

УДК 519.677

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ МЕТАЛЛОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРА С ОТРАЖАТЕЛЕМ УНРС*

*Одинокое В.И.¹, д.т.н., профессор, профессор-консультант кафедры «Машиностроение
и металлургия» (79122718858@yandex.ru)*

*Евстигнеев А.И.^{1,2}, д.т.н., профессор, проректор по науке и инновационной
работе (diss@knastu.ru)*

Дмитриев Э.А.¹, д.т.н., доцент, ректор (rector@knastu.ru)

¹ Комсомольский-на-Амуре государственный университет
(681013, Россия, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

² Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН
(681005, Россия, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1)

Аннотация. Течение жидкого расплава в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали (УНРС) до сих пор является малоизученным процессом. Настоящая работа является продолжением работ, в которых с использованием уравнений гидродинамики и математической физики, апробированного численного метода показана возможность теоретического исследования кинетики движения и тепловых потоков жидкого металла в кристаллизаторе при его разливе традиционным способом. С использованием известной методики расчета можно рассчитать потоки движений жидкого металла и их температуры в кристаллизаторе и при других способах подвода металла, включая предлагаемый, и сравнить полученные результаты. Поставлена и решена трехмерная задача определения полей скоростей и температур в металле, подводимом в кристаллизатор УНРС из погружного стакана на отражатель круглого поперечного сечения. При этом используется методика расчета: система определяющих уравнений, численный метод, численная схема, алгоритм решения задачи. В расчетах пренебрегали нарастающей на гранях кристаллизатора корочкой затвердевшего металла. Для объективного анализа результатов решения задачи по традиционному и предложенному способам взяты одни и те же теоретические (скорость вытягивания из кристаллизатора) и геометрические параметры кристаллизатора прямоугольного сечения. По описанному в настоящей работе альтернативному способу подвода жидкого металла в кристаллизатор прямоугольного сечения зарегистрирована заявка (№ 2018108974/02(013808)) и получено положительное решение на выдачу патента на полезную модель. Приведены некоторые результаты численного решения задачи, а именно, схемы потоков жидкого металла и их температуры по различным сечениям кристаллизатора.

Ключевые слова: численное моделирование, кристаллизатор, отражатель, потоки расплава, скорость течения, температура расплава.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-747-755

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процесса разлива металла в установке непрерывной разливки стали (УНРС) проводилось в многочисленных экспериментальных работах как отечественных, так и зарубежных исследователей [1 – 4]. Получение качественной структуры заготовки при непрерывной разливке металла во многом связано со способом его подачи в кристаллизатор установки непрерывной разливки стали [5 – 7]. При традиционном способе [8] металл из промежуточного ковша поступает в кристаллизатор через окна глуходонного погружного стакана, расположенные друг относительно друга под углом 180°. С целью создания условий для более равномерного омывания жидким металлом стенок кристаллизатора и получения однородной структуры по периметру заготовки предложен ряд новых способов выхода жидкого металла в кристаллизатор из погруж-

ного стакана: различные наклоны окон [9], эксцентричное расположение окон [9, 10], установка нескольких погружных стаканов, электромагнитное перемешивание жидкого металла в кристаллизаторе [11, 12] и др.

Известны разные математические модели, в которых учитывается влияние перемешивания расплава на скорость охлаждения стали без рассмотрения уравнений движения жидкости.

В работе [13] Кохн рассматривает жидкость, образованную из двух сред. Предполагается, что в первой среде теплообмен осуществляется только за счет теплопроводности. Вторая среда соответствует зоне равноосной кристаллизации и под влиянием конвекции в ней предполагается равномерное распределение температур в каждый момент времени. Недостаток этой модели состоит в том, что в первой среде перед затвердеванием также существует конвективное движение жидкости, которое в модели не учитывается.

Е. Мизикар [14] разработал модель передачи тепла в жидкости теплопроводностью, но с учетом конвек-

* Обработку численных результатов выполнил к.т.н. А.И. Горнаков.

тивного движения. Согласно этой модели жидкость с конвективным движением имеет в девять раз большую теплопроводность, чем жидкость без конвективного движения. Недостатком модели является то, что конвективное движение в ней учитывается с помощью постоянного коэффициента.

Сцекели и Станеком [15] разработана модель, в которой учитывается в первую очередь конвекция, создаваемая разливочной струей. Эта модель представляет интерес с точки зрения запаздывания кристаллизации в зависимости от температуры стали при разливке. В модели принимается, что температура жидкости равна температуре расплава, находящегося на несколько сантиметров ниже мениска. Последнее делает модель менее интересной.

З.К. Кабаковым с соавторами [16] и В.В. Соболевым [17] разработаны модели затвердевания слитков, имеющие одно уравнение теплопроводности и соответствующие граничные условия, в которых процесс перемешивания учитывается при помощи эффективного коэффициента теплопроводности. Перемешивание расплава при числах Рейнольдса $10^4 - 10^6$ приводит к тому, что эффективный коэффициент переноса тепла в 10 – 100 раз больше, чем в случае, когда металл не движется [16]. Эта модель также имеет недостаток: конвекция в ней учитывается с помощью постоянного коэффициента, имеющего мало отношения к действительному конвективному движению жидкой стали.

Для определения эффективного коэффициента теплопроводности З.К. Кабаковым [16] были использованы результаты экспериментальных исследований турбулентного переноса тепла, полученные при решении задачи определения скорости движения металла при термогравитационной конвекции в незатвердевшей части слитка. Полученную модель применили для изучения затвердевания плоского стального слитка толщиной 0,2 м при различной интенсивности перемешивания жидкой фазы. Результаты моделирования показали, что в условиях перемешивания движение границы выливаемости и солидуса сначала замедляется, потом отмечается ускорение затвердевания. Продолжительность затвердевания слитка в целом сокращается, однако увеличивается время пребывания осевой зоны в двухфазном состоянии. При определенном значении скорости перемешивания длительность затвердевания перестает уменьшаться. В работе отмечается разогрев поверхности слитка при перемешивании жидкой фазы.

В работе [18] Ю.А. Калугиным и С.В. Сорокиным выполнено исследование теплообменных характеристик в рабочей стенке кристаллизатора при различных расходах охлаждающей воды через каналы в стенке. Показано, что температура рабочих стенок при постоянной скорости вытягивания и неизменном положении мениска металла изменяется с частотой качания кристаллизатора. Для исследования интенсивности теплообмена в различных точках поверхности стенок решена обратная

задача теплопроводности. Установлено, что наиболее интенсивно процесс теплоотдачи от поверхности канала к воде происходит при изменении угла по окружности канала от 0 до 80 – 90°. С увеличением плотности теплового потока этот диапазон уменьшается.

С целью совершенствования рабочих режимов машин непрерывного литья заготовок проведен теплотехнический анализ условий формирования слитка [19]. Авторы отмечают, что для получения максимальной производительности установки нужно иметь максимальную скорость разливки металла. По их мнению, такой скоростной режим может быть достигнут за счет интенсификации охлаждения слитка на всем протяжении зоны вторичного охлаждения, так как вблизи кристаллизатора эффективного воздействия на скорость охлаждения и кристаллизации получить не удастся.

По результатам измерений расхода и нагрева воды, проходящей через каналы рабочих стенок, а также температуры медных стенок В.М. Нисковских [20] определены значения теплоотода в кристаллизаторе. При разливке стали со скоростью 0,5 – 0,6 м/мин тепловые потоки около мениска металла достигали 1860 – 2093 кВт/м², на расстоянии 220 и 750 мм от верха кристаллизатора – 1279 – 1395 и 407 – 523 кВт/м² соответственно. В результате средний по кристаллизатору тепловой поток составляет 930 кВт/м². С увеличением скорости разливки тепловой поток возрастает. В работе указывается на асимметрию кристаллического строения слитка, полученного на криволинейной установке непрерывной разливки стали.

Из обзора рассмотренных и других работ следует, что в настоящее время накоплен значительный материал по вопросам моделирования гидродинамики и теплообмена в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали.

Известные математические модели, описывающие процесс заполнения кристаллизатора жидким металлом, содержат грубые допущения.

Построение аналитических решений для течения расплава в общем случае является чрезвычайно сложной математической задачей. Тем не менее, для некоторых частных случаев точные решения найдены. Такие аналитические решения, как правило, служат средством проверки результатов численных методов решения. Основу применяемой в работе математической модели составляют уравнения Навье-Стокса. Детальный обзор точных решений уравнений Навье-Стокса приведен в монографии [21], где рассмотрены решения в стационарном и нестационарном случаях для осесимметричных течений и течений в каналах, ограниченных плоскостями.

Среди наиболее часто применяемых методов численного решения уравнений механики сплошных сред можно выделить следующие: метод конечных разностей, метод конечных объемов, метод конечных элементов. Однако их применение для несжимаемых сред связано с рядом трудностей и ограничений.

Известна широко распространенная схема заливки металла в кристаллизатор, включающая промежуточный ковш, кристаллизатор с различными геометрическими параметрами граней и глухондонного погружного разливочного стакана с двумя выходными отверстиями, расположенными вниз или вверх к горизонту, оси которых проходят через центр стакана.

Недостатком этой схемы является то, что использование такого разливочного стакана не обеспечивает необходимого равномерного перемешивания расплава в горизонтальной плоскости кристаллизатора, что приводит к получению различной в горизонтальном сечении структуры кристаллизующегося металла. Это затрудняет при дальнейшем переделе (прокатке) получение однородной качественной металлопродукции. Кроме того, такая форма погружного стакана требует его частой замены (выходные окна размываются и могут вызывать отрыв дна стакана).

Повышение надежности и эффективности работы такого стакана может быть достигнуто при подаче жидкого металла из стакана на отражатель.

Вследствие того, что струя жидкого металла из прямого погружного стакана попадает на отражатель круглого поперечного сечения, то эта струя отражается равномерно во все стороны, а значит, равномерно омывает в горизонтальном сечении всю внутреннюю поверхность кристаллизатора круглого или квадратного поперечного сечения. Такая схема заполнения кристаллизатора, состоящая из прямого погружного стакана и отражателя, гораздо проще и дешевле, чем изготовление глухондонного погружного стакана с выходными окнами. При этом обеспечивается равномерная по периметру в горизонтальной плоскости подача металла в кристаллизатор УНРС, что способствует получению однородной в горизонтальной плоскости структуры закристаллизовавшегося металла при получении круглой или квадратной непрерывной заготовки.

В настоящей работе математическая модель построена по предложенному авторами способу разливки (рис. 1).

Суть метода заключается в следующем: жидкий металл из ковша 1 через погружной прямооточный стакан 2 падает на отражатель 3 круглого поперечного сечения и разливается в стороны в горизонтальном направлении на стенки кристаллизатора 4. От напора жидкого металла отражатель 3 удерживается кронштейнами 5.

Для построения численной схемы и алгоритма решения системы дифференциальных уравнений использован численный метод, предложенный профессором В.И. Одиноким и основанный на конечно-разностном представлении исходной системы уравнений. Отличие от метода конечных разностей заключается в том, что расчетная область разбивается на элементы ортогональной формы, конечно-разностные соотношения записываются в среднем для элементов, а не узлов сетки. К достоинствам рассматриваемого метода следует

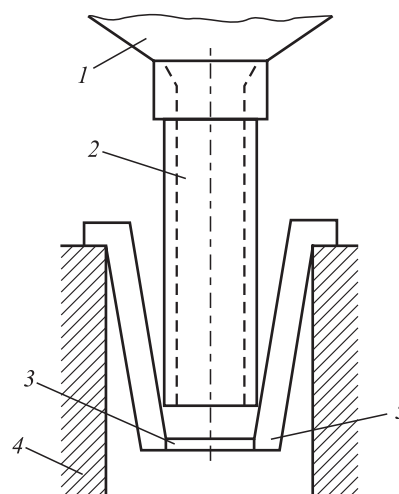


Рис. 1. Схема разливки жидкого металла в установке непрерывной разливки стали с использованием отражателя круглого поперечного сечения:

1 – промежуточный ковш; 2 – погружной стакан; 3 – отражатель; 4 – кристаллизатор; 5 – кронштейн

Fig. 1. Scheme of liquid metal casting in CCM using reflector of circular cross-section:

1 – tundish; 2 – submerged entry nozzle; 3 – deflector; 4 – mold; 5 – support

отнести относительную простоту реализации на ЭВМ, простоту задания граничных условий, а к недостаткам – возможность расчета только для областей, геометрия которых описывается системой ортогональных поверхностей. Такой метод широко применяется при решении разнообразных задач механики сплошных сред.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для упрощения решения задачи принимается, что погружной стакан и отражатель имеют квадратное поперечное сечение, нарастающей корочкой металла можно пренебречь. Формализованная расчетная схема процесса с учетом осевых симметрий представлена на рис. 2.

Процесс стационарный. Среду (жидкий металл) будем считать несжимаемой. Исходя из сформулированных допущений, запишем систему дифференциальных уравнений в декартовой системе координат.

Для несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) и стационарного течения $\left(\frac{\partial v_i}{\partial \tau} = 0\right)$ имеем следующую систему уравнений гидродинамики:

– закон сохранения количества движения

$$F_i^* - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 v_i = I_i^*; F_2^* = F_3^* = 0;$$

$$I_i^* = \rho \frac{\partial v_i}{\partial \tau}; \frac{\partial v_i}{\partial \tau} = v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k};$$

$$\nabla^2 v_i = \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_3^2}; i, k = 1, 2, 3;$$

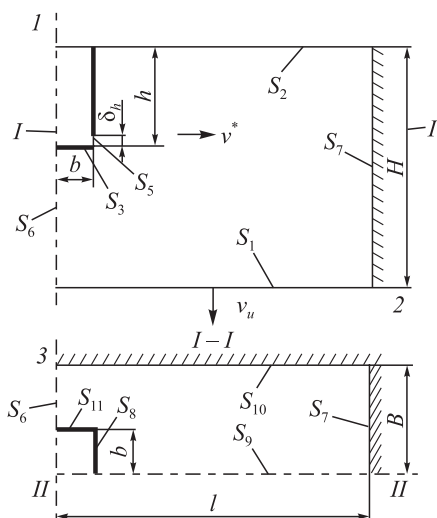


Рис. 2. Формализованная расчетная схема задачи заполнения металлом кристаллизатора

Fig. 2. Formalized calculation scheme of filling the mold with metal

– уравнение несжимаемости

$$v_{i,i} = 0; i = 1, 2, 3; \quad (2)$$

– уравнение теплопроводности (с учетом массопереноса и стационарности)

$$\frac{d\theta}{d\tau} = a\nabla^2\theta; \quad \frac{d\theta}{d\tau} = v_i \frac{\partial\theta}{\partial x_i}; \quad i = 1, 2, 3; \quad (3)$$

здесь p – давление в данной точке ($p = -\sigma$); σ – гидростатическое напряжение; μ – коэффициент вязкости ($\text{Г}\cdot\text{с}/\text{см}^2$); v_i – проекции скоростей перемещений по координатным осям x_i ($i = 1, 2, 3$); ρ – плотность жидкого металла; F_i^* – проекция удельной объемной силы на координатные оси x_i ($i = 1, 2, 3$); τ – время; ∇^2 – оператор Лапласа; θ – температура; $a = \lambda/(c\gamma)$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; γ – плотность. Все величины принимаются постоянными (константами).

Уравнения (1), (2) описывают течение ньютоновской вязкой несжимаемой жидкости, для которой справедливы уравнения

$$\sigma_{ij,j} + F_i^* = I_j^*; \quad I_j^* = \rho \left(\dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right); \quad i, j = 1, 2, 3; \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij} = 2\mu\xi_{ij}; \quad \xi_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}); \quad i, j = 1, 2, 3; \quad (5)$$

$$v_{i,i} = 0; \quad i = 1, 2, 3; \quad (6)$$

здесь σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; δ_{ij} – символ Кронекера.

Для стационарного процесса

$$\dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau} = 0.$$

Граничные условия задачи (рис. 2):

– в плоскости симметрии x_1, x_2 :

$$(\sigma_{31} = \sigma_{32})|_{S_5} = 0; \quad v_3|_{S_5} = 0; \quad (7)$$

– в плоскости симметрии x_1, x_3 :

$$(\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{S_6} = 0; \quad v_2|_{S_6} = 0; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{S_2} = -p_1; \quad (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{S_1} = 0; \quad i = 1 \div 3; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{S_i} = 0; \quad i = 5, 7, 8; \\ (\sigma_{31} = \sigma_{32})|_{S_i} = 0; \quad i = 10, 11; \end{aligned} \quad (9)$$

$$v_1|_{S_1} = v_u; \quad v_1|_{S_3} = 0; \quad v_2|_{S_7} = 0; \quad v_2|_{S_8} = v_2^*; \quad v_3|_{S_{11}} = v_3^*; \quad (10)$$

$$\theta|_{S_i} = \theta_i^*; \quad i = 1, 2, 3, 5, 8, 11; \quad (11)$$

$$q|_{S_i} = 0; \quad i = 6, 9; \quad q|_{S_i} = q_i^*; \quad i = 7, 10;$$

здесь v_u – скорость вытягивания слитка (рис. 2); $v_i^*, i = 2, 3$ – скорость выхода металла с диска-отражателя; θ_i^* – заданные функции распределения температуры металла на поверхностях S_i ; $q_i^*, i = 1, 2$ – заданные по экспериментальным данным тепловые потоки через поверхности S_7, S_{10} .

РЕШЕНИЕ

Решение системы уравнений (4) – (6) и уравнения (3) с учетом граничных условий (7) – (11) осуществлено известным численным методом в соответствии с численной схемой и алгоритмом, описанным в работах [8, 10]. При решении задачи использована авторская программа «Одиссей».

ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА

Расчетная область разбивается на ортогональные элементы конечных размеров. Для каждого элемента записывается в разностном виде система (4) – (6), которая решается по разработанному алгоритму с учетом граничных условий (7) – (10). В результате решения получаем поля напряжений σ_{ij} и скоростей перемещений v_i по граням каждого элемента.

ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Для решения уравнения (3) с учетом граничных условий (11) использовали численный метод. Исследуемая область разбивается на элементы ортогональной

формы, для каждого элемента записывается тепловой баланс через входящие и выходящие из элемента потоки тепла. В результате получается система уравнений по каждому элементу.

В работе доказывается, что полученные уравнения справедливы для любой ортогональной системы координат, рассматривается процесс численной реализации решения при заданных граничных условиях, строится итерационная процедура (прогонка), доказывается ее сходимость. Следуя методике работы, уравнение теплопроводности (3) по элементу (рис. 3) для стационарного случая с учетом массопереноса без внутренних источников тепла будет иметь вид

$$\sum_{i=1}^3 t_{i2}(\theta_i^+ - \theta_k) - \sum_{i=1}^3 t_{i1}(\theta_k - \theta_i^-) = \sum_{i=1}^3 t_i(\theta_k - \theta_i^-) + \sum_{i=1}^3 a_i(\theta_i^- - \theta_k); \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} t_{12} &= \frac{2F_1^2 A}{S_{21} + S_{21}^+}; & t_{11} &= \frac{2F_1 A}{S_{21} + S_{21}^-}; \\ t_1 &= \frac{2v_1^*}{S_{21} + S_{21}^+}; & a_1 &= \frac{2v_1^*}{S_{21} + S_{21}^+}; \\ t_{22} &= \frac{2F_2^2 A}{S_{12} + S_{12}^+}; & t_{21} &= \frac{2F_2 A}{S_{12} + S_{12}^-}; \\ t_2 &= \frac{2v_2^*}{S_{12} + S_{12}^+}; & a_2 &= \frac{2v_2^*}{S_{12} + S_{12}^+}; \\ t_{32} &= \frac{2F_3^2 A}{S_{23} + S_{23}^+}; & t_{31} &= \frac{2F_3 A}{S_{23} + S_{23}^-}; \\ t_3 &= \frac{2v_3^*}{S_{23} + S_{23}^+}; & a_3 &= \frac{2v_3^*}{S_{23} + S_{23}^+}; \\ A &= \frac{\lambda}{c\gamma V_k}; & F_i^j &= S_{ik}^j S_{ip}^j; & i \neq k \neq p; \\ i, k, p &= 1, 2, 3; & V_k &= \frac{S_{12} S_{13} S_{21}}{16}; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

здесь λ , c и γ – коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность металла; θ_k – средняя температура в k -ом элементе; θ_i^- , θ_i^+ – средняя температура в элементе, следующим за элементом k соответственно в отрицательную и положительную сторону по координате x_i ; $S_{ij}^- = S_{ij}^{1-} + S_{ij}^{2-}$; $S_{ij}^+ = S_{ij}^{1+} + S_{ij}^{2+}$ – значения дуг S_{ij} по элементам, граничащим с элементом k с соответствующей стороны; v_i^* – средние по элементу проекции скорости перемещений по координатным осям x_i ($i = 1, 2, 3$).

Уравнение (12) записано только для внутренних элементов, не принадлежащих к границе области. Для граничных элементов температура определяется граничными условиями (11). На плоскостях симметрии (поверхности S_6 , S_9 (рис. 2)) имеем:

- поверхность S_6 : $(q_{2|S_6} = 0) \Rightarrow (\theta_k - \theta_2^-) = 0$;
- поверхность S_9 : $(q_{3|S_9} = 0) \Rightarrow (\theta_k - \theta_3^-) = 0$.

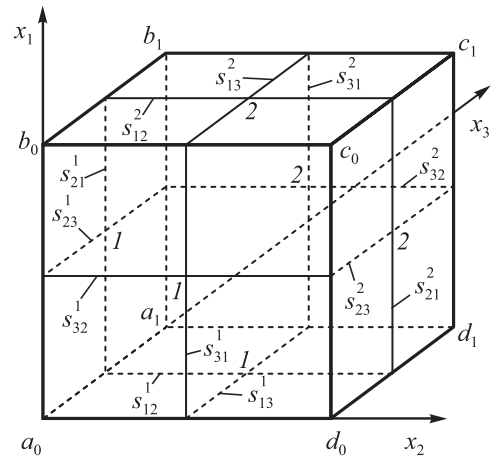


Рис. 3. Вид элемента области разбиения

Fig. 3. View of the division range element

Из уравнения (12) следует уравнение для элементов, примыкающих к поверхности S_6 :

$$\sum_{i=1}^3 t_{i2}(\theta_i^+ - \theta_k) - \sum_{i=1,3} t_{i1}(\theta_k - \theta_i^-) = \sum_{i=1,3} t_i(\theta_k - \theta_i^-) + \sum_{i=1}^3 a_i(\theta_i^+ - \theta_k). \quad (14)$$

Для элементов, примыкающих к поверхности S_9 , справедливо уравнение:

$$\sum_{i=1}^3 t_{i2}(\theta_i^+ - \theta_k) - \sum_{i=1,2} t_{i1}(\theta_k - \theta_i^-) = \sum_{i=1}^2 t_i(\theta_k - \theta_i^-) + \sum_{i=1}^3 a_i(\theta_i^+ - \theta_k). \quad (15)$$

Уравнения (12), (14) и (15) линейные, решая их с учетом граничных условий (11), получим значения θ_k , $k = 1, \dots, m$ (где m – количество элементов).

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Исследуемая область течения разбивается на элементы ортогональной формы; рассчитывается матрица длин дуг элементов.

По разработанной программе численно решается система уравнений (4) – (6) с учетом граничных условий (7) – (10).

Численно решается система уравнений теплопроводности (12), (14) и (15) с учетом граничных условий (11) при найденных значениях v_i^* , $i = 1, 2, 3$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для сравнения кинетики течения металла в кристаллизаторе его габаритные размеры задавали такими же, как и в работах [8, 10]: $H = 100$ см; $B = 12,5$ см;

$l = 100 \text{ см}; b = 7,5 \text{ см}; h = 30 \text{ см}; \delta_h = 2 \text{ см}; v_u = 1 \text{ м/мин} = 1,66 \text{ см/с}.$

Скорости v_2^*, v_3^* определяли из равенства секундных объемов; $v_2^* = v_3^* = v^*$:

$$Blv_u = 2b\delta_h v^*; v^* = \frac{Blv_u}{2b\delta_h}.$$

Тепловые потоки $q_i^* = 1, 2$ по стенкам кристаллизатора определяли по методике, приведенной в работе [9]:

$$q_i^* = 2,5(v)^{0,8}, i = 1, 2,$$

где q_i^* – тепловой поток, МВт/м²; v – скорость омыwania стенки кристаллизатора, м/с.

При условии $q_i^* = -\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_i$ получаем

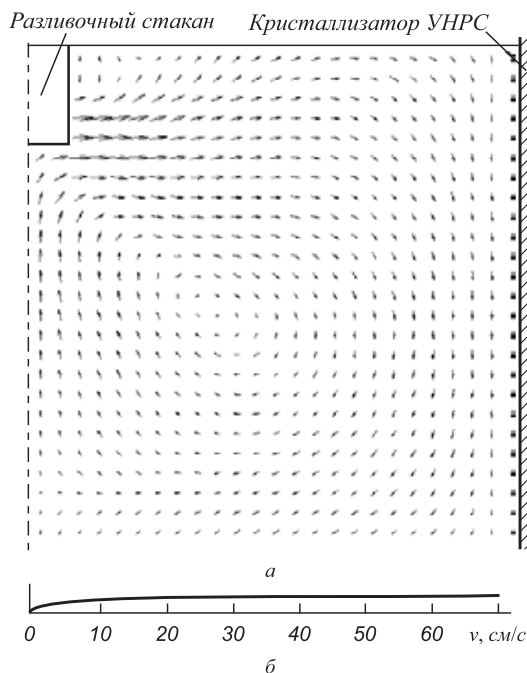


Рис. 4. Поле скоростей в сечении S_9 (а) и зависимость длины вектора от скорости потока (б)

Fig. 4. Velocity field in the cross section S_9 (a) and dependence of vector length on flow velocity (b)

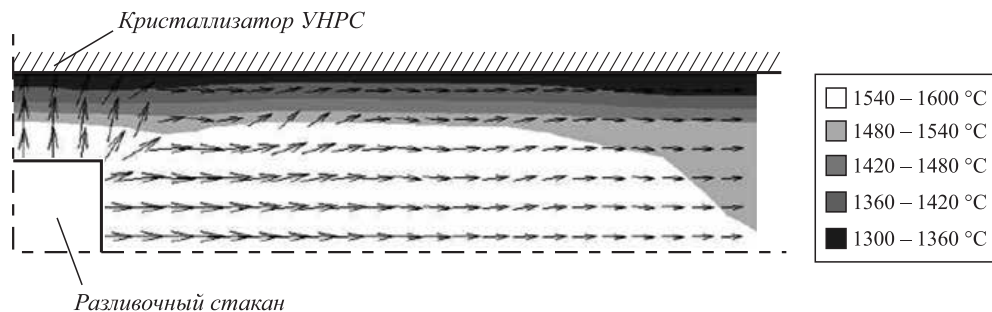


Рис. 5. Поле скоростей и температур в горизонтальном сечении на уровне истекающих струй

Fig. 5. Field of velocities and temperatures in a horizontal section at the level of flowing out metal jets

$$\left(\theta_n^\beta \right)_i = \left(\theta_n^k \right)_i - \frac{\delta^*}{\lambda} q_i^*, i = 1, 2,$$

где θ_n^β – температура элемента, примыкающего к поверхности (n); θ_n^k – температура внутреннего элемента, находящегося по нормали сразу же за поверхностными β ; δ^* – расстояние от центра тяжести элемента β до центра тяжести элемента k .

Температуру истекания жидкой стали с отражателя (S_{11}) (рис. 2) принимали $\theta_{S_{11}}^* = 1600 \text{ °C}$. Температуры на поверхностях стакана (рис. 2) $S_i, i = 3, 8, 11$ принимали по экспериментальным данным $\theta_{S_i}^* = 1550 \text{ °C}, i = 3, 8, 11$. На поверхности S_2 (рис. 2) находится жидкая шлаковая «рубашка», температура которой $\theta_{S_2}^* = 1550 \text{ °C}$.

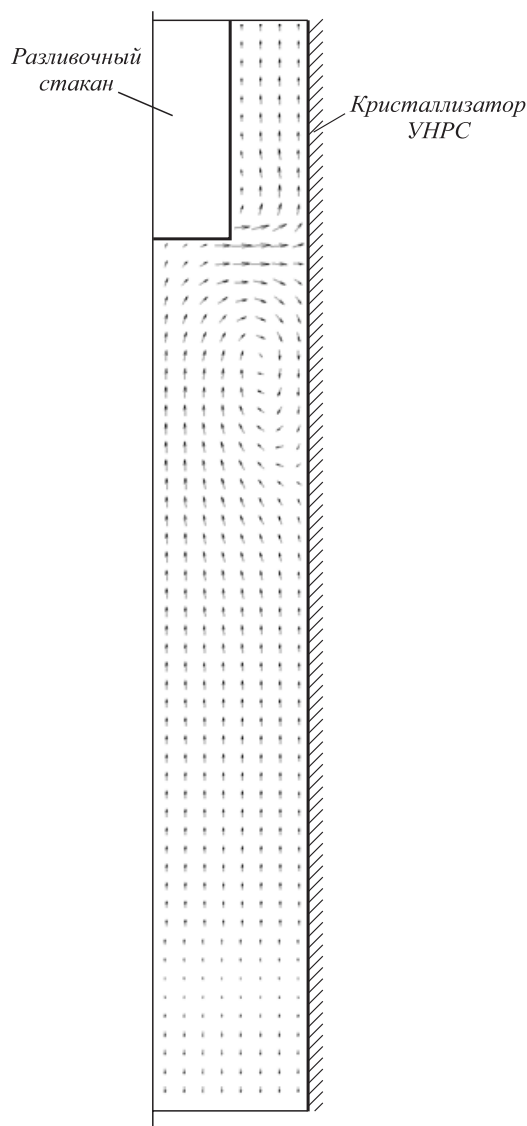
Некоторые результаты решения представлены на рис. 4 – 6 (масштаб векторов одинаков).

На рис. 4 приведено поле скоростей в плоскости симметрии $x_1 - x_2$. По сравнению с традиционным способом разливки, продемонстрированным в работах [8], наблюдается более «мягкое» (по скоростям течения) омывание вертикальной стенки кристаллизатора. Это и понятно: скорость выхода металла из выходного окна в работах [8] составляет 163 см/с, в рассматриваемом в настоящей работе способе разливки – 70 см/с. Вихрь (рис. 4) располагается ближе к поверхности вертикальной стенки кристаллизатора S_7 . При традиционном выпуске металла вихрь располагается ближе к центру [8].

На рис. 5 показано поле скоростей и температур в горизонтальном сечении на уровне истекающих струй, на рис. 6 – поле скоростей в плоскости симметрии $x_1 - x_3$ (поверхность S_6 (рис. 2)). Виден вихрь в вертикальной плоскости ближе к поверхности S_{10} в верхней ее части. Также, как и в сечении S_9 (рис. 2), наблюдается «мягкое» омывание жидким металлом поверхности S_{10} .

ДИСКУССИЯ

Результаты решения задачи показывают, что предложенный способ подачи жидкого металла в кристаллизатор прямоугольного сечения имеет преимущества перед традиционным способом. Омывание жидким

Рис. 6. Поле скоростей в сечении симметрии $x_1 - x_3$ Fig. 6. Velocity field in the symmetry section $x_1 - x_3$

металлом стенок кристаллизатора протекает более равномерно, о чем свидетельствуют представленные потоки металла (рис. 5, 6) в сравнении с потоками, рассчитанными по традиционной методике и описанными в работах [8].

Следовательно, предположенная схема заполнения кристаллизатора жидким металлом более предпочтительна, чем при традиционном способе вследствие более «мягкого» омывания жидким металлом вертикальных стенок кристаллизатора. Соответственно, структура вытягиваемого слитка должна быть более однородной, чем при использовании традиционного способа.

Выводы

Продемонстрирована эффективность применения используемого численного метода к решению задач

гидродинамики. Показана возможность расчета вихревых потоков на примере подвода жидкого металла в кристаллизатор УНРС. Рассмотрен новый способ заполнения кристаллизатора жидким металлом через прямоточный погружной стакан и отражатель, позволяющий более равномерно (мягко) подводить жидкий металл к стенкам кристаллизатора. Построена математическая модель процесса заполнения жидким металлом кристаллизатора с отражателем, позволяющая определять поле скоростей и температур металла в зоне кристаллизатора в зависимости от объема металла, вытекающего из погружного стакана на отражатель.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eastman C.M., Glaws P.C. Steel quality improvements with vertical continuous casting at faircrest steel plant // ASTM Special Technical Publication. 2017. Vol. STP 1600. P. 1 – 22.
2. Ho K., Pehlke R. Modelling of steel solidification using the general finite difference method // Warrendale. 1986. Vol. 6. P. 853 – 866.
3. Ozava M., Okano S., Matsuno J. Influence des conditions du jet de coulée sur la formation de la peau solidifiée en lingotière de brames de coulée continue // Tensu to Hagane. 1976. Vol. 62. No. 4. P. 86.
4. Larreq M., Sagues C., Wanin M. Vodele mathématique de la solidification en coulée continue tenant compte de la convection à l'interface solide-liquide // Revue de métallurgie. 1978. Vol. 75. No. 6. P. 337 – 352.
5. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Смирнов А.П., Производство стали. Т. 4. Непрерывная разливка металла. – М.: Теплотехник, 2008. – 528 с.
6. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
7. Intern. Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. October 25-28, 1994. – Nagoya, Japan: ISIJ, 1994. – 580 p.
8. Одинокое В.И., Дмитриев В.А., Евстигнеев А.И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора УНРС // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 6. С. 493 – 499.
9. Разработка нового способа разливки слябовых заготовок на МЛНЗ / В.В. Стулов, В.А. Матысик, Т.В. Новиков, С.В. Щербанов, И.В. Чистяков, А.П. Плотноков. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 156 с.
10. Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И. Математическое моделирование процесса течения металла в кристаллизаторе при его подаче из погружного стакана с эксцентричными отверстиями // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 8. С. 606 – 612.
11. Dauby P., Kunstreich S. Application of micro-refrigerators as the active element on the crystallization of metal // ISS Tech. 2003. P. 491 – 504.
12. Wolf M. Application of micro-refrigerators // Iron and Steel Intern. 1995. No. 9. P. 36 – 37.
13. Kohn A., Morillon Y. Etude mathématique de la solidification des lingots en acier midur // Revue de Métallurgie. 1966. Vol. 63. No. 10. P. 779 – 790.
14. Mizikar E. Mathematical heat transfer model for solidification of continuous cast steel slabs // Trans. of the Metallurgical Society of AIME. 1967. Vol. 239. No. 11. P. 1747.
15. Szekely J., Stanek V. On heat transfer and liquid mixing in the continuous casting of steel // Metallurgical Transactions. 1970. Vol. 1. No. 1. P. 119 – 126.
16. Кабаков З.К., Килимник И.А., Самойлович Ю.А. Математическое моделирование тепловых процессов в затвердевающем слитке при перемешивании жидкой сердцевины // Изв. вуз. Черная металлургия. 1989. № 2. С. 115 – 119.

17. Соболев В.В., Трефилов П.М. Оптимизация тепловых режимов затвердевания расплава. – Красноярск: изд. КГУ, 1986. – 152 с.
18. Калугин Ю.А., Сорокин С.В. Исследование теплообмена в каналах охлаждения кристаллизатора МНЛЗ. – Вологда: изд. ВПИ, 1987. – 25 с.
19. Самойлович Ю.А., Седяко Д.Г., Малевич Ю.А. Определение оптимальных режимов охлаждения заготовок при непрерывном литье // Изв. вуз. Черная металлургия. 1989. № 8. С. 103 – 106.
20. Нисковских В.М. Создание высокопроизводительных слобовых МНЛЗ / Автореферат дисс. ... канд. техн. наук: Свердловск, 1981. – 18 с.
21. Drazin P.G., Riley N. The Navier-Stokes equations: a classification of flows and exact solutions. London Mathematical Society Lecture Note Series. Vol. 334. – Cambridge University Press, 2006. – 206 p.

Поступила в редакцию 25 декабря 2018 г.

После доработки 7 февраля 2019 г.

Принята к публикации 5 марта 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 10, pp. 747–755.

NUMERICAL MODELLING OF METAL FILLING IN CCM MOLD COMPLETED WITH DEFLECTOR

V.I. Odínokov¹, A.I. Evstigneev^{1,2}, E.A. Dmitriev¹

¹Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory, Russia

²Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering Far-Eastern Branch of RAS, Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory, Russia

Abstract. Flow of molten metal to the mold of continuous casting machine (CCM) is an insufficiently studied process up to the present day. This paper is a continuation of author's works published in scientific serials last years. It shows the possibility of a theoretical research of motion kinetics and thermal flows of molten metal in the mold during traditional casting by using hydrodynamic theory and mathematical physics equations and a proven numerical approach. This familiar calculation methodology makes it possible to calculate flows of molten metal motions and their temperatures in the mold and to compare the obtained results with ones obtained during usage of other methods of metal pouring including proposed method. This paper describes and solves three-dimensional problem of determination of velocity and temperature fields in metal poured to CCM mold from the submerged nozzle to the round deflector. In addition, the calculation methodology described in previous works of the authors is used, namely, the constitutive equation system, numeric method, numerical scheme and algorithm for solving the problem. Hardened metal crust forming on the mold faces was not considered in this calculation. For the results objective analysis of the problem solving in two ways (traditional and proposed), the same theoretical (speed of pulling-out from crystallizer) and geometrical parameters of rectangular cross-section mold were taken. Application for an invention for the described alternative method of liquid metal supplying to rectangular mold was registered (No. 2018108974/02 (013808)). The article contains some results of numerical solution of the problem in particular schemes of molten metal flows and their temperatures over different sections of the mold.

Keywords: numeric modeling, mold, deflector, melt flows, flow velocity, melt temperature.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-747-755

REFERENCES

1. Eastman C.M., Glaws P.C. Steel quality improvements with vertical continuous casting at faircrest steel plant. *ASTM Special Technical Publication*. 2017, vol. STP 1600, pp. 1–22.
2. Ho K., Pehlke R. Modelling of steel solidification using the general finite difference method. *Warrendale*. 1986, vol. 6, pp. 853–866.
3. Ozava M., Okano S., Matsuno J. Influence des conditions du jet de coulée sur la formation de la peau solidifiée eu lingotière de brames de coulée continue. *Tensu to Hagane*. 1976, vol. 62, no. 4, pp. 86. (In Fr.).
4. Larreq M., Sagues C., Wanin M. Vodele mathematique de la solidification eu coulée continue tenant compte de la convection al'interface solide-liquide. *Revue de metallurgie*. 1978, vol. 75, no. 6, pp. 337–352. (In Fr.).
5. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V., Smirnov A.P. *Proizvodstvo stali. T. 4. Nepreryvnaya razlivka metalla* [Steel production. Vol. 4. Continuous metal casting]. Moscow: Teplotekhnik, 2008, 528 p. (In Russ.).
6. Efimov V.A. *Razlivka i kristallizatsiya stali* [Casting and crystallization of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 552 p. (In Russ.).
7. *Intern. Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. October 25-28, 1994. Nagoya, Japan: ISIJ*, 1994, 580 p.
8. Odínokov V.I., Dmitriev V.A., Evstigneev A.I. Numerical modeling of the process of filling the CCM mold with metal. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 6, pp. 493–499. (In Russ.).
9. Stulov V.V., Matysik V.A., Novikov T.V., Shcherbakov S.V., Chistyakov I.V., Plotnikov A.P. *Razrabotka novogo sposoba razlivki slyabovykh zagotovok na MLNZ* [Development of a new method of casting slab blanks on CCM]. Vladivostok: Dal'nauka, 2008, 156 p. (In Russ.).
10. Odínokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I. Mathematical modeling of metal flow in crystallizer at its supply from submersible nozzle with eccentric holes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 8, pp. 606–612. (In Russ.).
11. Dauby P., Kunstreich S. Application of micro-refrigerators as the active element on the crystallization of metall. *ISS Tech*. 2003, pp. 491–504.
12. Wolf M. Application of micro-refrigerators. *Iron and Steel Intern*. 1995, no. 9, pp. 36–37.
13. Kohn A., Morillon Y. Etnde mathematique de la solidification des lingots en acier midur. *Revue de Metallurgie*. 1966, vol. 63, no. 10, pp. 779–790. (In Fr.).
14. Mizikar E. Mathematical heat transfer model for solidification of continuous cast steel slabs. *Trans. of the Metallurgical Society of AIME*. 1967, vol. 239, no. 11, pp. 1747.
15. Szekely J., Stanek V. On heat transfer and liquid mixing in the continuous casting of steel. *Metallurgical Transactions*. 1970, vol. 1, no. 1, pp. 119–126.
16. Kabakov Z.K., Kilimnik I.A., Samoilovich Yu.A. Mathematical modeling of thermal processes in hardening ingot with mixing of the liquid core. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1989, no. 2, pp. 115–119. (In Russ.).
17. Soboлев V.V., Trefilov P.M. *Optimizatsiya teplovykh rezhimov zatverdevaniya rasplava* [Optimization of thermal modes of melt solidification]. Krasnoyarsk: izd. KGU, 1986, 152 p. (In Russ.).
18. Kalugin Yu.A., Sorokin S.V. *Issledovanie teploobmena v kanalakh okhlazhdeniya kristallizatora MNLZ* [The study of heat transfer in cooling channels of CCM]. Vologda: izd. VPI, 1987, 25 p. (In Russ.).
19. Samoilovich Yu.A., Sedyako D.G., Malevich Yu.A. Determination of optimal cooling modes for billets in continuous casting.

Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 1989, no. 8, pp. 103–106. (In Russ.).

20. Niskovskikh V.M. *Sozdanie vysokoproizvoditel'nykh slyabovykh MNLZ: avtoreferat diss. ... kand. tekhn. nauk* [Creation of high-performance slab CCM: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Sverdlovsk, 1981, 18 p. (In Russ.).
21. Drazin P.G., Riley N. *The Navier-Stokes equations: a classification of flows and exact solutions*. London Mathematical Society Lecture Note Series. Vol. 334. Cambridge University Press, 2006, 206 p.

Acknowledgements. Processing of numerical results was performed by A.I. Gornakov, Cand. Sci. (Eng.).

Information about the authors:

V.I. Odinkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor-Consultant of the Chair "Mechanical Engineering and Metallurgy" (odinokov@uralweb.ru)

A.I. Evstigneev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector for Research and Innovation (diss@knastu.ru)

E.A. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Rector (rector@knastu.ru)

Received December 25, 2018

Revised February 7, 2018

Accepted March 5, 2018
