

Академик НАН України В. Л. Найдек, Н. И. Тарасевич,
Б. С. Гончар, В. В. Белоусов, В. Ф. Комаров

Моделирование гидрогазодинамических процессов в полости промежуточного ковша машины непрерывной разливки стали

Сформульовано математичну модель і алгоритм її чисельної реалізації гідрогазодинамічних процесів трисекційного промковша з перегородками й проточними каналами в них. Модель може бути адаптована для ковшів будь-якої конфігурації проточних каналів і дозволяє врахувати різні кути введення розплаву в розливні секції. Крім того, можливе моделювання барботажу, варіювання інтенсивністю подачі газової фази як у розливній, так і в приймальній секціях промковша. Проведені дослідження дозволяють розробити методіку прогнозування гідрогазодинамічних процесів у розплаві з метою модернізації безперервного лиття сталі.

Промковш — неотъемлемый элемент машины непрерывного литья заготовок. В ходе разливки в нем осуществляется не только распределение потоков по ручьям машины непрерывного литья, но и удаление неметаллических включений на границе металл — шлак. С математической точки зрения внутреннее пространство промковша можно разделить фильтрационной перегородкой с системой переточных каналов на приемную и раздаточную секции (рис. 1) (соответствующие области ограниченного пространства) [1].

Процессы течения жидкого металла можно разбить на следующие этапы:

поступление жидкого металла сверху из сталеразливочного ковша и образование сложной вихревой структуры течения как в квазистационарном режиме непрерывного литья,

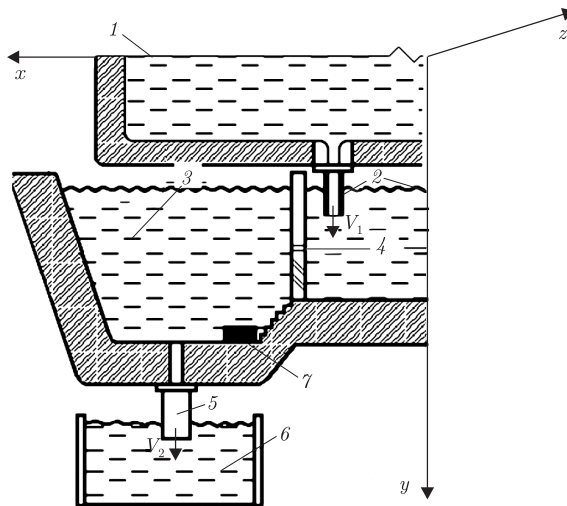


Рис. 1. Схема промковша: 1 — сталеразливочный ковш; 2 — приемная секция; 3 — раздаточная секция; 4 — фильтрационная перегородка с переточными каналами; 5 — разливочный стакан; 6 — кристаллизатор; 7 — кассета для ввода газа

так и нестационарном при наполнении ковша и выходе на стационарный режим, что имеет место про смене ковшей;

истечение расплава из приемной секции в раздаточную, где структура циркуляционных потоков зависит от геометрических параметров переточных каналов и динамических характеристик системы истекающих турбулентных струй;

интенсификация структуры течения жидкого металла под действием распределенных газовых струй.

Гидродинамические процессы, проходящие в рассматриваемых областях, описываются уравнениями Навье–Стокса и неразрывности Пуассона, которые в форме переменных вихрь ω — скорость \vec{V} для пространственной задачи записывается, соответственно, в виде [2, 3]:

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\omega} - (\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla \nu \nabla \vec{\omega} \quad (1)$$

и

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{V}. \quad (2)$$

В скалярной форме после преобразования уравнение (2) переписывается в виде

$$\nabla^2 u = \frac{\partial \omega_z}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial z}; \quad \nabla^2 v = \frac{\partial \omega_x}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial x}; \quad \nabla^2 w = \frac{\partial \omega_y}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial y}, \quad (3)$$

где $\vec{\omega} = \omega_x \vec{i} + \omega_y \vec{j} + \omega_z \vec{k}$, $\omega_x = \partial w / \partial y - \partial v / \partial z$, $\omega_y = \partial u / \partial z - \partial w / \partial x$, $\omega_z = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ — компоненты вихря скорости; u, v, w — компоненты скорости по координатам x, y и z соответственно; t — текущее время; ν — коэффициент эффективной вязкости, являющейся суммой кинематической и турбулентной вязкости (моделирование последней будет описано ниже).

Предложенная форма записи (вихрь ω — скорость V) системы уравнений (1), (2) имеет преимущества при решении пространственных задач по сравнению с методами в “простейших” переменных (V — скорость и P — давление) и вихрь ω — функция тока ψ .

Система уравнений (1), (2) дополняется начальными и граничными условиями.

Начальные — все компоненты скорости и вихря скорости равны нулю.

Граничные условия состоят из условий “непроницаемости” и “прилипания” на стенке.

При $y = y_0$ в плоскости (x, z) граничные условия записываются в виде

$$u = v = w = 0. \quad (4)$$

Вихрь скорости на этой плоскости равен:

$$\omega_y = 0, \quad \omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y}. \quad (5)$$

При $z = 0$, в зоне поступления металла:

$$u = V_m, \quad v = V_m, \quad w = 0, \quad (6)$$

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \omega_y = -\frac{\partial w}{\partial x}, \quad \omega_z = 0. \quad (7)$$

На выходных границах каналов для компонент скорости ставится граничное условие Неймана и Дирихле:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad v = w = 0. \quad (8)$$

Описывая гидродинамические процессы при динамическом воздействии на структуру течения распределенными газовыми струями, предполагаем, что в исследуемой зоне в процессе движения от места образования до поверхности не изменяются размеры и скорость движения газовых пузырьков

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \vec{V}_r \cdot \text{grad } \beta = f_\beta, \quad (9)$$

где β — содержание газовой фазы; \vec{V}_r — скорость ее движения.

При определении параметра f_β принимается во внимание, что вводимая в металл газовая струя дробится на пузырьки одинакового радиуса и это происходит в области объемом V_β . Тогда в точках, принадлежащих области V_β , выполняется соотношение

$$f_\beta = \frac{Q_V}{\rho_r \frac{4}{3} \pi R_0^3 V_\beta}. \quad (10)$$

Здесь Q_V — объемный расход газа; R_0 — начальный радиус пузырька. В точках, V_β не принадлежащих, $f_\beta = 0$.

Параметр, позволяющий учитывать разность скоростей жидкой V_{Mz} и газовой фаз V_{Gz} в уравнении Навье–Стокса, определяется по формуле [4]

$$f_V = \frac{3}{8} \frac{\beta \xi (V_{Gz} - V_{Mz})^2}{R_0}, \quad (11)$$

что позволяет представить уравнение Навье–Стокса следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\omega} - (\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla \nu \nabla \vec{\omega} + \frac{3}{8} \frac{\beta \xi (V_{Gz} - V_{Mz})^2}{R_0}, \quad (12)$$

где ξ — коэффициент гидравлического сопротивления пузыря.

Граничные условия для газовой фазы нулевые на стенках и равны скорости поступления газовой фазы в системе струй.

Для расчета турбулентной вязкости предлагается двухпараметрическая модель ($k - \varepsilon$) [5, 6]. В соответствии с этой моделью турбулентная вязкость определяется следующей зависимостью от величин кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε :

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^{-3/2}}{\varepsilon}. \quad (13)$$

Уравнения переноса для k и ε имеют вид

$$\frac{\partial k}{\partial t} + V_{Mx} \frac{\partial k}{\partial X} + V_{My} \frac{\partial k}{\partial Y} = \nabla \frac{\nu_T}{\sigma_k} \nabla k + G - \varepsilon; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial V_{Mx}}{\partial X} + \varepsilon \frac{\partial V_{My}}{\partial Y} = \frac{\nu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \Delta \varepsilon + C_1 \frac{\varepsilon \nu_T G}{k} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (15)$$

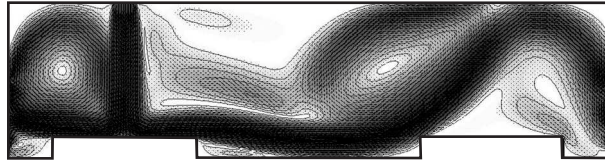


Рис. 2. Изолинии функции тока в полости приемной секции промковша

где C_μ , C_1 , C_2 , σ_ϵ , σ_k — константы турбулентности. В работе [7] даны значения констант и диапазоны их применения для турбулентных течений жидких металлов.

Для решения полученной системы уравнений, описывающей гидрогазодинамические процессы в ограниченном пространстве различных секций промковша МНЛЗ, использовались численные методы с дальнейшей их реализацией на персональном компьютере.

Разработанный пакет прикладных программ имеет дружественный интерфейс, дающий возможность визуализации входного и выходного потока данных.

В качестве примера использования разработанного программного продукта рассмотрим квазистационарные гидродинамические задачи, определяющие структуру течений в приемной и раздаточной секциях промковша МНЛЗ, а также особенности воздействия распределенных газовых струй на циркуляционные потоки в ограниченном пространстве раздаточной секции.

На рис. 2 представлены линии тока в центральном сечении приемной секции промковша. Полученные результаты показывают наличие существенных неоднородностей гидродинамической структуры течений при несимметричной подаче струи металла, истекающей из сталеразливочного ковша, относительно фильтрационных перегородок. Приведенные данные позволяют установить, например, место ввода активных рафинирующих реагентов.

Для изучения гидродинамических процессов в зоне 3 промковша приняты следующие исходные данные: учитывая малую толщину стенок перегородки между секциями, скорости расплава, поступающего из приемной секции в каналы перегородки и истекающего из каналов в раздаточной секции, считаем одинаковыми.

Скорость истечения расплава из раздаточной секции в кристаллизатор рассчитывали при следующих условиях: скорость вытягивания непрерывного слитка поперечным сечением 250×1850 мм — 0,7 м/мин, расход металла — $0,0054 \text{ м}^3/\text{с}$, диаметр разливочного стакана в разливочной секции — 0,06 м. При этом скорость истечения металла из разливочного стакана в кристаллизаторы составляет 1,91 м/с.

Формирование вихревой структуры в раздаточной секции обусловлено поступлением расплава через каналы в перегородках и истечением через стакан в кристаллизатор машины непрерывной разливки стали (рис. 3, а).

При наложении динамического воздействия распределенными газовыми струями происходит увеличение импульса циркуляционного потока жидкого металла. При этом кинетическая энергия расплава при вводе газовой фазы на порядок больше, чем без продувки (рис. 3, б).

Таким образом, разработанная обобщенная модель для исследования гидрогазодинамических процессов в ограниченном пространстве секций промковша МНЛЗ позволяет получать достаточно подробное описание структуры течений в виде поля вектора скорости и оценить величины его проекций на координатные оси рассматриваемого пространства.

Применение разработанной методики математического моделирования позволяет проследить влияние конструктивных и технологических характеристик фильтрационных пере-

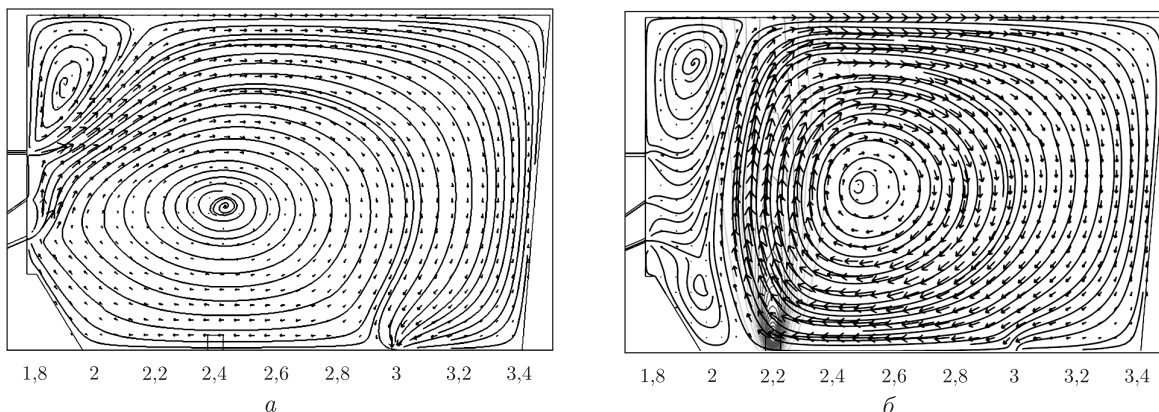


Рис. 3. Линии тока в раздаточной секции промковша без барботажа (а) и при введении барботажа (б)

городок и продувочных устройств на особенности формирования циркуляционных потоков, и на основании анализа полученных результатов установить оптимальные условия непрерывного рафинирования жидкой стали ответственного назначения в промковше МНЛЗ.

1. Дюдкин Д. А., Киселенко В. В. Современная технология производства стали. – Москва: Теплотехника, 2007. – 522 с.
2. Огурцов А. П., Недопекин Ф. В., Белоусов В. В. Процессы формирования стального слитка: математическое моделирование заполнения и затвердевания. – Днепропетровск: ДГТУ, 1994. – 180 с.
3. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – Москва: Мир, 1980. – 616 с.
4. Гуляев А. Г., Коминов С. В., Ожороков Б. Н., Бажума С. С. Математическая модель процесса взаимодействия газовых струй с жидкой металлической ванной // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 7. – С. 20.
5. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидродинамика и теплообмен. – Москва: Мир, 1990. – 384 с.
6. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. – Москва: Мир, 1988. – 544 с.
7. Зекели Дж., Эль-Кадах Н. Х., Грэвет Дж. А. Анализ гидродинамических явлений в ковшах при холодном моделировании // Инжекционное моделирование 80. – Лелау, Швеция, 1980. – Москва: Металлургия, 1982. – 420 с.

Фізико-технологічний інститут металів
і сплавів НАН України, Київ

Поступило в редакцію 21.07.2008

Academician of the NAS of Ukraine **V. L. Naidek, N. I. Tarasevich, B. S. Gonchar, V. V. Belousov, V. F. Komarov**

Modeling of hydro-gas-dynamic processes in a cavity of a tundish ladle of the continuous steel casting machine

A mathematical model of hydro-gas-dynamic processes in a three-section tundish ladle with partitions and flowing channels in them and an algorithm of its numerical realization are formulated. The model can be adapted for ladle pots with any configuration of flowing channels and allows one to consider various angles of melt input in the casting section. Besides modeling a barbotage, a variation of the intensity of supply of a gas phase both in the casting and reception sections of a tundish ladle is possible. The carried out explorations allow one to develop a technique of forecasting the hydro-gas-dynamic processes in a melt with the purpose of upgrading the continuous casting of steels.