

где S — площадь данного поперечного сечения ванны, m^2 ; L_0 — характерный размер, м (принят равным глубине ванны); q_i — плотность теплового потока в i -м эле-

менте расчётной сетки, Вт/ m^2 ; S_i — площадь i -го элемента в расчётном сечении.

Из таблицы 3 видно, что коэффициент вариации температуры составляет около 6 %, что подтверждает удовлетворительные условия протекания процесса теплопереноса в ванне печи при использовании ЭВТ. Средняя по объёму эффективная теплопроводность более чем в 1000 раз превышает молекулярную. Также рассчитанные тепловые потоки в сечениях ванны близки по порядку к значениям, полученным для условий барботажа ванны при продувке кислородом [10].

Выводы и направления дальнейших исследований. Показаны перспективы использования ЭВТ в мощных многоэлектродных дуговых печах, основным преимуществом которых является интенсивное перемещение вглубь ванны высокотемпературных зон, образующихся в областях электрических дуг. Перспективой дальнейших исследований является поиск рациональных конструктивных параметров печей и параметров электромагнитных воздействий, обеспечивающих наилучшие условия теплообмена.

Библиографический список

1. Крикент, И. В. Численное исследование гидродинамики расплава в установке ковши–печь постоянного тока [Текст] / И. В. Крикент, С. Е. Самохвалов, Д. Ю. Кабаков // Современная электрометаллургия. — 2014. — № 3. — С. 45–49.
2. Недопекин, Ф. В. Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в сталеплавильных печах постоянного тока [Текст] / Ф. В. Недопекин, О. В. Казак, А. Н. Семко. — Донецк : ДонНУ, 2014. — 315 с.
3. Кухарев, А. Л. Принципы повышения интенсивности теплообмена в жидких средах дуговых многоэлектродных печей [Текст] / А. Л. Кухарев, В. В. Белоусов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. — 2018. — № 2. — С. 82–91.
4. Пат. 119279. Україна, МПК⁷ H05B 7/144, F27D 11/10 Система электрооживлення багатоелектродної дугової печі / заявник та патентовласник О. Л. Кухарев, А. О. Ковальчук. — № u201700825 ; заявл. 30.01.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. — 6 с.
5. Ивочкин, Ю. П. Исследование механизмов термогидродинамических и МГД процессов с жидкометаллическими рабочими телами [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.14 / Ивочкин Юрий Петрович ; Объединённый институт высоких температур РАН. — М., 2015. — 407 с.
6. Смирнов, С. А. Математическое моделирование электромагнитного перемешивания жидкой стали в дуговой печи постоянного тока [Текст] / С. А. Смирнов, В. В. Калаев, С. М. Нехамин // Теплофизика высоких температур. — 2010. — № 1. — С. 74–83.
7. Кухарев, А. Л. Электромагнитное поле в ванне многоэлектродной печи [Текст] / А. Л. Кухарев // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. — 2018. — № 5 (11). — С. 247–251.
8. Кухарев, А. Л. Расчёт параметров электрической дуги в электропечных установках для производства стали и ферросплавов [Текст] / А. Л. Кухарев, К. А. Корсунов, С. Н. Сергиенко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2017. — Вып. № 5 (48). — С. 52–57.
9. Кухарев, А. Л. Экспериментальная многоэлектродная установка для исследования энергетических процессов в токопроводящих расплавах [Текст] / А. Л. Кухарев, В. В. Петренко // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. — 2018. — № 4 (25). — С. 64–71.
10. Меркер, Э. Э. Энергосбережение при выплавке стали в дуговых печах [Текст] / Э. Э. Меркер, А. И. Кочетов, Д. А. Харламов. — Старый Оскол : ТНТ, 2009. — 296 с.

© Кухарев А. Л.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В. к.т.н., доц., зав. каф. ГЭиТС СУНИГОТ ЛНУ им. В. Даля Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 25.02.19.

к.т.н. Кухарев О. Л. (СННІГОТ ЛНУ ім. В. Даля, м. Стаханов, ЛНР)

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ У РОЗПЛАВІ БАГАТОЕЛЕКТРОДНОЇ ДУГОВОЇ ПЕЧІ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОВИХРОВИХ ТЕЧІЙ

Розроблено математичну модель теплових і магнітогідродинамічних процесів у розплаві шестиелектродної дугової печі ємністю 180 т при її живленні постійним струмом 80 кА. Для запропонованої конструкції печі на підставі аналізу отриманих графіків розподілу швидкості руху і температури розплаву показано, що електровихрові течії домінують над природною конвекцією та забезпечують задовільні умови розподілу температури.

Ключові слова: дугова сталетопна піч, магнітна гідродинаміка, теплоперенесення.

PhD Kukharev A. L. (SESIMET LNU after V. Dahl, Stakhanov, LPR)

NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE MELT IN A MULTI-ELECTRODE ARC FURNACE CONSIDERING EDDY CURRENT FLOWS

A mathematical model was developed for thermal and magnetohydrodynamic processes in a melt in a six-electrode arc furnace with 180 tons capacity with DC power supply 80 kA. For the proposed furnace design, based on the analysis of the obtained graphs for the flow velocity and melt temperature distribution, it is shown that eddy currents dominate natural convection providing adequate conditions for temperature distribution in the melt volume.

Key words: arc steel-melting furnace, magnetic hydrodynamics, heat transfer.