

© Рябчиков Н.Л., Страшко Т.И., Трыкова Т.Н.

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДАЧИ СТАЛИ В МАШИНАХ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ

Машины непрерывной разливки стали функционируют и постоянно совершенствуются на ряде металлургических предприятий Украины и России. На качество слитка при этом большое влияние оказывают тепловые процессы, происходящие при затвердевании стали. Этим вопросам посвящено значительное количество работ [1-3]. Одним из наиболее сложных вопросов является проблема учета движения жидкого металла на тепловые явления, происходящие в слитке. Хотя частные решения этого вопроса присутствуют в некоторых публикациях [4-7], неясным остаются проблемы моделирования такого движения, а также влияние его на теплоотдачу между твердой и жидкой фазами в слитке.

Целью настоящей работы является построение модели движения расплавленной стали при ее заливке в машине непрерывной разливки на основе современных компьютерных пакетов и определение, на основе этого параметров теплоотдачи между твердой и жидкой фазами.

Моделирование процесса течения жидкого металла в процессе непрерывной разливки стали в полости затвердевшего металла будем исследовать с помощью современного программного пакета FloWorks, причем твердую фазу металла, в которой происходит течение будем моделировать с помощью программного пакета SolidWorks. Будем считать сечение слитка квадратным, слиток – вытянутый в направлении оси ординат параллелепипед. Охлаждение слитка – постепенное. Затвердевшая фаза увеличивается непрерывно от верхней части вниз. Процесс твердения в условиях неподвижной жидкой фазы рассмотрен, в частности в [2,3]. Эти

решения можно рассматривать, как первое приближение в задаче об исследовании теплопередачи в металле с движущейся жидкой фазой.

Будем в первом приближении считать полость с пока еще не затвердевшим металлом – пирамидой, вдавленную в слиток. В программе SolidWorks для этого создаем параллелепипед, из которого выдавливается пирамида (рис. 1)

Согласно исследованиям ряда авторов [5,7] течение жидкого металла при заливке носит турбулентный, вихреобразный характер.

При изучении турбулентного течения в дифференциальных уравнениях движения жидкости используются компоненты, усредненные по времени. Тогда произвольный компонент скорости может быть записан в виде $u = \bar{u} + u'$, где первое слагаемое характеризует усредненное значение скорости, а второе – пульсации.

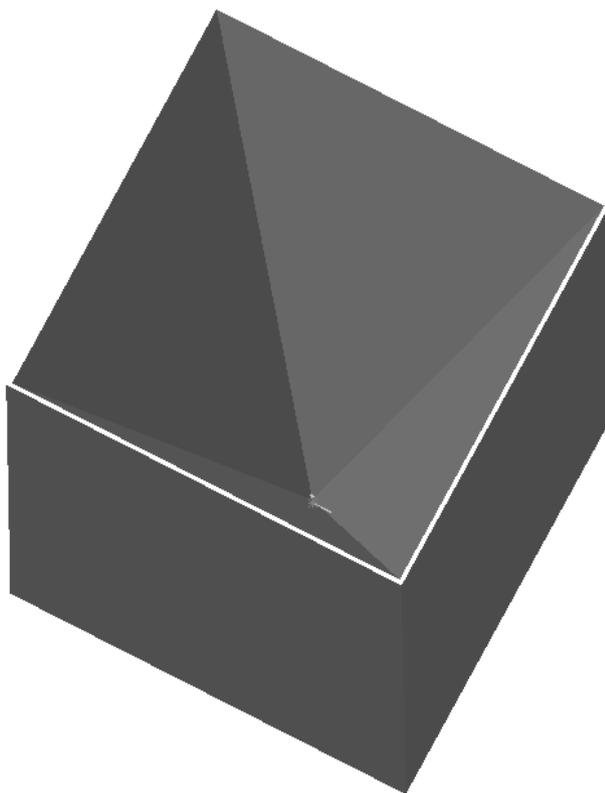


Рис. 1 – Модель слитка с полостью

С учетом уравнения неразрывности для усредненного установившегося турбулентного движения оказываются справедливыми уравнения Рейнольдса

$$\begin{aligned}
F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u}_x &= \\
&= \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} + \frac{\partial \langle u'_x u'_x \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle u'_x u'_y \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle u'_x u'_z \rangle}{\partial z}, \\
F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{u}_y &= \\
&= \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial z} + \frac{\partial \langle u'_y u'_x \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle u'_y u'_y \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle u'_y u'_z \rangle}{\partial z}, \\
F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \bar{u}_z &= \\
&= \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} + \frac{\partial \langle u'_z u'_x \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle u'_z u'_y \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle u'_z u'_z \rangle}{\partial z},
\end{aligned}$$

где F_x, F_y, F_z – компоненты массовых сил, принимаемые во внимание, например при продольном движении кристаллизатора со слитком с ускорением,

ν – кинематический коэффициент вязкости,

Поскольку уравнения Рейнольдса образуют незамкнутую систему, необходимо ввести дополнительные гипотезы, устанавливающие связи между турбулентными напряжениями и другими переменными, входящими в систему.

Полуэмпирическая теория Прандтля [8], широко применяемая в разнообразных задачах, основана на понятии пути перемешивания. Если частица, имеющая в слое 1 усредненную скорость \bar{u} под влиянием турбулентной пульсации перемещается на расстояние l в слой 2, где усредненная скорость равна $\bar{u} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} l$, пульсации скорости определяются как

$$|u'_x u'_y| = k \cdot l \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2.$$

Величина l – длина перемешивания, характеризует существующую в турбулентном потоке возможность для жидких частиц свободно перемещаться из одного слоя в другой и является одной из характеристик

внутреннего механизма турбулентного потока. При работе в среде Floworks при выборе параметров турбулентности вводятся величины, взятые из эмпирических данных [5, 7].

В процессе итерационных процессов производится уточнение величины длины перемешивания, которая оказывается переменной по объему полости и интенсивности турбулентности, которая для рассматриваемых случаев оказывается невелика и близка к 1%. Величина длины перемешивания находится в пределах 0-0,2 м. Ее распределение показано на рис.2

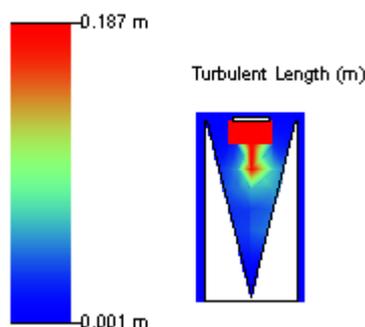


Рис. 2 - Изменение длины перемешивания турбулентного течения в полости с расплавленным металлом

После вычислений производится визуализация полей усредненных скоростей в полости с жидким металлом.

При решении уравнений течения жидкости принципиальным является вопрос задания граничных условий. При использовании программы FloWorks в процессе моделирования твердой фазы в среде SolidWorks стенки модели автоматически считаются твердыми неподвижными с соответствующими краевыми условиями. Значительные проблемы возникают при моделировании верхней части расплавленного металла в месте, где производится заливка.

Логичным было бы моделировать эту зону некоторой твердой поверхностью с некоторой интенсивностью подачи жидкости, при этом задаваться массовым расходом жидкого металла заданным в килограммах в секунду. Это величина достаточно естественно следует из характеристик технологического процесса непрерывной разливки стали. В то же время вид

поверхности истечения стали остается понятием проблематичным и не следует ни из процесса разливки, ни из известных публикаций.

Сделаем попытку моделировать подачу различными поверхностями, при этом будем следить, чтобы площадь поверхности подачи и интенсивность подачи оставались постоянными.

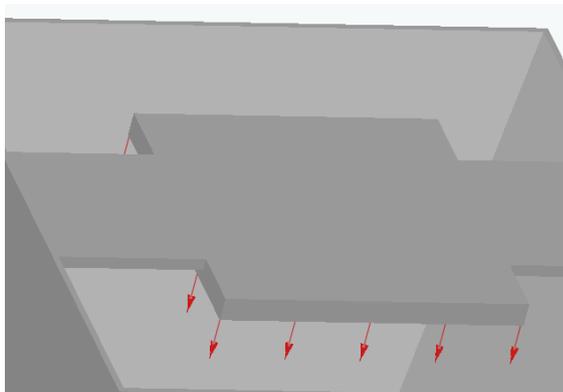


Рис. 3 – Моделирование процесса истечения жидкого металла плоскостью

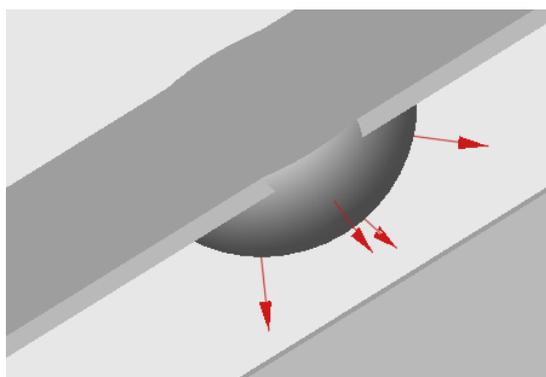


Рис. 4 – Моделирование процесса истечения жидкого металла полусферой

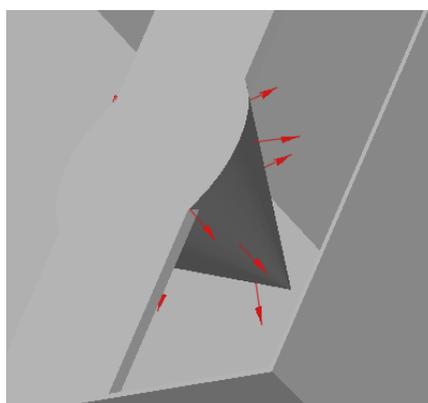


Рис. 5 – Моделирование процесса истечения жидкого металла конусом

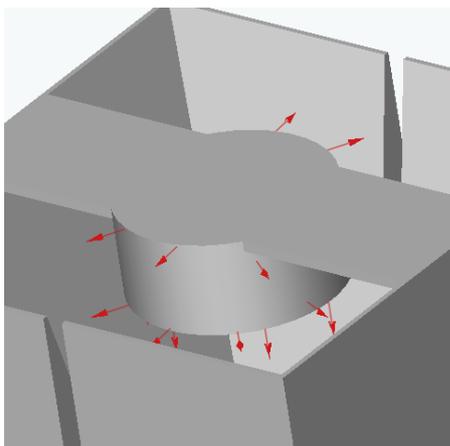


Рис. 6- Моделирование процесса истечения жидкого металла цилиндром

В качестве первой модели рассмотрим плоскую поверхность, расположенную в верхней части полости, из которой истекает жидкость (рис.3). К сожалению, в программе FloWorks необходимо отметить поверхность, из которой происходит истечение, поэтому необходимы небольшие технологические разрезы в боковых стенках слитка. Представляется, что процесс разливки жидкости носит более сложный характер. Построим модели подачи жидкости из более сложных поверхностей: полусферической поверхности (рис.4), конуса (рис.5) и цилиндрической (рис.6) поверхности, при этом в последнем случае истечение жидкости должно идти как с боковой поверхности цилиндра, так и с его основания.

На рис. 7- показаны результаты численного эксперимента по определению скоростей . Полученные распределения демонстрируют, что поля скоростей во всех случаях моделирования носят подобный характер. Остановимся пока на зависимости скорости жидкого металла по длине полости. Попробуем выявить явную зависимость скорости от координаты.

Для получения зависимости скорости по длине в явном виде попытаемся получить уравнение регрессии в виде экспоненциальной зависимости скорости от координаты

$$\bar{u} = \frac{u}{u_{\max}} = Ae^{-by}.$$

Обработка данных методом наименьших квадратов дает

$$\bar{u} = e^{-4,8\bar{y}}.$$

Сопоставление данных численного расчета и регрессионного анализа приведено на рис. 8.

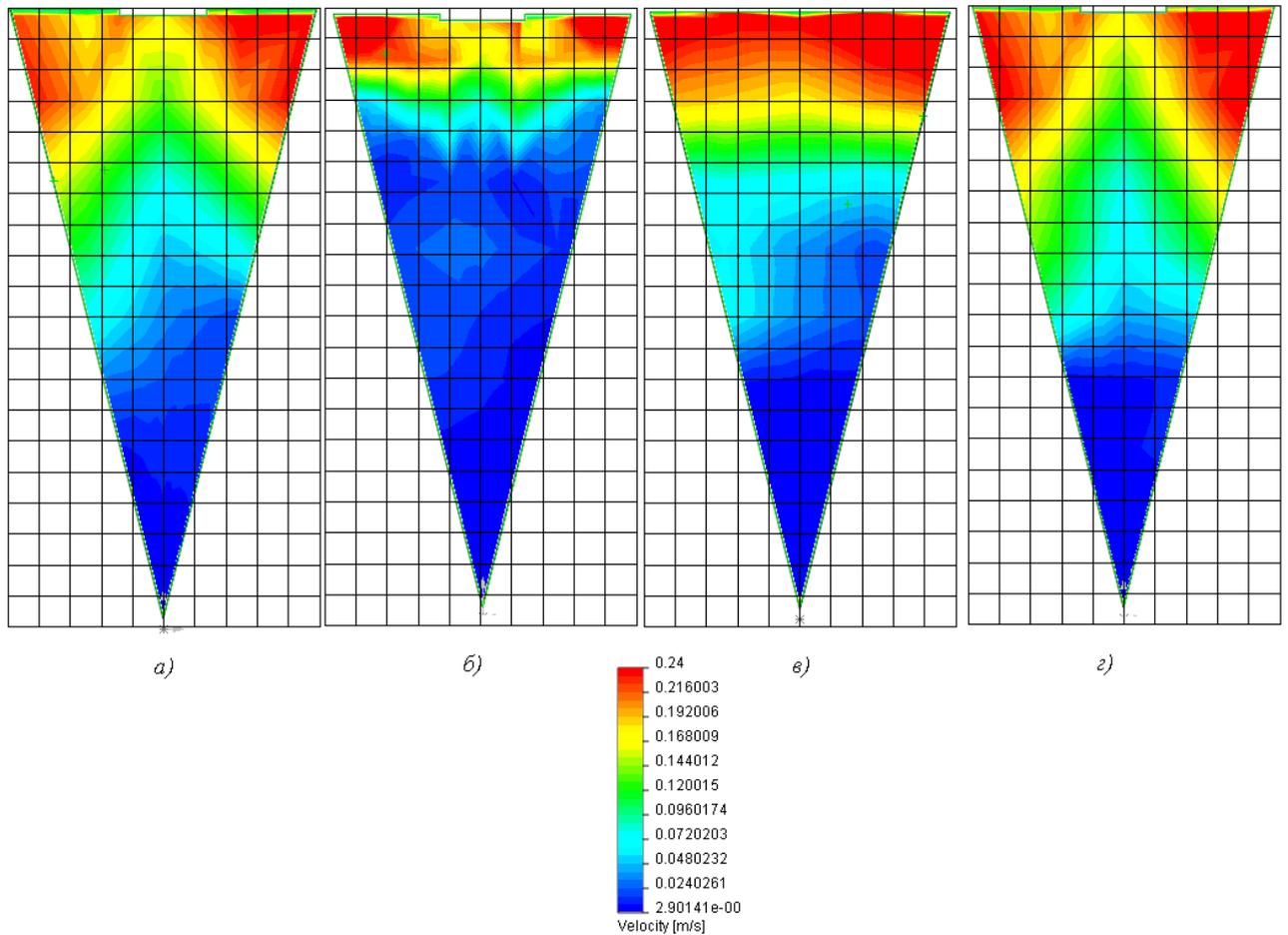


Рис. 7 – Сопоставление скоростей при моделировании истечения жидкости разными поверхностями а) – плоскостью, б) – полусферой, в) – конусом, г) – цилиндром.

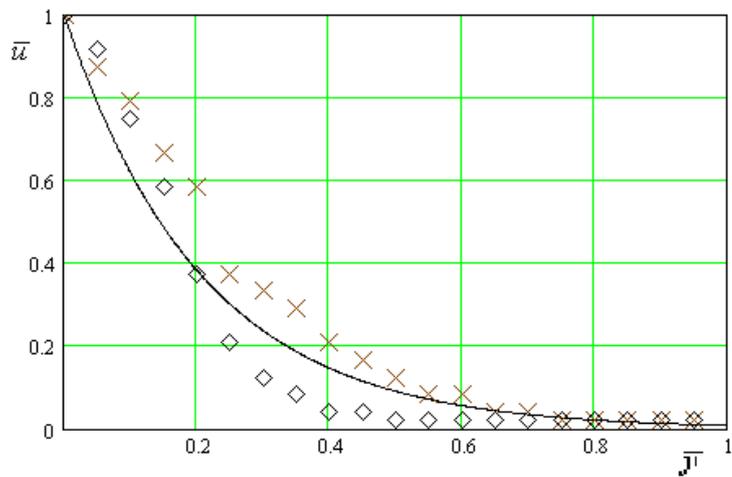


Рис. 8 – График изменения скорости по длине полости

Скорость жидкого металла возле твердой стенки во многом определяет коэффициент теплоотдачи между твердой и жидкой фазой, то есть граничные условия при тепловом расчете слитка. Условия теплоотдачи при движении жидкости определяются условием

$$Nu=f(Re, Pr),$$

где Nu - число Нуссельта, $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$, α – коэффициент теплоотдачи между жидкостью и твердым телом, λ – коэффициент теплопроводности расплавленного металла, l – характерный размер, в качестве характерного размера примем поперечный размер слитка; Re – число Рейнольдса, $Re = \frac{ul}{\nu}$, ν – коэффициент кинематической вязкости расплавленного металла, u – скорость жидкости; Pr – число Прандтля, $Pr = \frac{\nu C \rho}{\lambda}$, C – удельная теплоемкость расплавленного металла, ρ – его плотность.

Учитывая многие данные, зависимость между данными величинами записывается, как

$$Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n,$$

где A , m , n – опытные коэффициенты.

В качестве первого приближения воспользуемся результатами аналитического решения движения турбулентного потока возле пластины.

В этом случае

$$Nu = 0,029 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\text{Или } \frac{\alpha l}{\lambda} = 0,029 \left(\frac{ul}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\nu C \rho}{\lambda} \right)^{0,4}.$$

Из этого выражения находим явное выражение для коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = 0,029 \cdot l^{0,2} \lambda^{0,6} \nu^{-0,4} C^{0,4} \rho^{0,4} u^{0,8}.$$

Учитывая предыдущие результаты, скорость можно определить, как

$$u = u_{\max} e^{-4,8\bar{y}}.$$

Причем максимальное значение скорости является функцией поперечных размеров слитка и интенсивности заливки металла \dot{m} (массы, заливаемой в единицу времени). Обозначим $f(\dot{m}, l) = u_{\max} \cdot l^{0,2}$,

$$K = 0,029 \cdot \lambda^{0,6} \nu^{-0,4} C^{0,4} \rho^{0,4}.$$

Тогда изменение коэффициента теплоотдачи по длине слитка может быть выражено, как

$$\alpha = K \cdot f(\dot{m}, l) e^{-3,84\bar{y}}.$$

Выводы и перспективы дальнейших исследований.

В статье описан ряд моделей, описывающих метод заливки расплавленной стали. Показано, что при определении взаимодействия жидкого металла с затвердевшим, модели дают подобные результаты. Проведенный регрессионный анализ дал возможность получить выражение для скорости в пристеночной области в явном виде и предложить уравнение для определения эффективного коэффициента теплоотдачи.

Список использованных источников

1. Паршин В. М. Непрерывная разливка в модернизации черной металлургии России / В. М. Паршина, Ю. Е. Канн // Труды четвертого конгресса сталеплавильщиков / Черметинформация. – М., 1997. – С. 327–329.
2. Применение математических моделей для исследования процессов затвердевания и охлаждения непрерывных стальных слитков прямоугольного поперечного сечения / Ю. А. Самойлович, З. К. Кабаков, В. А. Горяинов [и др.] // Непрерывная разливка стали. – М., 1974. – № 2. – С. 44–49.
3. Моделирование процесса охлаждения непрерывнолитых слитков / О. В. Носоченко, В. И. Лебедев, В. В. Емельянов, Г. А. Николаев // Сталь. – 1983. – № 12. – С. 37

4. Девятов Д. Х. Определение коэффициентов теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ с помощью идентифицируемой математической модели / Д. Х. Девятов, И. И. Пантелеев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 8. – С. 62–65.
5. Недопекин Ф. В. Математическое моделирование гидродинамики и теплопереноса при затвердевании слитков и отливок / Ф. В. Недопекин // Процессы литья. – 1990. – № 2. – С. 15–20.
6. Самойлович Ю. А. Математическое моделирование тепловых и гидродинамических явлений процесса затвердевания непрерывного слитка / Ю. А. Самойлович, А. Н. Ясницкий, З. К. Кабаков // Изв. АН СССР. Металлы. – 1982. – № 2. – С. 62–68.
7. Самойлович Ю.А. Гидродинамические явления в незатвердевшей части (жидком ядре) слитка / Ю. А. Самойлович // Изв. АН СССР. Металлы. – 1969. – № 2. – С. 84.
8. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика / Б. Т. Емцев. – М. : Машиностроение, 1987. – 463 с.
9. Сербси Т. Конвективный теплообмен / Т. Сербси, П. Брэдшоу. – М. : Мир, 1987. – 592 с.

Рябчиков Н.Л., Страшко Т.И., Трыкова Т.Н. Проблемы моделирования подачи стали в машинах непрерывной разливки

В статье рассмотрены вопросы исследования гидравлических процессов, которые происходят в жидкой стали при ее разливке. Рассмотрены различные модели подачи жидкой стали. Построены поля скоростей жидкой стали. Рассчитаны корреляционные зависимости скорости стали по длине полости в твердом слитке, необходимые для определения коэффициента теплоотдачи от жидкого металла твердому.

Рябчиков М.Л., Страшко Т.И., Трыкова Т.М. Проблемы моделирования подавания стали в машинах непрерывного розливания

В статті розглянуті питання дослідження гідравлічних процесів, що відбуваються у рідкій сталі в процесі її розливання. Розглядані різні моделі подавання рідкої сталі. Побудовані поля швидкостей рідкої сталі. Розраховані кореляційні залежності швидкості сталі по довжині порожнини в твердому металі, необхідні для визначення коефіцієнта тепло відведення від рідкого метала твердому.

Ryabchikov N.L., Strashko T.I., Trykova T.N. The problems of modeling of steel movement in machines of permanent movement

The questions of hydraulic processes investigation that are held in liquid steel in the process of its movement are worked out. Different models of liquid steel movement are showed. The velocity fields of liquid steel are built. Correlations of steel velocity and length that are necessary for heat transfer coefficient are calculated