

Вихреобразование в электровихревых течениях

Д. А. Виноградов, И. О. Тепляков, Ю. П. Ивочкин и П. И. Поляков
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: paul.ingvarsson@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 2 декабря 2024 г.

Аннотация. В работе описана методика термпарного метода определения времени образования восходящего вихря в электровихревом течении. Также показано, что по характеру температурных осциллограмм можно сделать вывод о структуре течения. Результаты были получены при электрическом токе 50 А при различной величине внешнего осевого магнитного поля.

1. ВВЕДЕНИЕ

Электровихревые течения (ЭВТ) образуются в результате взаимодействия неоднородного электрического тока, протекающего через жидкий металл, и собственного магнитного поля (МП) этого тока [1]. Такие течения имеют место во многих электрометаллургических процессах, например, при электрошлаковой сварке, электродуговом переплаве, а также в электрошлаковом переплаве, где существенным образом влияют на качество получаемого продукта и срок службы плавильных агрегатов [2–4].

В осесимметричной геометрии электрический ток протекает через жидкий металл между двумя полусферическими электродами. В такой системе электрический ток плотностью J создает собственное магнитное поле $B_{\text{ЭВТ}}$, в результате возникает электромагнитная сила, которая приводит металл в движение. В таком случае ЭВТ имеет форму одиночного торoidalного вихря (рисунок 1(а)). При наличии внешнего осевого МП ($\sim 10^{-5}$ Тл) возникает азимутальная закрутка жидкого металла (рисунок 1(б)). При внешних МП $5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$ Тл (в зависимости от величины электрического тока, пропускаемого через жидкий металл) образуется восходящий торoidalный вихрь и общая интенсивность ЭВТ уменьшается (рисунок 1(в)). При внешних МП $3 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$ Тл общая интенсивность течения начинает возрастать за счет интенсификации азимутальной закрутки жидкого металла и второй торoidalный вихрь оттесняет основной на периферию (рисунок 1(г)). Таким образом, внешнее МП (в зависимости от величины) может приводить как к уменьшению, так и увеличению интенсивности ЭВТ.

В промышленных агрегатах создавать внешнее МП могут токоподводы или установленный в систему соленоид. При этом воздействие внешнего МП может привести к подавлению интенсивности ЭВТ, что негативно повлияет на качество металлургических процессов, поэтому очень важен вопрос о структуре течения в плавильном агрегате, что порождает требование к экспериментальному исследованию структуры ЭВТ. При этом по значению скорости жидкого металла можно сделать вывод о наличии второго вихря в системе. Поскольку первичный вихрь на оси симметрии направлен вниз (рисунок 1(а)), то появление второго восходящего вихря приводит к изменению направления осевой скорости (рисунок 1(в, г)).

В лабораторных условиях задача измерения скорости в жидком металле может быть относительно успешно решена за счет использования различных модельных

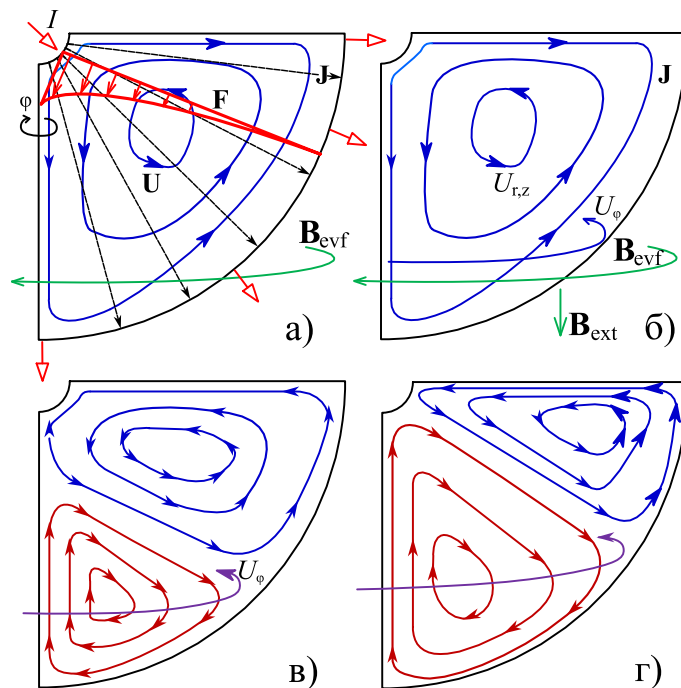


Рисунок 1. Структура ЭВТ.

металлов и сплавов, сохраняющих жидкое состояние при комнатной или низкой температуре (ртуть, натрий, олово и различные сплавы галлия). В промышленных условиях, при температурах, достигающих 1000–2000 °С измерение скорости жидкого металла представляет серьезную проблему. И большинство методов измерения скорости либо неприменимы, либо являются весьма дорогостоящими. В данной работе предложено метод определения структуры ЭВТ с использованием термпары, основанный на изучении характеристик температурных пульсаций. Этот метод наиболее предпочтителен для использования в промышленности ввиду своей дешевизны и простоты использования.

2. ЧИСЛЕННАЯ МЕТОДИКА

Численно решались уравнения движения и энергии в среде Ansys Fluent. В уравнения движения и энергии входили источниковые члены — электромагнитная сила и объемное тепловыделение. Расчеты проводились методом контрольного объема на неструктурированной сетке в осесимметричной системе координат.

Схема расчетной области представлена на рисунке 2. Сетка размером 48 тыс. ячеек включала в себя

токоподводы и область с жидким металлом. Радиус подводящего электрода (малый электрод) в месте контакта с жидким металлом составлял 2.5 мм, а радиус токоотводящего электрода (большой электрод) составлял 94 мм. Длина верхнего и нижнего токоподводов составляла 0.7 м и 0.6 м соответственно. В качестве рабочего тела использовался эвтектический сплав In-Ga-Sn, свойства которого приведены в [5].

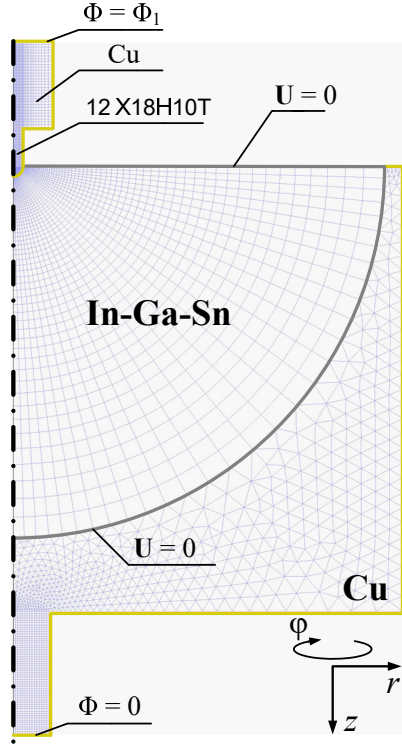


Рисунок 2. Расчетная область.

Перед началом численного расчета находились распределения плотности электрического тока и собственного магнитного поля. Сначала решалось уравнение Лапласа для электрического потенциала Φ :

$$\nabla(\sigma \nabla \Phi) = 0. \quad (1)$$

Здесь Φ — электрический потенциал; σ — проводимость. На верхней границе задавался потенциал $\Phi_1 = 0.0087$ В и $\Phi_2 = 0$ В на нижней границе, что соответствовало электрическому току $I = 50$ А. На остальных внешних границах принято граничное условие $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$, где $\mathbf{n}$ — вектор нормали к поверхности.

Затем вычислялась плотность электрического тока:

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla \Phi. \quad (2)$$

Далее, с использованием закона Био–Савара–Лапласа, вычислялось МП, созданное током $\mathbf{J}$:

$$\mathbf{B}(\mathbf{R}_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J} \times (\mathbf{R}_0 - \mathbf{R})}{|\mathbf{R}_0 - \mathbf{R}|^3} dV. \quad (3)$$

Расчет данного интеграла выполнялся на графическом процессоре с использованием технологии NVIDIA CUDA. Подход подробно описан в нашей работе [6].

Затем решалось уравнение движения:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \nabla) \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \rho \nu \Delta \mathbf{U} + \mathbf{F}, \quad (4)$$

где $\mathbf{u}$ — скорость жидкости; ρ — плотность расплава; ν — кинематическая вязкость; p — давление; $\mathbf{F}$ — электромагнитная сила Ампера:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times (\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}} + \mathbf{B}_{\text{внеш}}). \quad (5)$$

Здесь $\mathbf{J}$ — плотность электрического тока; $\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}}$ — индукция собственного МП тока; $\mathbf{B}_{\text{внеш}}$ — внешнее осевое МП.

Поскольку поверхность расплава принята недеформируемой, а потенциальная сила в замкнутом объеме не может вызвать движения, то сила тяжести в уравнении (4) отсутствует.

Компоненты электромагнитной силы, использовавшиеся при решении уравнения движения, имеют вид:

$$F_r(r, z) = J_z(r, z) B_\varphi(r, z); \quad (6)$$

$$F_\varphi(r, z) = -J_r(r, z) B_z(r, z); \quad (7)$$

$$F_z(r, z) = J_r(r, z) B_\varphi(r, z). \quad (8)$$

Использовалась $k - \omega$ SST-модель турбулентности [7], которая обеспечивает наилучшее совпадение расчетных данных с экспериментальными данными по скорости, полученными ранее с использованием волоконно-оптического преобразователя [8].

На границах жидкого металла задавалось равенство нулю всех компонент скорости (условие твердой стенки), а на оси симметрии — условие: $\partial U_z / \partial \varphi = 0$, $\partial U_r / \partial \varphi = 0$ и $U_\varphi = 0$.

Для вычисления распределения температуры решалось уравнение энергии с объемным тепловыделением:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{U} \nabla) T \right) = \lambda \Delta T + |\mathbf{J}|^2 / \sigma, \quad (9)$$

где T — температура; C_p — изобарная теплоемкость расплава; λ — коэффициент теплопроводности; σ — электропроводность.

Внутри расчетной области задавалось объемное тепловыделение, зависевшее от электропроводности σ и плотности электрического тока $\mathbf{J}$. На стенках задавалось условие третьего рода с коэффициентами теплоотдачи 2 Вт/(м²·К) для горизонтальных поверхностей и 5 Вт/(м²·К) для вертикальных поверхностей.

Данная численная методика апробирована в работах [9–11], в которых показано хорошее согласие с экспериментальными результатами.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3. Эвтектический сплав In-Ga-Sn (содержание компонент: Ga — 67%, In — 22.5%, Sn — 12.5%) с температурой плавления 10.5 °С использовался в качестве модельного расплава. Металлом заполнялся полусферический контейнер диаметром 188 мм, выполнявший

роль большого электрода. Наконечник малого электрода диаметром 5 мм погружался в жидкий металл в центре полусферы на глубину радиуса. Для контроля глубины погружения малого электрода использовался микрометр. Источник питания установки состоял из трех однофазных трансформаторов и шестиполупериодного выпрямителя, собранного по схеме Ларионова. Максимальная величина электрического тока источника составляла 1500 А, а пульсации тока не превышали 13%.

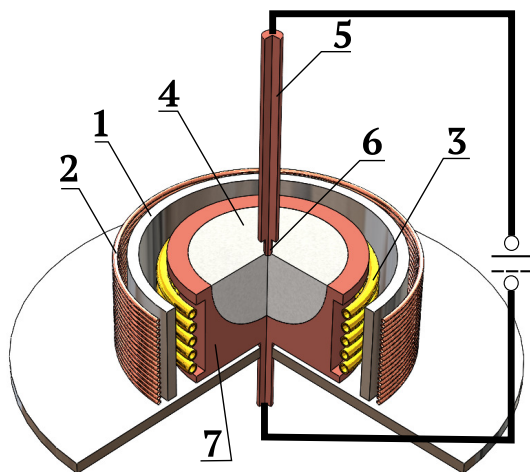


Рисунок 3. Экспериментальная установка. 1 — контейнер охлаждения; 2 — соленоид; 3 — трубки охлаждения; 4 — расплав In-Ga-Sn; 5 — верхний токоподвод; 6 — наконечник верхнего токоподвода; 7 — медный контейнер.

Для создания внешнего осевого МП использовался соленоид, который состоял из 228 витков медной проволоки диаметром 2,77 мм. Соленоид был подключен к источнику постоянного тока с рабочим диапазоном 0–30 А. Направление осевого МП было противоположно направлению МП Земли. Таким образом было возможно как создавать внешнее МП, так и компенсировать МП Земли. Во время экспериментов МП измерялось магнетометром LakeShore DSP475 с точностью 2×10^{-6} Тл.

Измерения температуры производились термопарным зондом. Использовалась трехпроводная медно-константановая термопара собственного изготовления, диаметр проводов составлял 0,08 мм, а диаметр корольки 0,3 мм. Чувствительность термопары составляла 40 мкВ/К. С термопары сигнал приходил в дифференциальный усилитель с коэффициентом усиления 100–3000. Далее сигнал фильтровался с использованием фильтра низких частот Бесселя 3 порядка с частотой среза 30 Гц. Затем сигнал попадал в АЦП Ла-2М5 РСІ производства фирмы “Руднев-Шиляев”, данные обрабатывались и записывались на жесткий диск персонального компьютера.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сначала методом численного моделирования были получены зависимости осевой скорости и температуры от времени. Данные были получены на оси симметрии ($r = 0$ мм) и на глубине $z = 10$ мм. Значение электрического тока, пропускаемого через жидкий металл, было равно 50 А. Такой электрический ток был выбран из соображения отсутствия турбулентных пульсаций в жид-

ком металле, что позволило наиболее точно сравнивать численные и экспериментальные результаты. Величина внешнего МП изменялась от 0 до 4×10^{-4} Тл.

Расчетные осциллограммы скорости представлены на рисунке 4. Без внешнего поля (рисунок 4(1)) происходило образование одиночного торoidalного вихря, скорость на оси увеличивалась до установления стационарного значения. При наличии вертикального магнитного поля происходила закрутка течения, и через некоторое время (для указанных параметров ~ 160 с) возникал восходящий вихрь (рисунок 4(2)). Взаимодействие вихрей приводило к уменьшению осевой скорости. С ростом внешнего МП время образования второго вихря уменьшалось. После образования второго вихря течение выходило на квазистационарный режим, в котором наблюдались автоколебания — крупномасштабные низкочастотные пульсации. При этом амплитуда пульсаций скорости уменьшалась с ростом величины внешнего МП.

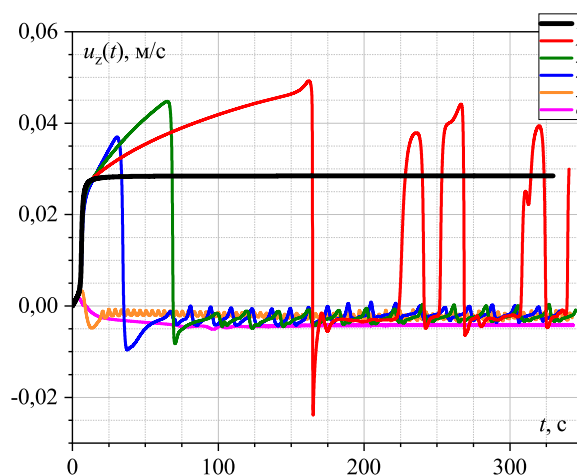


Рисунок 4. Осциллограммы скорости $r = 0$ мм и $z = 10$ мм. 1 — $B_z = 0$ Тл; 2 — $B_z = 5 \times 10^{-5}$ Тл; 3 — 7×10^{-5} Тл; 4 — 9×10^{-5} Тл; 5 — 2×10^{-4} Тл; 6 — 4×10^{-4} Тл.

На рисунке 5 представлены осциллограммы температуры в зависимости от величины внешнего МП. Температура возрастала со временем, при этом с увеличением значения индукции МП температура возрастала медленнее. Пульсации скорости (рисунок 5) приводили к возникновению пульсаций температуры. Пульсации температуры начинались на 176 с для $B_z = 5 \times 10^{-5}$ Тл, на 75 с для $B_z = 7 \times 10^{-5}$ Тл и на 35 с для $B_z = 9 \times 10^{-5}$ Тл, при этом, исходя из численного моделирования, время начала пульсаций соответствовало времени образованию второго вихря. Также для режима без внешнего МП пульсаций температуры не наблюдалось, поскольку второй вихрь не образовывался. Важно отметить, что для режимов $B_z = 2 \times 10^{-4}$ – 4×10^{-4} Тл четко выраженного начала пульсаций не наблюдалось и поэтому было невозможно определить время образования второго вихря, однако по характеру осциллограмм температуры можно было сделать вывод о его наличии. Это было связано с тем, что интенсивность второго вихря значительно превышала интенсивность первого и происходило очень быстрое подавление электровихревого течения.

Затем были получены зависимости времени образования второго вихря и расчетная зависимость полной

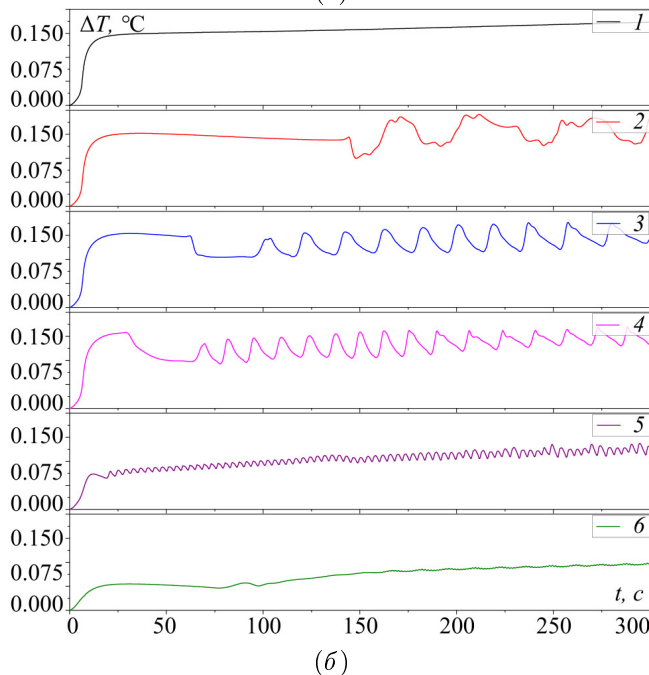
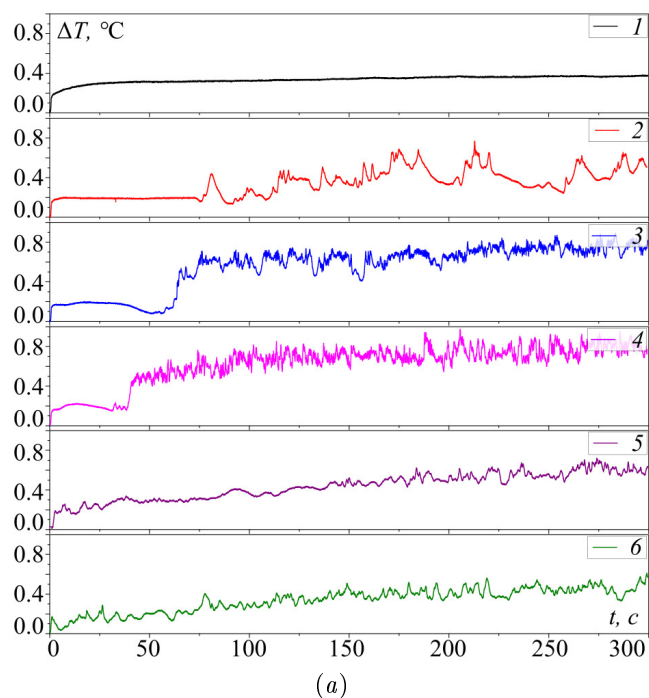


Рисунок 5. Пульсации температуры на глубине 10 мм. (а) — эксперимент, (б) — численный расчет. 1 — $B_z = 0$ Тл; 2 — $B_z = 5 \times 10^{-5}$ Тл; 3 — 7×10^{-5} Тл; 4 — 9×10^{-5} Тл; 5 — 2×10^{-4} Тл; 6 — 4×10^{-4} Тл.

кинетической энергии течения от величины внешнего МП (рисунок 6). Расчет энергии носит иллюстративный характер и подтверждает ранее полученные результаты. При этом для полной кинетической энергии зафиксирована область застоя при МП $B_z = 5 \times 10^{-5}$ Тл, после которой энергия возрастала. При значении электрического тока, большим чем 50 А, область застоя может растянуться вплоть до $B_z = 5 \times 10^{-3}$ Тл [10]. Экспериментальное и расчетное время образования второго вихря качественно согласуются, различие результатов связано, в первую очередь, с неустойчивым гидродинамическим состоянием системы. Например, для МП

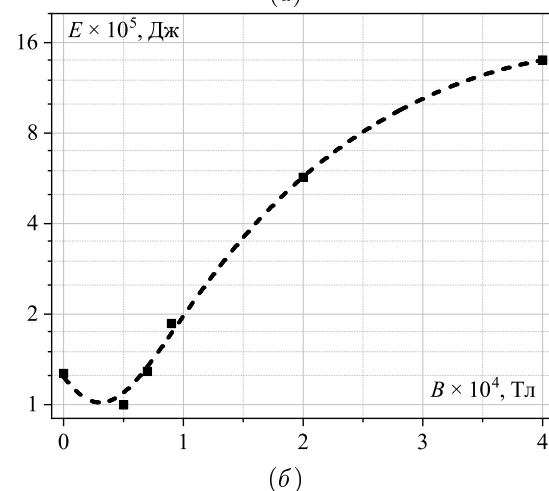
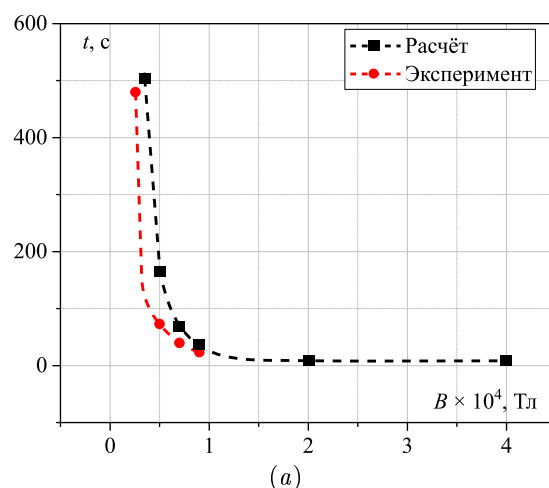


Рисунок 6. (а) — время образования второго вихря, (б) — расчетная зависимость полной кинетической энергии от МП.

$B_z = 5 \times 10^{-5}$ Тл время образования второго вихря в разных экспериментах варьировалось от 50 до 100 с.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании расчетов и экспериментов предложена методика определения режима течения по возникновению температурных пульсаций, вызванных взаимодействием двух вихрей.

Расчетно-экспериментальным методом получено время образования вторичного вихря, вызванного закруткой течения, при различных значениях внешнего осевого МП.

Получено, что с увеличением внешнего магнитного поля время образования вторичного вихря уменьшается, при этом, при достаточно слабом, но конечном поле вторичный вихрь может не образовываться никогда.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание №075-00269-25-00)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боярев В В, Фрейндберг Я Ж, Шилов Е И и Щербинин Э В 1985 *Электровихревые течения* (Рига: Зинатне)

2. Yachikov I M, Portnova I V and Larina T P 2018 *Steel in Translation* **48** 1–6
3. Ячиков И М, Карандаева О И и Ларина Т П 2008 *Моделирование электровихревых течений в ванне электродуговой печи постоянного тока* (Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ)
4. Компан Я Ю 1989 *Электрошлаковые сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами* (Москва: Машиностроение)
5. Прохоренко В Я, Ратушняк Е А, Стадник Б И, Лах В И и Коваль А М 1970 *ТВТ* **8**(2) 374–378
6. Vinogradov D, Teplyakov I and Ivochkin Y 2023 *Mathematics* **11** 3623
7. Menter F R 1994 *AIAA Journal* **32** 1598–1605
8. Жилин В Г, Ивочкин Ю П, Игумнов В С и Оксман А А 1995 *ТВТ* **33** 3–6
9. Vinogradov D, Teplyakov I, Ivochkin Y, Kharicha A and Serbin P 2018 *Magnetohydrodynamics* **54** 403–416
10. Vinogradov D, Teplyakov I and Ivochkin Y 2019 *Magnetohydrodynamics* **55** 455–464
11. Vinogradov D, Teplyakov I, Ivochkin Y and Kharicha A 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1128** 012112