

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ КОНВЕКЦИИ РАСПЛАВЛЕННОЙ РАБОЧЕЙ И НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

БУЙЛОВ Валерий Николаевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

РУДИК Феликс Яковлевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

ЛЮЛЯКОВ Иван Викторович, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

В работе представлена расчетно-математическая оценка скорости конвекции расплавленной рабочей и нагревательной среды при упрочнении восстановленных деталей. Расчетная оценка строилась на теории многомерных теплообменных процессов, протекающих в электродной печи при упрочнении восстановленных деталей. Расчетное моделирование проводилось на основании выбора исходных данных и характеристик. Результаты расчетов позволили установить влияние скорости конвекции расплавленной рабочей и нагревательной среды на упрочнение восстановленных деталей.

Введение. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин и агрегатов по прогрессивным технологиям включает в себя операции наплавки, термического и химико-термического упрочнения восстановленных поверхностей. Выполнение этих операций проводится в термических установках. Для этого предложена конструкция электродной печи-ванны [3, 5, 8].

Целью исследования являлась разработка расчетной модели движения расплавленной рабочей и нагревательной среды печи-ванны для определения ее скорости.

Методика исследований. Расплавленная рабочая и нагревательная среда испытывает воздействие гравитации и разности температур, что в вязкой сплошной среде, с достаточно большим коэффициентом теплового расширения, порождает разность плотностей [4, 6, 7]. Таким образом, происходит тепловая конвекция.

Возможны две схемы тепловой конвекции в рабочей среде печи-ванны. По первой теоретической схеме рабочая среда заключена между горизонтальными поверхностями с различной температурой. Расположенная ниже поверхность имеет температуру больше температуры верхней поверхности.

При малой разности температур поверхностей конвекции не возникает из-за наличия вязкого трения в расплавленной среде. При возрастании градиента температур между поверхностями возникает тепловая конвекция сплошной среды.

По второй теоретической схеме рабочая среда заключена между вертикальными поверхностями с различной температурой. В этом случае расплавленная среда поднимается вдоль более

теплой поверхности, а опускается вдоль более холодной. Конвекция в этом случае будет происходить при любом градиенте температуры.

В печи-ванне, с электродным нагревом расплавленной рабочей среды, образуются вертикальные и горизонтальные температурные градиенты.

Математическое описание условий возникновения конвективного движения расплавленной сплошной среды основывается на уравнениях Рэлея–Бенара, Навье–Стокса и Лоренца о течении вязкой сплошной среды с использованием приближения Овербека–Буссинеска [6, 7].

Рабочее пространство печи-ванны описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений балансов элементарных объемов, на которые оно разбивается.

Для решения этой задачи разделим ее на две подзадачи, которые учитывают горизонтальные и вертикальные температурные градиенты.

Предположим, что источники тепловыделения в ванне расплава печи создают вертикальные составляющие температурных градиентов, что позволяет приступить к решению этой плоской задачи.

Предположим, что система обладает трансляционной инвариантностью по оси y , поэтому переменные в уравнениях (1) и (2) зависят от двух пространственных координат [6, 7]: высоты z и горизонтальной координаты u , перпендикулярной оси конвективных валов (рис. 1).

$$\bar{V} = \bar{V}(u(y, z, t), w(y, z, t)) ; \quad (1)$$

$$T(y, z, t) = T_0 + \Delta T - \frac{\Delta T}{h} z + \theta(y, z, t), \quad (2)$$



где \bar{V} – поле скоростей течения, м/с; T – поле температур, °С; $\theta(y, z, t)$ – отклонение профиля поля температур по оси z , °С.

Введем функцию тока $\Psi(y, z, t)$, такую, что будут выполняться соотношения (3):

$$u = -\frac{\partial \Psi}{\partial z} = -\Psi_z; \quad w = -\frac{\partial \Psi}{\partial y} = \Psi_y. \quad (3)$$

Получим уравнение неразрывности (4).

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Учитывая оператор ротора и представление для поля температур, получим уравнения, записанные через функцию тока и отклонение от линейного по оси z профиля поля температур [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \Psi) = -\frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \Psi) + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial}{\partial y} (\nabla^2 \Psi) + \nu^p \nabla^2 \Psi + g\beta \frac{\partial \theta}{\partial y}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{\Delta T}{h} \frac{\partial \Psi}{\partial z} + k^p \nabla^2 \theta, \quad (6)$$

где g – вектор ускорения свободного падения, $\frac{m}{c^2}$; β – коэффициент теплового расширения среды, $\frac{1}{c}$; k^p – температуропроводность расплавленной среды, $\frac{m^2}{c}$; ν^p – кинематическая вязкость расплавленной среды, $\frac{m^2}{c}$.

Преобразуем (5) и (6) в систему дифферен-

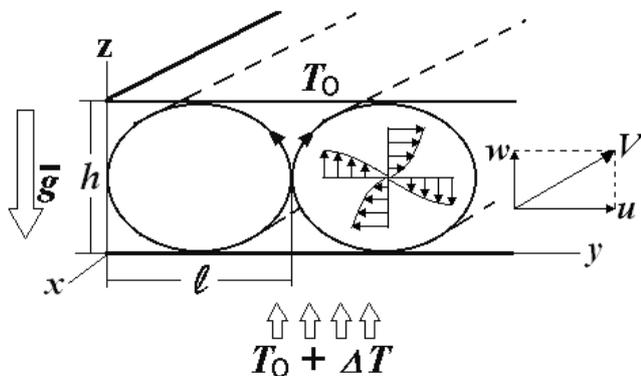


Рис. 1. Конвективные вали при вертикальных температурных градиентах:

$u(y, z, t)$, $w(y, z, t)$ – компоненты поля скоростей по осям y и z , м/с; h – средняя высота слоя расплавленной сплошной среды (характерный размер конвективного вала в вертикальном направлении z), м; ℓ – характерный размер конвективного вала в горизонтальном направлении y

циальных уравнений на основе метода Галеркина [1, 2, 6, 7]. Применение этого метода перехода приводит к тому, что искомые функции представляются в разделенном по переменным виде, точно удовлетворяющим граничным условиям.

Введем представления по Лоренцу функций $\Psi(y, z, t)$ и $\theta(y, z, t)$:

$$\Psi(y, z, t) = \psi_1(t) \sin \frac{\pi y}{\ell} \sin \frac{\pi z}{h}, \quad (7)$$

$$\theta(y, z, t) = \theta_1(t) \cos \frac{\pi y}{\ell} \sin \frac{\pi z}{h} - \theta_2(t) \sin \frac{2\pi z}{h}. \quad (8)$$

$$u = -\Psi_z = -\frac{\pi}{h} \psi_1(t) \sin \frac{\pi y}{\ell} \cos \frac{\pi z}{h},$$

$$w = \Psi_y = \frac{\pi}{\ell} \psi_1(t) \cos \frac{\pi y}{\ell} \sin \frac{\pi z}{h}. \quad (9)$$

В соответствии с методом Галеркина, функции (7)–(9) удовлетворяют граничным условиям (10) с учетом сплошности стенок и отсутствия касательных напряжений при $z = h$.

$$w|_{z=0,h} = 0, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=0,h} = 0, \quad \theta|_{z=0,h} = 0, \quad (10)$$

$$\Psi|_{z=0,h} = 0.$$

Пренебрегая гармониками высших порядков и после некоторых преобразований, получим дифференциальные уравнения (11), (12) и (13).

$$\dot{\psi}_1 = \frac{\nu \pi^2 (\ell^2 + h^2)}{\ell^2 h^2} \psi_1 + \frac{g\beta \ell h^2}{\pi (\ell^2 + h^2)} \theta_1; \quad (11)$$

$$\dot{\theta}_1 = -\frac{\pi^2}{\ell h} \psi_1 \theta_2 + \Delta T \frac{\pi}{\ell h} \psi_1 - \frac{k^p \pi^2 (\ell^2 + h^2)}{\ell^2 h^2} \theta_1; \quad (12)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{\pi^2}{2\ell h} \psi_1 \theta_1 - k^p \frac{4\pi^2}{h^2} \theta_2. \quad (13)$$

Полученные уравнения представляют собой математическую модель первого приближения для решения поставленной задачи. Эта модель непротиворечива и учитывает основные особенности исходных уравнений.

Для корректного определения скоростей движения и распределения температурных полей сплошной среды необходимо учесть горизонтальные температурные градиенты.

Определение скоростей течения сплошной

среды, вызываемого горизонтальными температурными градиентами, основывается на теории течения вязкой среды в кольцевом канале [6, 7]. В этом случае конфигурация температурного поля с горизонтальной составляющей имеет следующий вид (рис. 2). Эта задача моделируется системами уравнений, являющимися частным случаем системы уравнений Рэлея–Бенара, Навье–Стокса и Лоренца о течении вязкой сплошной среды с использованием приближения Овербека–Буссинеска [6, 7] без учета нелинейных членов.

Введение необходимых предположений и допущений позволяет получить следующие уравнения: уравнение движения вязкой среды в полярной системе координат (14), уравнение массовых сил (15), формулу конфигурации температурного поля и граничные условия (16) и (17):

$$\frac{\partial^2 V_\varphi(z^\circ, \varphi)}{\partial z^{\circ 2}} = \frac{1}{\mu^p R^\circ} \frac{\partial P}{\partial \varphi} - \frac{F_\varphi(\varphi)}{\nu^p}, \quad (14)$$

$$F_\varphi = -g[1 - \beta \Delta T] \cos \varphi; \quad (15)$$

$$\Delta T = \Delta T^\circ \cos \varphi; \quad (16)$$

$$V_\varphi(0, \varphi) = V_\varphi(h_k, \varphi) = 0, \quad (17)$$

где μ^p – динамическая вязкость расплавленной сплошной среды, Па·с.

Интегрируя (14) по z° с учетом (15), (16) и граничных условий (17), получим следующее выражение для составляющей скорости (18):

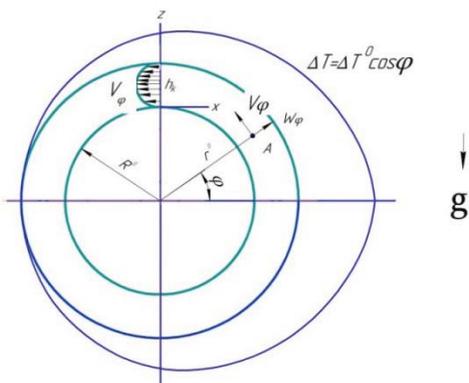


Рис. 2. Расчетная схема неизотермического движения вязкой сплошной среды при горизонтальных температурных градиентах:

V_φ – проекция (тангенциальная) составляющей вектора скорости движения сплошной среды, м/с;

W_φ – проекция (нормальная) составляющей вектора скорости движения сплошной среды, м/с;

h_k – величина канала, м; R° – характерный размер цилиндрической поверхности, м;

ΔT° – максимальный температурный перепад по горизонтали, °С; r° – полярный радиус, м;

r° – полярный угол, °; z° – координата ($z^\circ = r^\circ - R^\circ$)

$$V_\varphi(z^\circ, \varphi) = \left(\frac{1}{\mu^p R^\circ} \frac{dP}{d\varphi} - \frac{F_\varphi}{\nu^p} \right) z^\circ (z^\circ - h_k) / 2. \quad (18)$$

Усредняя (18) по φ от 0 до 2π и по z° от 0 до h_k и учитывая, что $P(2\pi) - P(0) = 0$, получим формулу (19).

$$\langle V_\varphi \rangle = \frac{g\beta\Delta T^\circ h_k^2}{\nu^p 12}. \quad (19)$$

Эта составляющая скорости течения рабочей жидкости обусловлена действием горизонтальных температурных градиентов.

Таким образом, для оценки максимальных составляющих скоростей конвективного течения расплавленной сплошной среды, вызванного горизонтальными температурными градиентами в поле сил тяжести с учетом непрерывности потока, можно применять следующие соотношения:

$$\langle V_\varphi \rangle = \frac{g\beta\Delta T^\circ}{\nu^p} p^\varepsilon, \quad \langle W_\varphi \rangle = \frac{g\beta\Delta T^\circ h}{\nu^p \ell} p^\varepsilon. \quad (20)$$

Значения скоростей, определяемые формулами (20), входят как дополнительные слагаемые в представления поля скоростей (9). Полученные формулы (21) являются базовыми для уточнения построенной математической модели качественного и количественного анализа динамических тепловых процессов в электродной печи-ванне:

$$u = \left(-\frac{\pi}{h} \psi(t) \pm \langle V_\varphi \rangle \right) \sin \frac{\pi y}{\ell} \sin \frac{\pi z}{h};$$

$$w = \left(\frac{\pi}{\ell} \psi_1(t) \pm \langle W_\varphi \rangle \right) \cos \frac{\pi y}{\ell} \sin \frac{\pi z}{h}. \quad (21)$$

Результаты исследований. Расчеты проводились с учетом влияния теплообмена, геометрических характеристик, а также начальных и граничных условий (рис. 3).

Заключение. Построенная на уравнениях Рэлея – Бенара, Навье – Стокса и Лоренца о течении вязкой сплошной среды с использованием приближения Овербека – Буссинеска математическая модель теплообменных процессов в электродной печи-ванне позволяет определять скорости конвективного движения расплавленной сплошной среды, а также уточнять параметры конструкции печи, теплофизические характеристики материалов и сред, температурные и другие необходимые характеристики и параметры. Изменяя входные данные для программы можно моделировать процессы, происходящие в рабочем пространстве печи-ванны для различного расположения электродов и их включения, что позволило провести расчет печи-ванны, как с донным расположением элект-



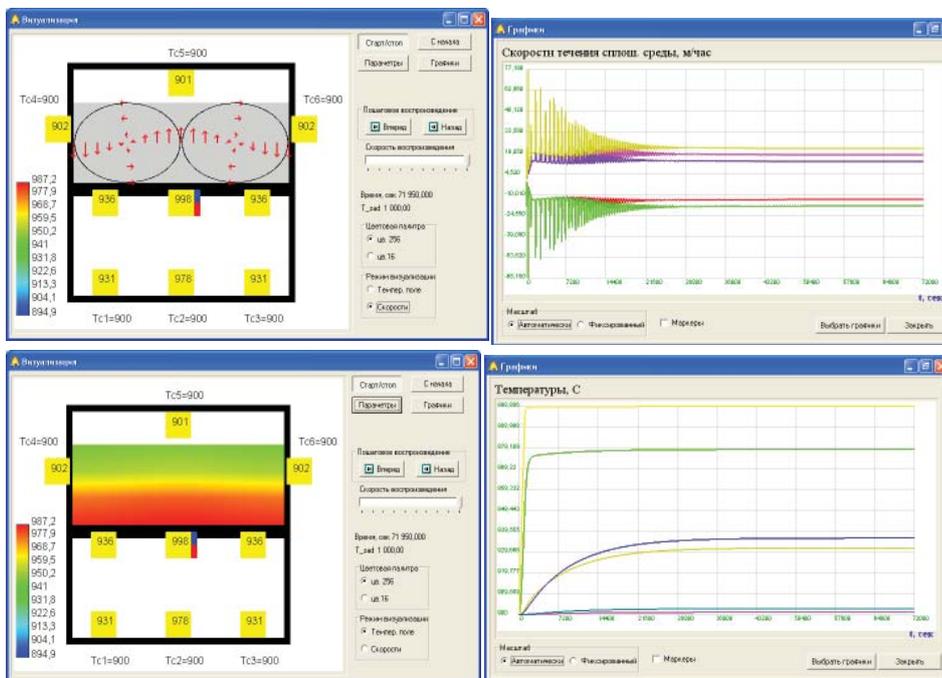


Рис. 3. Скорость конвекции и температура рабочей среды

родов, так и с электродами расположенными и на дне и на боковых стенках. Скорость конвекции сплошной среды возрастает в 4 раза по сравнению с конструкцией печи-ванны с донным расположением электродов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности/ пер. с франц. – М.: Мир, 1991 – 368 с.; ил.
2. Буйлов В.Н. Расчетная оценка применения расплавов электролита при упрочнении восстановленных рабочих органов почвообрабатывающих и посевных агрегатов // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 5. – С. 77–82.
3. Буйлов В.Н. Патент 2139356 Российская Федерация, МКП⁶ С 21 D 1/44. Трехфазная электродная печь-ванна / В.Н. Буйлов, С.А. Богатырев, В.К. Петряков, В.В. Сафонов, А.А. Морозов. – № 98122490/02; заявл. 15.12.1998; опубл. 10.10.99, Бюл. № 28.
4. Буйлов В.Н. Патент 2114184 Российская Фе-

дерация, МКП⁶ С 21 D1/34, В 23 К 35/362. Шлак для нагрева и наплавки металлов и сплавов / В.Н. Буйлов, Б.П. Загородских, В.П. Синичкин, В.К. Петряков, В.В. Сафонов, С.А. Богатырев, А.Л. Нестеров; заявл. 12.09.97; опубл. 27.06.98, Бюл. № 18.

5. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / под общ. ред. В.Г. Пешехонова. – СПб., 2005 – 404 с.

6. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В. Математическая модель динамических тепломассообменных процессов в стекловаренной печи // ИФЖ. – 2003. – Т. 76 – № 5. – С. 117–124.

7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.

8. Дульнев Г.Н. Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. – М., 1990 – 312 с.

Буйлов Валерий Никлоевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническое обеспечение АПК», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.

Рудик Феликс Яковлевич, д-р техн. наук, проф. кафедры «Технологии продуктов питания», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.

Люляков Иван Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническое обеспечение АПК», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.

410056, г. Саратов, ул. Советская, 60.

Тел.: (8452) 74-96-63.

Ключевые слова: расплав; восстановление; математическое моделирование; упрочнение.

CALCULATED ESTIMATE OF THE INFLUENCE OF THE CONVECTION RATE OF THE MOLTEN WORKING AND HEATING MEDIUM DURING THE STRENGTHENING OF THE RESTORED PARTS

Builov Valeriy Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Technical Support in AIC", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.

Rudik Phelix Yakovlevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Food Technology", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.

Lyulyakov Ivan Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Technical Support in AIC", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.

Keywords: melt; recovery; math modeling; hardening.

The article presents a computational and mathematical assessment of the convection rate of the molten working and heating medium during the strengthening of the restored parts. The calculated estimate was based on the theory of multidimensional heat and mass transfer processes occurring in the electrode furnace during the hardening of the restored parts. Computational modeling was carried out based on the choice of initial data and characteristics. The calculation results made it possible to establish the effect of the convection rate of the molten working and heating medium on the hardening of the restored parts.

