

УДК 681.5:51-74

Иванова А. А.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ,
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА
И УПРАВЛЕНИЕ РАСХОДАМИ ВОДЫ В ЗОНЕ ВТОРИЧНОГО
ОХЛАЖДЕНИЯ МНЛЗ**

Исследование температурных режимов процесса непрерывной разливки, разработка методов идентификации неизвестных теплофизических параметров и алгоритмов управления подсистемами охлаждения являются необходимыми этапами разработки новых и совершенствования существующих технологий производства стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Математическое моделирование представляется наиболее привлекательным для решения подобных задач. В [1] и [2] была разработаны соответственно модели квазистационарного и нестационарного процессов теплопереноса в непрерывном слитке и теплообмена в стенках кристаллизатора. В [3] предложены новые способы идентификации параметров внешнего теплообмена в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ. В [4] представлен и проанализирован алгоритм разомкнутого управления и определены причины низкого качества такого метода управления. Таким образом, возникает необходимость в разработке новых алгоритмов, позволяющих повысить качество непрерывнолитой заготовки.

Целью данной работы является разработка алгоритма прогнозного управления режимами вторичного охлаждения на основе оперативной оценки температурного состояния слитка, получаемой в режиме реального времени из расчётов адаптивной математической модели.

Рассматривается процесс теплопереноса в непрерывном слитке, движущемся внутри криволинейной МНЛЗ. А также процесс теплообмена внутри стенок медного кристаллизатора (рис. 1).

Модель учитывает зависимость теплофизических характеристик металла от температуры. Теплоперенос в слитке и теплообмен внутри стенок кристаллизатора описывают нелинейные нестационарные уравнения в частных производных. Подробное описание математической модели приведено в работах [1, 2]. На участке слитка внутри кристаллизатора задано уравнение теплопереноса и граничные условия. На границе раздела фаз заданы условия равенства температур и условия Стефана. Также заданы граничное и начальное условия для границы фазового перехода.

Для стенки кристаллизатора заданы уравнение теплопроводности и граничные условия, соответствующие характеру теплообмена на каждом участке границы.

Температура охлаждающей воды в канале кристаллизатора описывается балансовым уравнением. Известна температура охлаждающей воды на входе в канал кристаллизатора и её начальное распределение внутри канала.

Уравнение теплопереноса для слитка на криволинейных участках МНЛЗ выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \theta_m(t) \frac{\partial T(t, r, j)}{\partial j} = \frac{1}{c(T, r, j)r(T, r, j)} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(I(T, r, j) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial j} \left(I(T, r, j) \frac{\partial T}{\partial j} \right) + \frac{I(T, r, j)}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right\}, \quad (1)$$

где θ_m – угловая скорость движения слитка на m -м криволинейном участке; $T(t, r, \varphi)$ – температура; $c(T, r, \varphi)$ – удельная теплоёмкость; $r(T, r, \varphi)$ – плотность; $I(T, r, \varphi)$ – теплопроводность разливаемого металла; r – радиус кривизны рассматриваемого участка.

На неизвестной границе раздела фаз $\xi_1(\varphi)$ на криволинейных участках заданы условия равенства температур и условия Стефана:

$$(T, r, j)|_{x_{1+}} = (T, r, j)|_{x_{1-}}, \quad I(T, r, j) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x_{1-}} - I(T, r, j) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x_{1+}} = mr_{kr} \left(q_m(t) \cdot \frac{\partial x_1}{\partial j} + \frac{\partial x_1}{\partial t} \right). \quad (2)$$

Граничные условия на криволинейных участках учитывают сложный механизм теплоотвода за счёт конвекции и излучения. По внутреннему радиусу они имеют вид:

$$-I(T, j) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_m} = a_l(G_m(t), j) \cdot (T_{Im} - T|_{r=r_m}) + C_{Im}(T_{Im}^4 - (T|_{r=r_m})^4), \quad (3)$$

где $a_l(G_m(\tau), \varphi)$, C_{Im} и T_{Im} – соответственно, коэффициент теплоотдачи на поверхности слитка, приведённый коэффициент излучения на поверхности слитка и температура окружающей среды в m -й секции ЗВО по внутреннему радиусу; $G_m(\tau)$ – расход воды в m -й секции. Заданы начальные условия для поля температур и положения границы фазового перехода $x_1(0, j) = x_{1_0}(j)$.

Разработаны специальные алгоритмы численного решения задачи на основе метода конечных разностей. Алгоритмы реализованы в среде программирования Borland C++ Builder 6.0. Программа позволяет наблюдать динамику температурного поля непрерывной заготовки при изменениях скорости вытягивания слитка, температуры и марки поступающего расплава, расходов охлаждающей воды в кристаллизаторе и в различных секциях ЗВО.

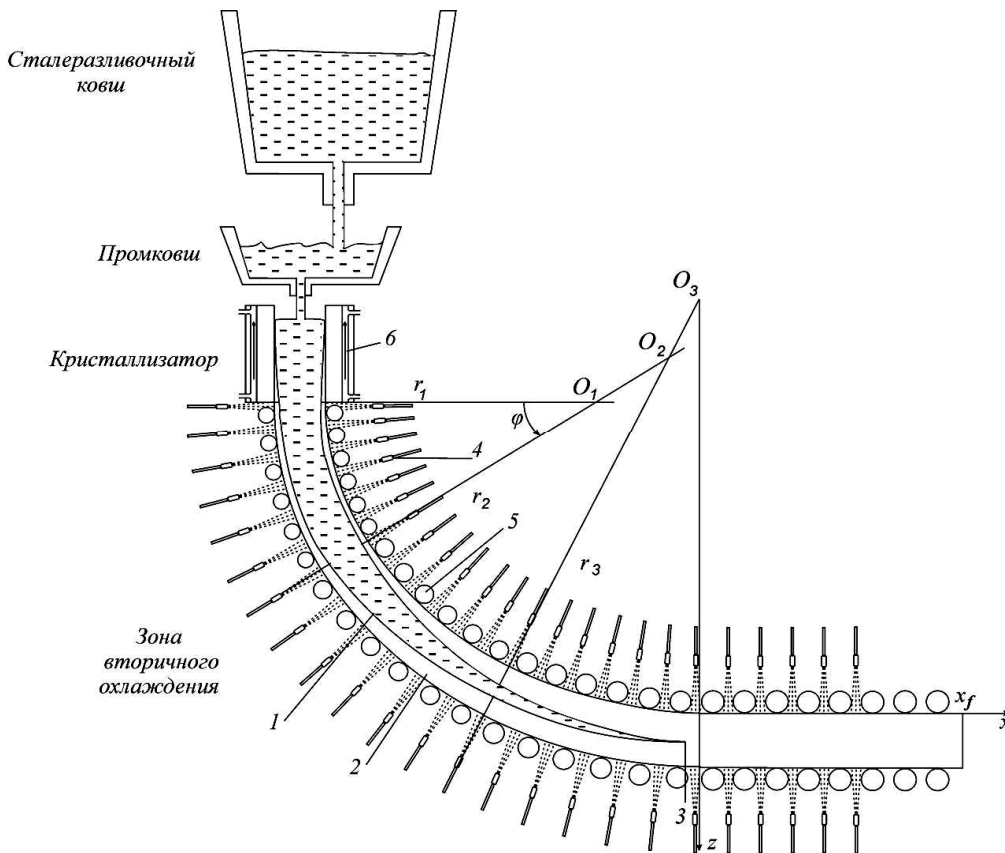


Рис. 1. Схема МНЛЗ:

1 – граница раздела фаз между жидким и твёрдым металлом; 2 – твёрдая корочка слитка; 3 – точка окончания затвердевания; 4 – форсунки, распыляющие водовоздушную смесь; 5 – опорно-приводные ролики; 6 – каналы для охлаждающей воды внутри стенок кристаллизатора

В ходе пуско-наладочных работ производятся измерения температуры поверхности слитка в различных точках ЗВО T_i^* . Необходимо по данным измерений идентифицировать коэффициент конвективной теплоотдачи (ККТ) на поверхности слитка таким образом, чтобы данные, полученные в ходе расчётов по математической модели, наиболее точно соответствовали экспериментальным данным, полученным с измерительных приборов.

Прямое выражение ККТ из граничных условий даёт неустойчивое решение. Однако, принимая во внимание информацию о виде распределения ККТ вдоль поверхности ЗВО, задачу удаётся структурировать таким образом, что становится возможным применение метода наименьших квадратов для вычисления ККТ [3].

После начальной настройки необходимо обеспечить адаптацию параметров модели во время обычной работы МНЛЗ, когда информация о тепловом состоянии ограничивается показаниями температуры иногда всего только в одной точке на поверхности слитка. Такие алгоритмы могут быть основаны на методе стохастической аппроксимации [3].

Рассматривается задача управления охлаждением слитка в ЗВО. Необходимо в зависимости от скорости вытягивания слитка и других параметров разлива устанавливать такие расходы воды в каждой секции, чтобы средняя температура поверхности слитка поддерживалась на определённом уровне.

Для того чтобы определить степень влияния управляющих параметров (расходов воды в различных секциях ЗВО) строятся функции чувствительности температуры поверхности слитка к изменениям расходов воды по каждой секции. На основе полученных данных выделяются участки $[a_i, b_i]$ влияния i -той секции.

Для каждого участка влияния определяется критерий управления:

$$|T_{s_i} - T_{t_i}| \rightarrow \min \cdot$$

где T_{s_i} – оперативная оценка средней температуры поверхности на участке $[a_i, b_i]$ в следующий момент времени; T_{t_i} – требуемая средняя температура поверхности на участке $[a_i, b_i]$.

Ограничение на выходные параметры (переменные состояния): температура не должна опускаться ниже температуры определенного для каждой марки стали значения T_p , которое соответствует переходу из области пластических в область упругих деформаций:

$$T_{\min} \geq T_p \cdot$$

Ограничениями на управляющие воздействия являются значения минимального и максимального расходов воды в каждой секции ЗВО.

Данные о скорости слитка поступают на вход программы, которая рассчитывает величины G_i расхода воды по каждой секции, при которых будет обеспечиваться наиболее близкий к необходимому уровень средней температуры на соответствующих участках поверхности $[a_i, b_i]$. Если при этом по оперативной оценке состояния в следующий момент будет спрогнозировано нарушение минимально допустимой температуры, то отыскивается такое G_i , при котором $T_{\min} = T_p$ на соответствующем участке. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Для того чтобы проиллюстрировать работу программы управляющей расходами воды, рассматривается простейший случай, когда из установившегося режима при скорости вытягивания слитка 1 м/мин скорость снижается до 0,2 м/мин, а затем через некоторое время снова возрастает и устанавливается на уровне 1 м/мин (рис. 3). На первом графике представлена скорость движения слитка, на последующих – соответствующие рекомендуемые расходы воды в каждой из секций ЗВО, генерируемые программой и значения средней температуры T_{s_i} в первых трех секциях.

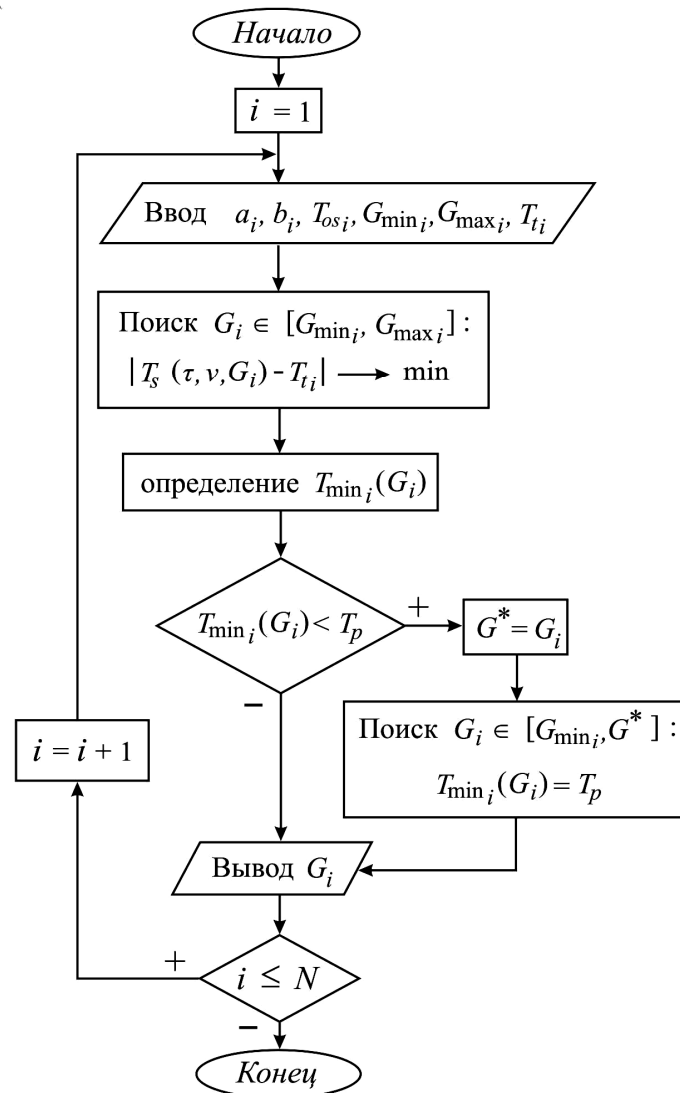


Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления

ВЫВОДЫ

Таким образом, для управления расходами воды в системе вторичного охлаждения ЗВО разработан алгоритм прогнозного управления на основе оперативной оценки теплового состояния слитка, получаемый в режиме реального времени из расчётов адаптивной математической модели. Данный алгоритм позволяет стабилизировать температуру поверхности слитка в первых секциях ЗВО, что обеспечивает наилучший, с точки зрения качества слитка, тепловой режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова А. А. Математическая модель процесса затвердевания непрерывного слитка в зоне вторичного охлаждения / А. А. Иванова // Труды ИПММ НАН Украины. – Вып. 12. – Донецк, ИПММ. – 2006. – С. 76–84.
2. Ткаченко В. Н. Моделирование и анализ теплового поля непрерывного слитка криволинейной машины непрерывного литья заготовок / В. Н. Ткаченко, А. А. Иванова // Электронное моделирование. – 2008. – Т. 30. – № 3. – С. 87–103.
3. Ivanova G. O. Identification of Convection Heat Transfer Coefficient of Secondary Cooling Zone of Based on Least Squares Method and Stochastic Approximation Method / G. O. Ivanova // Труды ИПММ НАН Украины. – 2008. – Т. 17. – С. 61–73.
4. Иванова А. А. Управление режимами вторичного охлаждения МНЛЗ. Доклады XV международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика – 2008» / А. А. Иванова. – Одесса. – 2008. – С. 221–224.

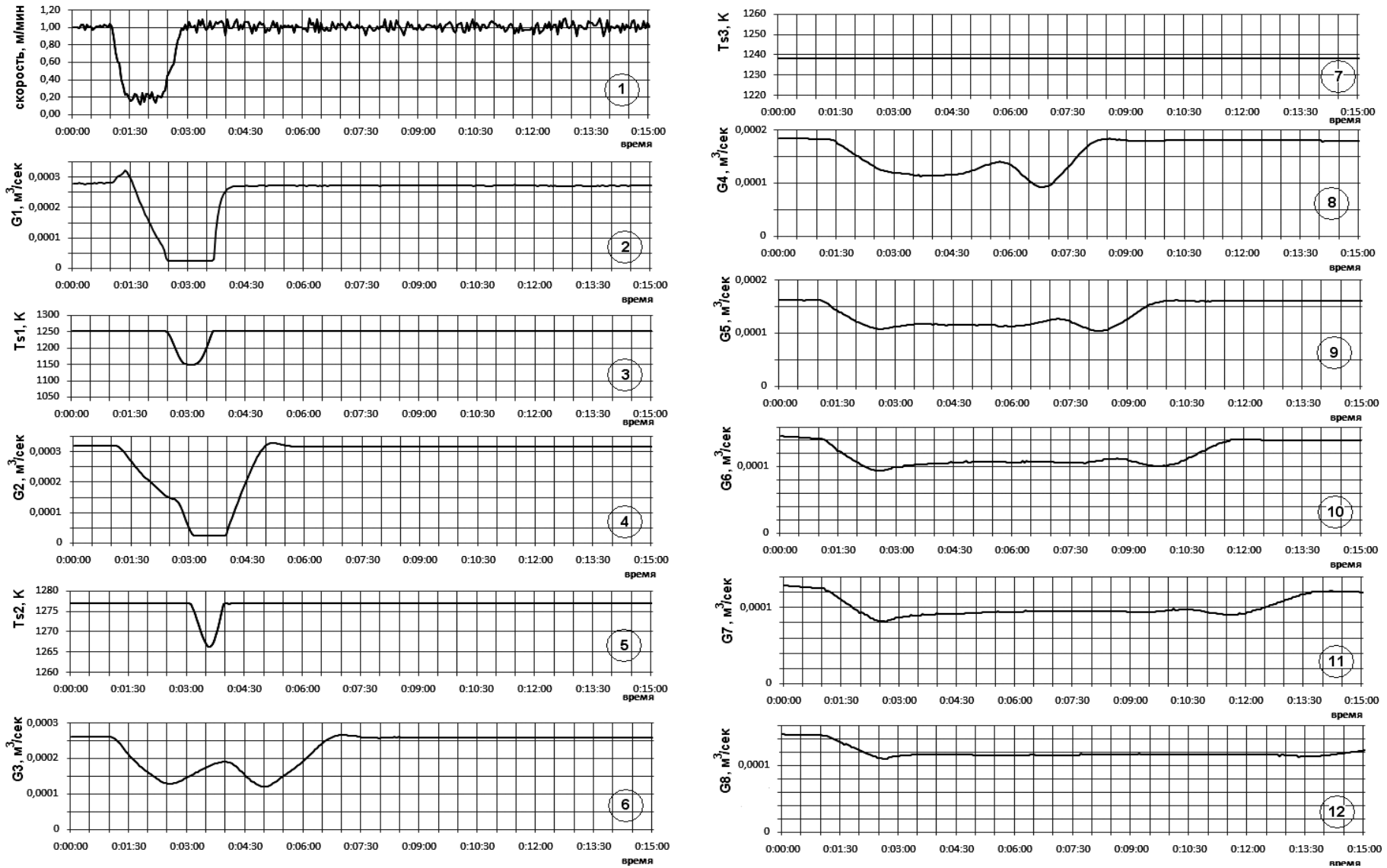


Рис. 3. Результаты работы алгоритма управления:

1 – скорость вытягивания слитка; 2, 4, 6, 8–12 – расходы воды в 1–8 секциях соответственно; 3, 5, 7 – средняя температура поверхности слитка на 1–3 участках