



The mathematical model for calculations of nonmetallic impurities guidepath in system "steel ladle-pony ladle-crystallizer" is developed. Guidepathes of nonmetallic particles of different density, moving from steel ladle into crystallizer, are investigated on the sample of internal cavity of pony ladle of MNLZ RUP "BMZ".

А. Н. ЧИЧКО, Д. М. КУКУЙ, В. Ф. СОБОЛЕВ, С. Г. ЛИХОУЗОВ, БНТУ, М. Е. КОНТАНИСТОВ, В. В. ПИВЦАЕВ, А. В. ДЕМИН, О. П. КРАСЮК, РУП «БМЗ»

УДК 669.27:519

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ МНЛЗ

Известно, что качество слитка зависит от уровня неметаллических включений, которые могут попадать из стальной ковша и образовываться при движении металла в проковше. Многочисленными работами было показано, что течение стали в промежуточном ковше оказывает значительное влияние на конечную чистоту слитка. Как известно, одной из функций промежуточного ковша при непрерывной разливке стали является улавливание неметаллических включений, которые существенным образом влияют на свойства кристаллизующегося слитка. Для борьбы с неметаллическими включениями изменяют внутреннюю геометрию ковша, используя различные перегородки, что позволяет изменять характер поля скоростей. В основном работы по этому вопросу связаны с проведением натурных или промышленных испытаний. В то же время чистое экспериментирование не позволяет выбрать оптимальные решения по конструкции промежуточного ковша и является трудоемким технологическим процессом. Сокращение сроков разработки технологических решений возможно при использовании компьютерных технологий.

Цель работы – разработка математических моделей процесса движения неметаллических включений в промежуточном ковше, используемом для разливки сталей в МНЛЗ.

Известно, что рассмотрение течения жидкостей в сложных каналах переменного сечения является сложнейшей математической задачей. Поэтому ее применение к промышленным процессам основано на значительном количестве допущений, которые часто не позволяют учитывать реальные особенности процесса и сводят на нет сущность решаемой задачи. Например, многие работы по те-

чению жидкости, использующие прикладную направленность, основываются на одно- и двухмерных уравнениях течения. Ниже приведена одна из таких моделей, описывающих движение расплава в каналах [1, 2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} k\omega\tilde{\rho} \frac{\partial t}{\partial y} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), y > 0, \\ q_x(y) = \sqrt{\frac{\lambda_i}{\lambda_\delta}} \alpha_{\delta 1} (t(y) - t_n), \\ q_x(y) = \alpha_{31} (t(y) - t_\zeta), \\ \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \\ \left. \frac{\partial t}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \\ k = \begin{cases} k_i, & \text{àñèè } 0 < y < y_1, \\ N, & \text{àñèè } y > y_1, \end{cases} \\ t|_{y=0} = t_{\text{çàè}} \equiv \text{const}, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_p c_p \frac{\partial t}{\partial z} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right), z > 0, \\ q_x(z) = \sqrt{\frac{\lambda_i}{\lambda_\delta}} \alpha_{\delta 2} (t(z) - t_n), \\ q_y(z) = \alpha_{32} (t(z) - t_3), \\ \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \\ \left. \frac{\partial t}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \\ t|_{y>0; z=0} = t_{\text{ïè}}, \\ t_3 \equiv \text{const}, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$t_{\text{нн}} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau} t d\tau}{\int_{\tau_1}^{\tau} d\tau}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} K_{\text{нн}} \geq 1, \\ K \leq K_{\text{о}}, \\ K_{\text{оэ}} < 1, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \omega_{\delta}}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{ф1}}$ и $\alpha_{\text{ф2}}$ – коэффициенты теплоотдачи от потока металла в форму при течении; α_{31} и α_{32} – коэффициенты теплоотдачи от потока металла в застойную зону при проточном и поперечном течении; x, y, z – пространственные координаты; t – температура; ρ – плотность жидкого металла; c – удельная теплоемкость расплава; ω – скорость течения расплава в полости формы; λ – коэффициент теплопроводности расплава; $\lambda_{\text{п}}, \lambda_{\text{ф}}$ – коэффициенты теплопроводности покрытия и формы; k – критерий продольного массообмена; q – плотность теплового потока; $K_{\text{св}}$ – критерий литейной сварки потока; K – критерий качества отливки; $K_{\text{ш}}$ – критерий шлакообразования; $K_{\text{уж}}$ – критерий образования ужимин.

Как видно из представленной модели, процесс движения расплава рассматривается в двухмерном случае. Причем многие коэффициенты, входящие в модель, трудно определимы на практике и поэтому применимость такого типа моделей к реальным процессам движения расплава весьма затруднительна. Не останавливаясь подробно на этих моделях, следует отметить, что до недавнего времени и на момент начала выполнения данной работы, модели в трехмерной постановке, решаемые численными методами, еще были недостаточно развиты. Наибольшее развитие они получили с появлением систем автоматизированного моделирования.

В основе метода моделирования, разрабатываемого в работе, лежит идея расщепления системы дифференциальных уравнений, составляющих модель полного процесса, по элементарным физическим процессам. При этом моделируемая среда, являющаяся расплавом, заменяется системой жидких элементарных частиц, в основе которой лежит ячейка эйлеровой сетки. Процесс компьютерных вычислений движения расплава состоит из много-

кратного повторения шагов по времени, который может быть разбит на три этапа.

I этап (эйлеров) состоит в пренебрежении эффектами, связанными с перемещением расплава (потока массы через границы ячеек нет); на этом этапе на фиксированной эйлеровой сетке определяются промежуточные значения искомым параметров скоростного потока;

II этап (лагранжев): вычисляется плотность потока массы при движении жидкости через границы эйлеровых ячеек;

III этап (заключительный): определяются окончательные значения параметров скоростного потока на основе законов сохранения массы, импульса и энергии для каждой ячейки рассматриваемой области течения.

Основные этапы в методе, развиваемом в работе, соответствуют идее расщепления решений. Следует отметить, что для каждого из этапов разработаны свои вычислительные схемы, отличные от известных. Поэтому, как это и принято в методе частиц, на первом этапе рассматривается изменение за время Δt импульса и энергии лагранжева элементарного объема жидкости (крупной частицы), заключенного внутри эйлеровой ячейки (при этом граница объема смещается относительно начального расположения). На втором этапе моделируется движение частиц через границы эйлеровых ячеек и происходит перераспределение массы, импульса и энергии по пространству. На третьем этапе происходит перераспределение массы, импульса и энергии по пространству (здесь определяется за время Δt изменение параметров потока в элементарной эйлеровой ячейке, полученной возвращением лагранжева объема в исходное положение). Расчет проводится в локально-лагранжевых координатах с последующим пересчетом (интерполяцией) на эйлерову расчетную сетку.

Таким образом, моделирование эволюции всей системы элементов за время Δt состоит из следующих этапов: 1) моделирование изменения внутреннего состояния подсистем, находящихся в ячейках, в предположении их неподвижности (эйлеров этап); 2) моделирование смещения всех частиц пропорционально их скорости и времени Δt без изменения внутреннего состояния подсистемы (лагранжев этап); 3) моделирование динамики частиц с последующим пересчетом расчетной сетки в начальное состояние (заклучительный этап).

Для математического описания течения жидкости была использована система уравнений Навье–Стокса, представляющая собой закон количества движения (импульса):

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + U \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + V \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) &= \rho g - \frac{\partial P}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial W}{\partial t} + V \frac{\partial W}{\partial x} + U \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Для полноты описания процесса течения дополнительно использовали уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) = 0, \quad (7)$$

где V – проекция скорости на ось X ; U – проекция скорости на ось Y ; W – проекция скорости на ось Z ; g – ускорение свободного падения; ρ и η – плотность и динамическая вязкость жидкости (расплава); t – время; P – давление в рассматриваемой точке потока.

Для учета процесса охлаждения потока описанные выше системы дополняли уравнением теплообмена Фурье–Кирхгофа:

$$\begin{aligned} c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial x} + U \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \\ \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q(x, y, z, T). \end{aligned} \quad (8)$$

Теплообмен на поверхности твердого тела с жидкостью описывался как:

$$\alpha \Delta T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (9)$$

где ρ – плотность жидкости (расплава); t – время; T – температура в рассматриваемой точке потока

$$\begin{aligned} V_x(\Omega_1) = 0, V_y(\Omega_1) = 0, V_z(\Omega_1) = 0, \rho(\Omega_1) = \rho_0(\Omega_1), P(\Omega_1) = 0, T(\Omega_1) = T_{\text{зал}}, \\ V_x(\Omega_2) = 0, V_y(\Omega_2) = 0, V_z(\Omega_2) = 0, \rho(\Omega_2) = \rho_0(\Omega_2), P(\Omega_2) = 0, T(\Omega_2) = T_2, \\ V_x(\Omega_3) = 0, V_y(\Omega_3) = 0, V_z(\Omega_3) = 0, \rho(\Omega_3) = \rho_0(\Omega_3), P(\Omega_3) = 0, T(\Omega_3) = T_3, \\ V_x(\Omega_4) = 0, V_y(\Omega_4) = 0, V_z(\Omega_4) = 0, \rho(\Omega_4) = \rho_0(\Omega_1), P(\Omega_4) = 0, T(\Omega_4) = T(\Omega_1), \\ V_x(\Omega_5) = 0, V_y(\Omega_5) = 0, V_z(\Omega_5) = 0, \rho(\Omega_5) = \rho_0(\Omega_1), P(\Omega_5) = 0, T(\Omega_5) = T_{\text{зал}}, \\ V_x(\Omega_6) = 0, V_y(\Omega_6) = 0, V_z(\Omega_6) = 0, \rho(\Omega_6) = \rho_0(\Omega_2), P(\Omega_6) = 0, T(\Omega_6) = T_6. \end{aligned} \quad (10)$$

При $t \neq 0$ используются граничные условия:

$$\begin{aligned} V_x(\Omega_1) = V_x(\Omega_{1n}), V_y(\Omega_1) = V_y(\Omega_{1n}), V_z(\Omega_1) = V_z(\Omega_{1n}), \rho(\Omega_1) = \rho(\Omega_{1n}), \\ P(\Omega_1) = P(\Omega_{1n}), T(\Omega_1) = T(\Omega_{1n}), V_x(\Omega_2) = 0, V_y(\Omega_2) = 0, V_z(\Omega_2) = 0, \\ \rho(\Omega_2) = \rho_0(\Omega_2), P(\Omega_2) = P(\Omega_1), T(\Omega_2) = T(\Omega_{2n}), V_x(\Omega_3) = V_x(\Omega_1), \\ V_y(\Omega_3) = V_y(\Omega_1), V_z(\Omega_3) = V_z(\Omega_1), \rho(\Omega_3) = \rho(\Omega_{3n}), P(\Omega_3) = 0, T(\Omega_3) = T(\Omega_{3n}), \\ V_x(\Omega_4) = -V_x(\Omega_1), V_y(\Omega_4) = V_y(\Omega_1), V_z(\Omega_4) = V_z(\Omega_1), \rho(\Omega_4) = \rho(\Omega_1), \\ P(\Omega_4) = P(\Omega_1), T(\Omega_4) = T(\Omega_1), \text{ если граница перпендикулярна оси } X, \\ V_x(\Omega_4) = V_x(\Omega_1), V_y(\Omega_4) = -V_y(\Omega_1), V_z(\Omega_4) = V_z(\Omega_1), \rho(\Omega_4) = \rho(\Omega_1), \\ P(\Omega_4) = P(\Omega_1), T(\Omega_4) = T(\Omega_1), \text{ если граница перпендикулярна оси } Y, \\ V_x(\Omega_4) = V_x(\Omega_1), V_y(\Omega_4) = V_y(\Omega_1), V_z(\Omega_4) = -V_z(\Omega_1), \rho(\Omega_4) = \rho(\Omega_1), \\ P(\Omega_4) = P(\Omega_1), T(\Omega_4) = T(\Omega_1), \text{ если граница перпендикулярна оси } Z. \end{aligned}$$

(x, y, z) ; λ и c – теплопроводность и теплоемкость жидкости; α – коэффициент теплоотдачи на граничной поверхности.

При расчете процесса изменения импульса и энергии элементарного объема жидкости, заключенного внутри эйлеровой ячейки, за время Δt используется пространственная схема (рис. 1).

Реализацию системы уравнений Навье–Стокса (6) проводили по конечно-разностным аппроксимациям первого порядка точности по времени и второго порядка точности по пространству. Важным этапом вычислений является определение начальных и граничных условий. Чтобы не нарушать единообразия вычислений и не применять особые формулы для граничных ячеек, вдоль всех границ вводятся слои фиктивных ячеек, значения параметров в которых определяются типом границы. Число таких слоев определяется типом границы и порядком разностного уравнения (для первого порядка, например, один слой и т. д.). Введем следующие обозначения областей рассчитываемых сеточных пространств, участвующих в процессе моделирования: Ω_1 – стальной поток; Ω_2 – промежуточный ковш; Ω_3 – воздух; Ω_4 – ось симметрии; Ω_5 – источник течения ($\rho(\Omega_5) = \text{const}$; $T(\Omega_5) = \text{const}$); Ω_6 – граница первого рода ($T(\Omega_6) = \text{const}$). В методе использованы следующие начальные условия для $t = 0$:

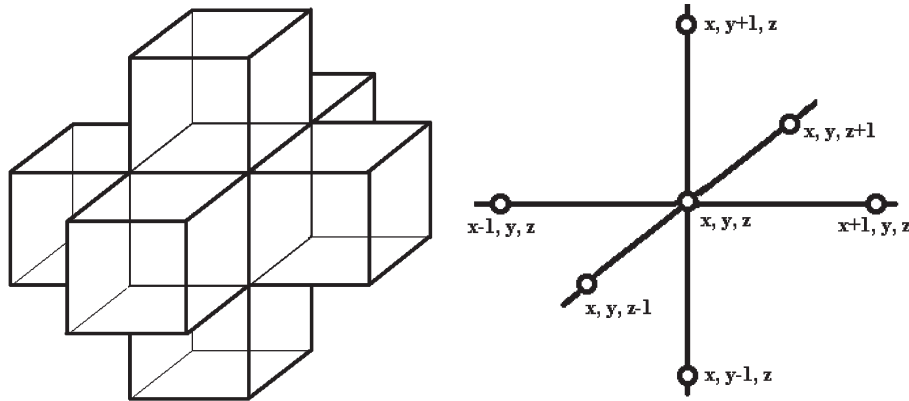


Рис. 1. Структура ячеек при конечно-разностной аппроксимации

$$\begin{aligned}
 V_x(\Omega_5) &= V_x(\Omega_{5n}), V_y(\Omega_5) = V_y(\Omega_{5n}), V_z(\Omega_5) = V_z(\Omega_{5n}), \rho(\Omega_5) = \rho_0(\Omega_1), \\
 P(\Omega_5) &= 0, T(\Omega_5) = T_{\text{зал}}, V_x(\Omega_6) = 0, V_y(\Omega_6) = 0, V_z(\Omega_6) = 0, \\
 \rho(\Omega_6) &= \rho_0(\Omega_2), P(\Omega_6) = 0, T(\Omega_6) = T_6.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Алгоритм моделирования движущегося расплава в промежуточном ковше

Пространство моделирования представляет собой трехмерный массив ячеек с размерами $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ и координатами (i, j, k) , где $i = 0, \dots, I$ – номер ячейки вдоль координатной оси X ; $j = 0, \dots, J$ – номер ячейки вдоль координатной оси Y ; $k = 0, \dots, K$ – номер ячейки вдоль координатной оси Z . Состояние каждой ячейки описывается величинами $V_x, V_y, V_z, \rho, P, T$.

Алгоритм численного моделирования процесса течения

Шаг 0. Задание начальных значений параметров состояния каждой ячейки в соответствии с конфигурацией отливки и начальными условиями. Время расчета t устанавливается в 0, а шаг расчета для течения жидкости определяется, как константа для первых десяти шагов расчета $\tau_V = \tau_{VKP}$. Шаг расчета для теплообмена в k_T раз больше шага расчета для течения $\tau_T = k_T \tau_V$.

Шаг 1. Если $t \leq \tau_{VKP}$, то $\tau_V = \tau_{VKP}$, иначе, шаг расчета по времени для течения жидкости τ_V определяется из критерия устойчивости для течения жидкости. Шаг расчета для теплообмена в k_T раз больше шага расчета для течения $\tau_T = k_T \tau_V$.

Шаг 2. Для всего пространства расчета $(0, \dots, I, 0, \dots, J, 0, \dots, K)$ выполняются следующие операции для вычисления движения жидкости:

- по формулам определяются значения проекций скорости на оси координат $V_x^{n+1}, V_y^{n+1}, V_z^{n+1}$;
- если существует ось симметрии, то происходит замена проекций скоростей в соответствии с граничными условиями;
- по формулам вычисляются перенос вещества и перераспределение проекций скоростей на

оси координат $V_x^{n+1}, V_y^{n+1}, V_z^{n+1}$ и температур T^{n+1} в ячейках;

- просматриваются все границы жидкость–воздух и переопределяются значения ячеек воздуха, если их значение плотности равно плотности жидкости, в этом случае ячейка воздуха становится ячейкой жидкости;
- для новых значений плотностей в ячейках рассчитываются значения давлений в ячейках;
- если существует ось симметрии, то происходит замена проекций скоростей в соответствии с граничными условиями.

Шаг 3. Если выполнено k_T расчетов для определения движения жидкости, то для всего пространства расчета $(0, \dots, I, 0, \dots, J, 0, \dots, K)$ выполняются следующие операции для вычисления теплообмена:

- если $T_{\text{liq}} < T^{n+1}$, т. е. не идет процесс кристаллизации, значение T^{n+1} вычисляется по рекуррентной формуле;
- если $T_{\text{liq}} > T^{n+1} > T_{\text{sol}}$, т. е. идет процесс кристаллизации, значение T^{n+1} вычисляется по рекуррентной формуле с учетом теплоты кристаллизации;
- если существует ось симметрии, то происходит замена температур в соответствии с граничным условием (11).

Шаг 4. Значение времени расчета увеличивается $t = t + \tau_V$.

Шаг 5. Если в пространстве моделирования существуют области, незаполненные жидкостью $t \leq t_{\text{зал}}$, то выполняется переход на Шаг 1, иначе, конец расчета и окончательное формирование масивов по температурам, скоростям и другим характеристикам.

Анализ литературных данных по неметаллическим включениям, попадающим в заготовку МНЛЗ, показывает, что существуют три группы частиц, которые могут быть причиной дефектов. Первую группу составляют частицы, образующиеся в процессе раскисления в ковше и движущиеся по линиям скоростного тока при перемещении от шибера стальной ковша к внутренней поверхности промежуточного ковша. Чтобы попасть в кристаллизатор, эти частицы должны иметь большие силы сцепления с жидкой сталью при плотностях порядка 2700–4000 кг/м³. Фактически на эти частицы действуют три силы: силы, вызываемые полем скоростей расплава, силы Архимеда и силы механического взаимодействия на границе «частица–расплав», которые связаны с силой трения. Вторая группа частиц образуется при взаимодействии жидкой стали с футеровкой ковша и движение этих частиц подвержено скоростному полю. Третья группа частиц образуется в результате химических реакций, протекающих в расплаве. Эти частицы имеют малые размеры и они также могут проникать в заготовку, являясь причиной брака по неметаллическим включениям.

На рис. 2 показан чертеж промежуточного ковша, используемого на МНЛЗ-1 РУП «БМЗ». Как видно из рисунка, в промежуточном ковше имеется шесть отверстий, через которые металл попадает в кристаллизатор. Диаметр этого отверстия

определяется дозатором и для промоделированного случая составляет 15 мм. Конструкция входного отверстия представляет собой шайбу, выступающую на 50 мм над нижней кромкой промежуточного ковша с отверстием посередине, через которое металл поступает в кристаллизатор. Конструкция ковша выполнена таким образом, что при поступлении в ковш металл попадает в колодец диаметром 300 мм и высотой 170 мм. Этот колодец частично гасит кинетическую энергию потока, снижая скорость и завихрения потока при его распространении внутри промежуточного ковша.

На рис. 3 показаны этапы моделирования процесса заполнения промежуточного ковша и его переходы в кристаллизаторы. На первом этапе с помощью системы SolidWorks была построена пространственная конфигурация промежуточного ковша МНЛЗ-1. На втором этапе промежуточный ковш разбивался на сеточную структуру дискретностью 15×15×15 мм. На третьем этапе задавались начальные условия по скорости расплава, граничные условия по скоростям были приняты равными 0 на стенках ковша. Для давлений, участвующих в расчете, было равенство давления на подающей и отражающей поверхностях. На основе этих данных, используя модели приведенные выше, были проведены расчеты динамики поля скоростей в каждом из сеточных элементов. На следующем этапе, предполагая поле скоростей фиксирован-

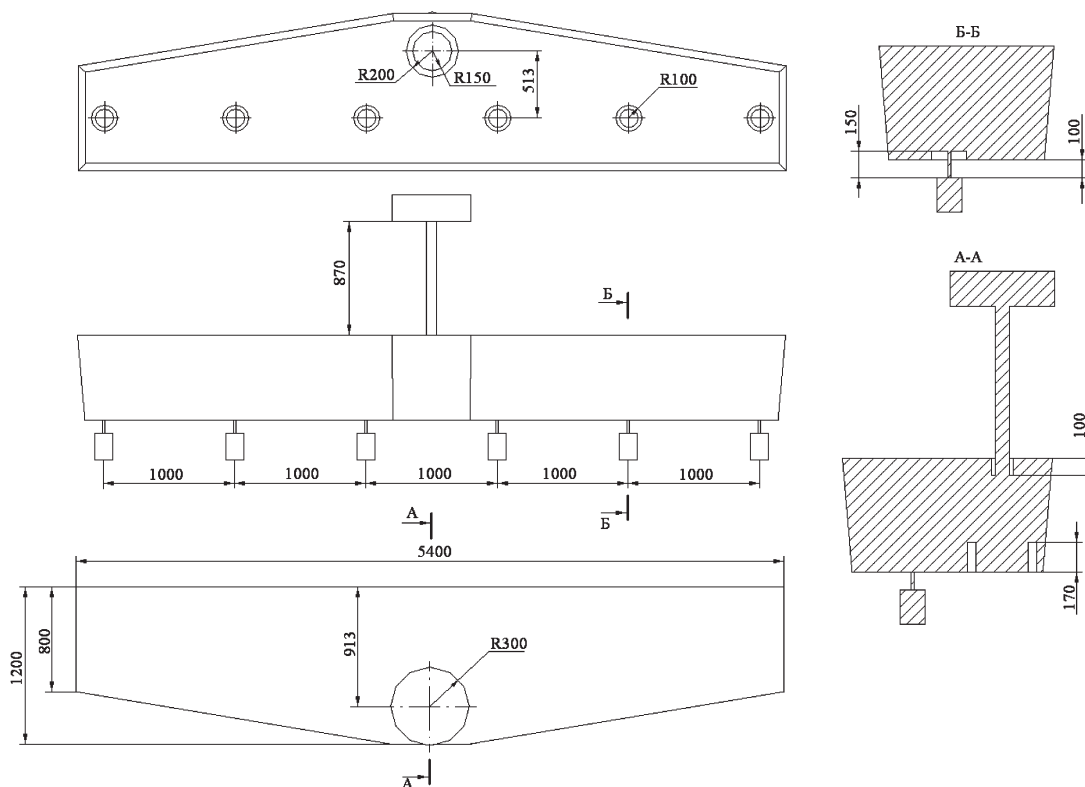


Рис. 2. Чертеж промежуточного ковша МНЛЗ-1

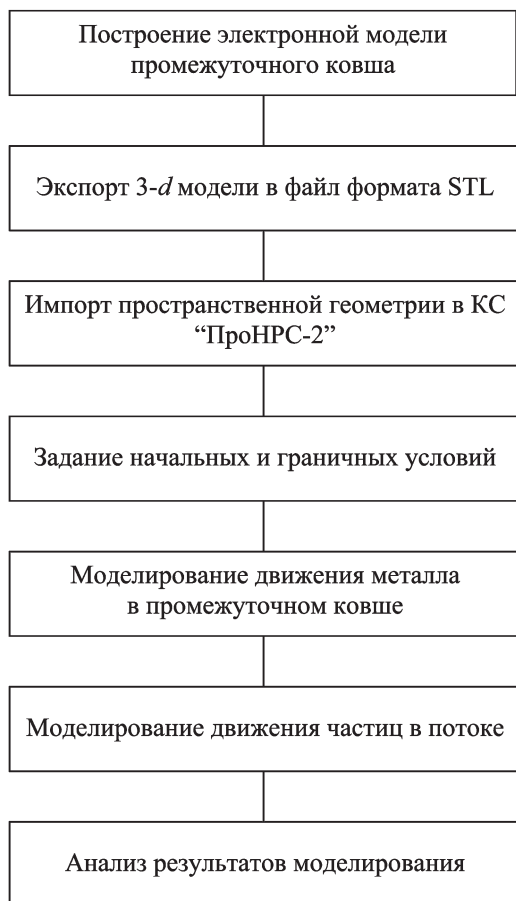


Рис. 3. Этапы моделирования процесса заполнения промежуточного ковша и движения в нем частиц

ным, были запущены виртуальные треки предполагаемых частиц различной плотности, по которым проводили анализ динамики скоростных потоков и возможных турбулентных областей.

Моделирование поля скоростей промежуточного ковша

Таким образом, геометрическая форма промежуточного ковша была получена в чертежах, которые были переведены в электронную форму. На основе этой формы была создана пространственная трехмерная твердотельная модель (рис. 4).

При проведении расчетов использовали программу «ПроНПС-2», разработанную по моделям, представленным выше. Компьютерная система «ПроНПС-2» позволила виртуально запускать произвольное количество частиц в любом месте моделируемого объекта и визуально отображать траектории их движения до момента всплытия частицы или же ее ухода в кристаллизатор. Вся траектория движения частицы проектируется на сечение промежуточного ковша, для которого отображено поле скоростей, и рисуется белым цветом, таким образом, появляется возможность видеть группу траекторий движения частиц, соотнося их со значениями скоростей потока. Открыв несколько

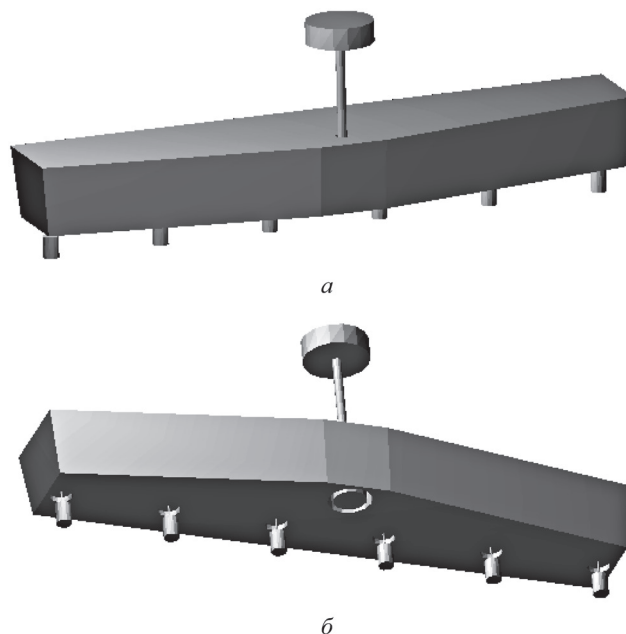


Рис. 4. Исходная STL-модель промковша МНЛЗ-1

вертикальных и горизонтальных сечений, можно исследовать характер движения частиц в пространстве промежуточного ковша.

На этапе моделирования движения металла были проведены расчеты динамического поля скоростей. По полю скоростей определяли динамику процесса заполнения промежуточного ковша металлом. Результаты моделирования процесса заполнения промежуточного ковша приведены на рис. 5–8.

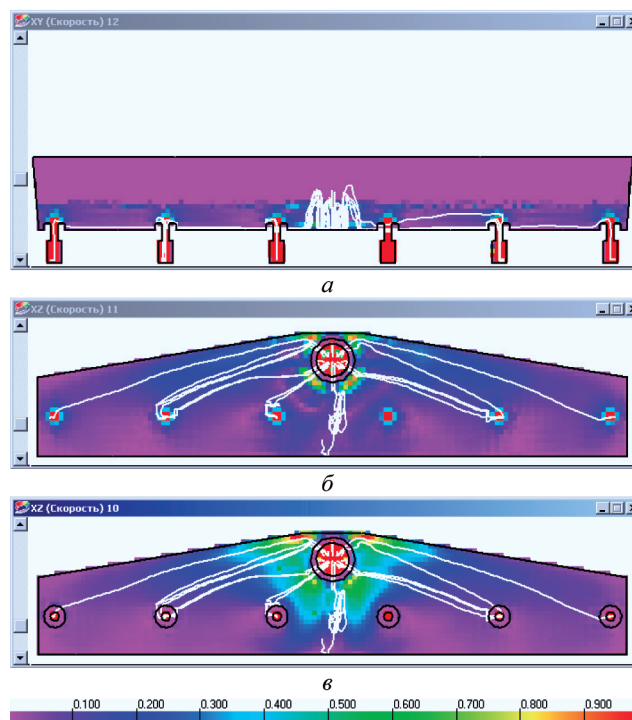


Рис. 5. Траектории движения тяжелых частиц (4000 кг/м³) в промковше в момент времени 180 с: а – в сечении дозаторов; б – в сечении на расстоянии 70 мм от нижней поверхности; в – в сечении на расстоянии 40 мм от нижней поверхности

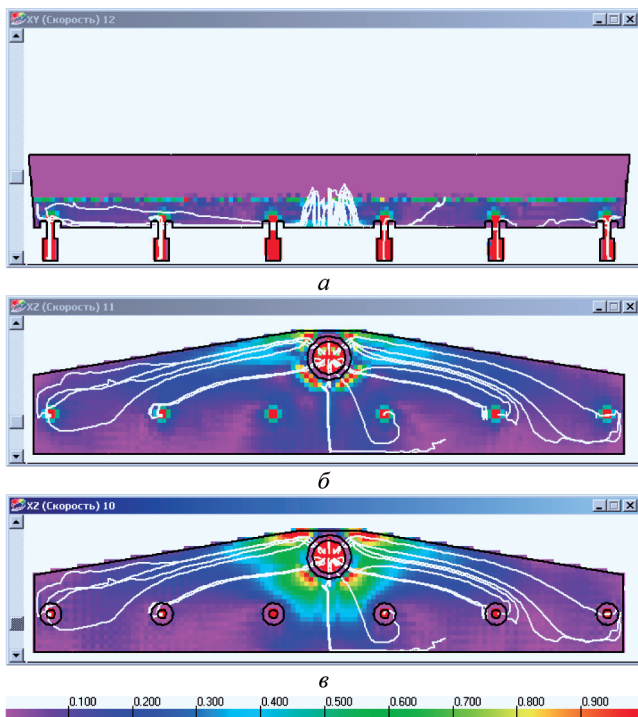


Рис. 6. Траектории движения тяжелых частиц (4000 кг/м^3) в проковше в момент времени 540 с: *a* – в сечении дозаторов; *б* – в сечении на расстоянии 70 мм от нижней поверхности; *в* – в сечении на расстоянии 40 мм от нижней поверхности

При отображении скоростных полей применялась шкала: красный цвет на шкале скоростей соответствует максимальной скорости, фиолетовый – минимальной. Остальные цвета соответствуют промежуточным скоростям. Как видно из рис. 5, поле скоростей промежуточного ковша неоднородно. Наибольшие скорости достигают порядка 1 м/с в области колодца, куда металл попадает со скоростями свыше 3 м/с из стальной ковша. Эта область подвергается наибольшему механическому и термическому воздействию, которые могут приводить к сильному износу материалов промежуточного ковша, результатом чего становится образование неметаллических включений движущихся по линиям максимальных скоростей к областям дозаторов, где они засасываются потоком и уходят в кристаллизатор, приводя к образованию дефектов слитка. По мере удаления от области попадания первых порций металла скорости уменьшаются до 0,5–0,7 м/с, а в удаленных частях промежуточного ковша не превышают 0,2 м/с. На рис. 6 показаны поля скоростей в момент времени 540 с. Из рисунка видно, что характер скоростных полей аналогичен моменту времени 180 с, однако существуют некоторые различия как в числовых значениях скоростей, так и в характере завихрений, например, в районе ручьев 3 и 4, которые существенно влияют на движение неметаллических включений. Анализ всех шести ручьев показал, что в

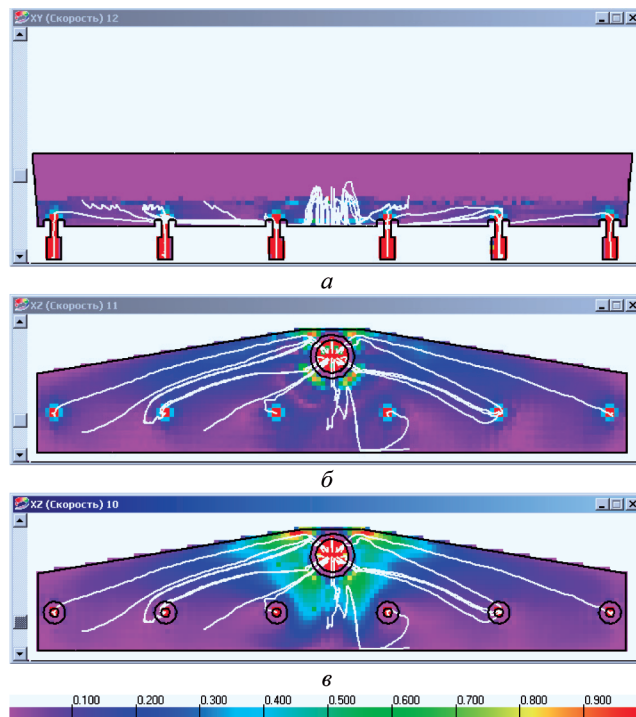


Рис. 7. Траектории движения легких частиц (2700 кг/м^3) в проковше в момент времени 180 с: *a* – в сечении дозаторов; *б* – в сечении на расстоянии 70 мм от нижней поверхности; *в* – в сечении на расстоянии 40 мм от нижней поверхности

каждом из них наблюдается свой характер движения скоростей.

В дальнейшем речь пойдет о двух типах частиц – наиболее тяжелых и наиболее легких, которые в зависимости от плотности могут менять траекторию своего движения. Для характеристики легких и тяжелых частиц выбраны крайние точки для интервала плотностей $2700\text{--}4000 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 5, 6 показан характер движения тяжелых частиц в потоке для характерных сечений – это вертикальное сечение в области дозаторов и два горизонтальных сечения в области входа металла в дозатор. Сравнивая траектории движения частиц в различные моменты времени, можно отметить высокую вероятность попадания частиц в кристаллизатор, так как практически все запущенные частицы попали в кристаллизаторы. Только кристаллизатор ручья 3 в момент времени 180 с и кристаллизатор ручья 4 в момент времени 540 с остались чистыми, что в то же время вряд ли говорит о их более выгодном расположении с точки зрения попадания неметаллических включений, поскольку в момент времени 360 с частицы попадают абсолютно во все кристаллизаторы. Анализ траекторий частиц в различные моменты времени выявляет их серьезные различия и, вероятно, говорит о нестационарности потока с точки зрения движения частиц, хотя по полям скоростей это различие визуально не было выявлено.

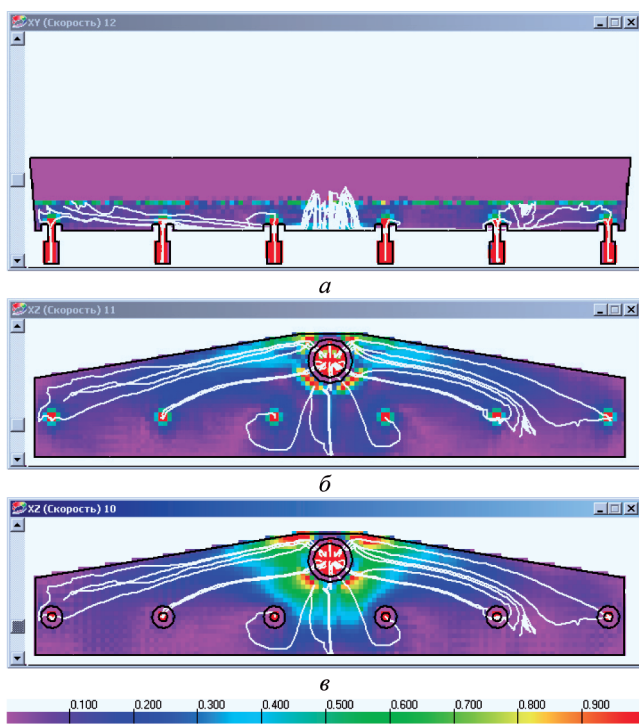


Рис. 8. Траектории движения легких частиц (2700 кг/м^3) в проковше в момент времени 540 с: *а* – в сечении дозаторов; *б* – в сечении на расстоянии 70 мм от нижней поверхности; *в* – в сечении на расстоянии 40 мм от нижней поверхности

На рис. 7, 8 показан характер движения легких частиц в потоке для характерных сечений. Сравнивая траектории движения частиц в различные моменты времени, можно, как и в случае с тяжелыми частицами, отметить высокую вероятность попадания частиц в кристаллизатор, большая часть запущенных частиц попала в кристаллизаторы. Однако для легких частиц количество всплывших частиц значительно увеличилось (9 легких частиц всплыло из 36 запущенных, против 4 тяжелых частиц из того же количества запущенных). Такой характер поведения частиц в потоке свидетель-

ствует о превалирующем влиянии скоростей и линий тока над значениями плотности частиц в диапазоне плотностей $2700\text{--}4000 \text{ кг/м}^3$. Рассмотрение траекторий движения легких частиц в различные моменты выявляет их схожесть с движением тяжелых частиц, однако следует отметить большую склонность легких частиц к движению по завихряющимся потокам. Так, из рис. 7 видно, что частицы в момент времени 180 с движутся по прямой траектории к дозаторам, однако существуют частицы в районе дозаторов ручьев 3 и 5, испытывающие сильные завихрения. По результатам моделирования было установлено, что частицы, движущиеся в районе дозаторов ручьев 2 и 4, попадают в завихряющийся поток и разворачиваются более чем на 180° прежде чем попасть в кристаллизатор. Из рис. 6, 7 видно, что существуют частицы с еще большим разворотным углом в районе дозаторов ручьев 2, 3 и 4.

В результате анализа скоростных полей и траекторий движения частиц плотностью $2700\text{--}4000 \text{ кг/м}^3$ в различные моменты времени установлено, что поле скоростей в промежуточном ковше нестационарно и зависит от уровня металла в ковше. Траектории частиц в нестационарном скоростном поле зависят от распределения поля скоростей стали. Выявлено превалирующее влияние скоростей и линий тока жидкой стали над значениями плотности частиц в диапазоне плотностей $2700\text{--}4000 \text{ кг/м}^3$. Существует возможность изменения линий тока путем установки сопротивлений в определенных расчетом местах.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса движения неметаллических включений в промежуточном ковше позволяет исследовать траектории движения неметаллических частиц различной плотности при их движении из промежуточного ковша в кристаллизатор.

Литература

1. Чистяков В. В. Методы подобия и размерностей в литейной гидравлике. М.: Машиностроение, 1990.
2. Галдин Н. М. Литниковые системы для отливок из легких сплавов. М.: Машиностроение, 1978.