

### **Разработка многоуровневой иерархической системы управления технологическим процессом непрерывной разливки стали**

Ткаченко В.Н., докт. техн. наук, проф., Иванова А.А.

(ДИПММ НАНУ, г.Донецк)

Волуева О.С.

(ДНТУ, г.Донецк)

В работе определены основные функции системы управления объектом. На основе анализа указанных функций разработана иерархическая структурная схема компьютерной системы управления, которая позволяет максимально автоматизировать процесс непрерывной разливки стали. Предложены математические модели тепловых процессов, выполнена постановка основных задач управления в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения.

Несмотря на неоспоримые преимущества компьютерного управления процессом непрерывной разливки стали, в настоящее время степень автоматизации отечественных установок все еще остается недостаточно высокой. Современный уровень развития вычислительной техники, средств автоматизации, методов и алгоритмов управления позволяет компьютеризировать основные управленческие операции и свести к минимуму участие человека в данном процессе.

Целью данной работы является анализ и систематизация основных функций разрабатываемых компьютерных систем управления технологическими процессами на участке непрерывной разливки стали, постановка основных задач управления тепловыми процессами в кристаллизаторе и зоны вторичного охлаждения (ЗВО).

Проанализируем основные функции компьютерных систем управления технологическими процессами на участке непрерывной разливки стали.

Система управления должна выполнять функции управления на уровне системы в целом, функции подсистем управления всех подпроцессов, входящих в технологический процесс, и функции сбора информации о параметрах всего технологического процесса.

В рамки системы должны быть включены следующие технологические процессы:

- процессы подготовки стальной и проковшей;
- процессы подготовки МНЛЗ к разливке;
- процессы разливки стали на МНЛЗ.

На основе анализа технологического процесса можно выделить основные функции компьютерной системы автоматического управления процессом непрерывной разливки стали, разделив их на три уровня.

I уровень включает в себя информационные функции, а также функции контроля, регулирования и управления локальными объектами. Соответственно подсистемы, выполняющие эти функции, можно разделить на подсистемы контроля, регулирования и управления.

Подсистема контроля – это подсистема взвешивания проковшей. Соответственно, ее основной функцией является измерение веса проковшей с целью дальнейшего расчета времени разливки.

Подсистемы регулирования обеспечивают необходимую скорость движения слитка (скорость разливки), регулирование расхода газа и мерный рез.

К функциям регулирования необходимо отнести:

- воздействие на механизмы приводов тянущей клетки с целью регулирования скорости разливки;
- управление резом заготовки на мерные слябы;
- предотвращение окисления металла.

В процессе функционирования технологического процесса наступают некоторые события, при возникновении которых необходимо принимать соответствующие управленческие решения. Эта задача возлагается на подсистемы управления. К их информационным функциям следует отнести такие:

- измерение и расчет параметров теплового и гидравлического режимов работы кристаллизатора;
- контроль величины теплопередачи от корочки сляба;
- измерение уровня металла в кристаллизаторе;
- измерение давления и расхода охлаждающей воды на ЗВО;
- измерение давления и расхода воздуха на ЗВО;
- измерение параметров качания кристаллизатора;

- измерение температуры слитка в начале и конце ЗВО.

К функциям управления и регулирования можно отнести:

- управление качанием кристаллизатора;
- поддержание заданного уровня металла в кристаллизаторе;
- управление расходом воды на кристаллизатор;
- управление расходом воды по секциям ЗВО с учётом марки стали и сечения заготовки.

Кроме того, предусматривается возможность тестирования работы систем.

Совместное использование рассмотренных подсистем первого уровня позволяет обеспечить стабильный уровень стали в кристаллизаторе и хорошее поверхностное качество сляба, снизить окисление металла, контролировать качество и равномерность подачи шлаковой смеси, предупредить возникновение таких явлений, как продольные и поперечные трещины в слябе, прорыв корочки сляба, зарастание затвора и стакана, отрыв агломератов зарастания и т.д.

На втором уровне (II) осуществляется координация работы подсистем первого уровня, работа с архивами данных, что позволяет определить тенденцию изменения контролируемых параметров, определить состояния, приводящие к преждевременному износу оборудования, и вовремя предупредить выход параметров за поставленные границы. Для совместной работы подсистем I уровня обеспечивается информационный обмен сигналами датчиков первичной информации через этот уровень. Кроме того, выполняются следующие задачи:

- оптимизация работы всех подсистем первого уровня;
- обеспечение заданной последовательности выполнения операций и требуемой динамики процессов;
- сохранение и при необходимости извлечение значений контролируемых параметров, а также ведение журнала событий;
- первичный анализ контролируемых признаков.

Все множество ситуаций, возникающих при работе системы можно разделить на два вида: штатные (предусмотренные технологическим процессом) и нештатные (аварийные). Главными задачами разраба-

тываемой системы является не только поддержание процесса в рамках штатных ситуаций, но и автоматическое распознавание нештатных ситуаций, используя регистрируемые значения параметров процесса. Задачи второго рода возлагаются на уровень III, который является верхним уровнем разрабатываемой системы. На этом уровне решаются наиболее «интеллектуальные» задачи, такие, как диагностика и вынесение решения состояния ОУ, принятие решений на основе поставленного диагноза, выдача соответствующих инструкций оператору и управляющих воздействий на нижние уровни. Кроме того, осуществляется визуализация и индикация всех технологических участков; сигнализация (световая и звуковая) при возникновении нештатных ситуаций типа «предупреждение» и «авария»; обрабатываются воздействия и реакция оператора на сообщения системы.

Таким образом, систему управления также можно представить в виде трех уровней управления (рис. 1).

Важнейшими параметрами, которые должны быть соблюдены в процессе разлива с целью обеспечения необходимых условий нормальной (безаварийной) работы установок, являются толщина затвердевшей корочки металла на выходе из кристаллизатора и глубина жидкой фазы в пределах зоны вторичного охлаждения. Толщина затвердевшей корочки на выходе из кристаллизатора должна быть достаточной, чтобы обеспечить строительную прочность вытягиваемой заготовки и исключить прорыв жидкого металла [1].

В связи с этими требованиями возникает задача терминального управления процессом кристаллизации непрерывного слитка в кристаллизаторе, состоящая в следующем:

**заданы**  $v$  – скорость вытягивания слитка, конструктивные и теплофизические параметры слитка, МНЛЗ, охлаждающей воды и окружающей среды;

**требуется** выбрать режим охлаждения слитка, такой чтобы на выходе из кристаллизатора толщина твердой корочки слитка была бы равна  $k$ .

Процесс затвердевания слитка рассматривается как квазистационарная задача, так как непрерывная разливка является процессом установившимся: свыше 90% металла отливается при постоянной скорости, т.е. в квазистационарном режиме [2].

Уравнения теплопроводности для металла выглядят следующим образом:

$$v \frac{\partial T_i(x, z)}{\partial z} = \frac{1}{c_i(T_i) \rho_i(T_i)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial z} \right] \right\}, \quad i = \begin{cases} 1, & 0 < x < \xi \\ 2, & \xi < x < l \end{cases}$$

где  $v$  – скорость вытягивания слитка;  $l$  – полутолщина слитка;  $T_1$  – температура в жидкой фазе;  $T_2$  – температура в твёрдой фазе;  $c_1, c_2$  – удельная теплоёмкость металла в жидкой и твёрдой фазах соответственно;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность;  $\lambda_1, \lambda_2$  – теплопроводность;  $\xi$  – граница раздела фаз.



Рис. 1. Структурная схема системы управления технологическим процессом непрерывной разливки стали

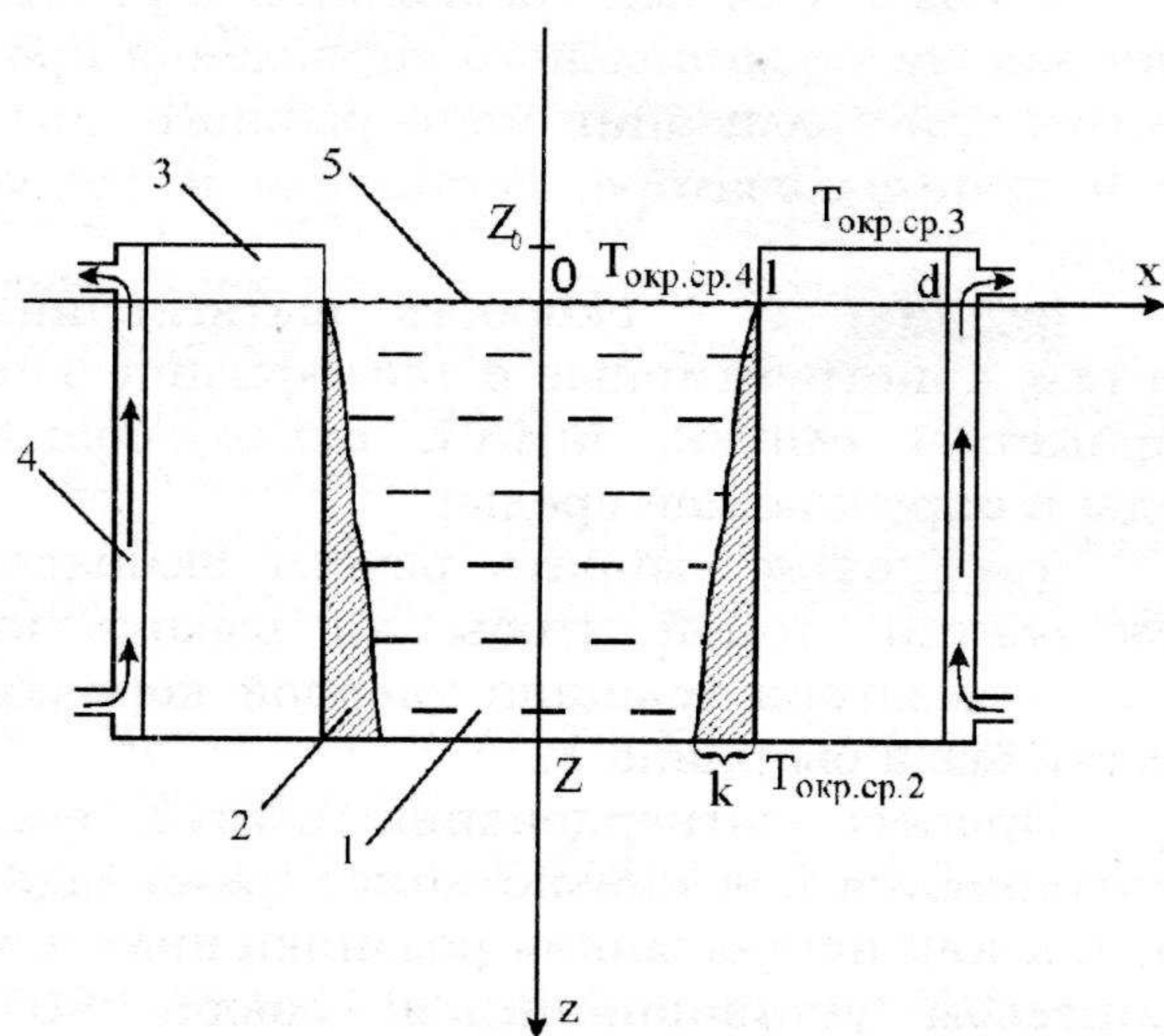


Рис. 2. Тепловая схема кристаллизатора (1 – жидкая фаза, 2 – твёрдая фаза, 3 – стенка кристаллизатора, 4 – охлаждающая вода, 5 – зеркало расплава)

Заданы следующие граничные условия для слитка. Тепловой поток на оси слитка равен нулю. Потери тепла от зеркала расплава задаются только лучистой составляющей, т.к. конвекция играет здесь незначительную роль. В месте условного контакта слитка со стенками кристаллизатора учитывается теплопередача за счёт излучения и теплопроводности газа в микрозазорах. Для этого вводится понятие эффективной толщины микрозазора.

На границе раздела фаз внутри слитка задано условие равенства температур и условие Стефана [3]:

$$\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial \bar{n}} \Big|_{x=\xi_-(z)} - \lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial \bar{n}} \Big|_{x=\xi_+(z)} = \mu \rho(T_{кр}) v \frac{d\xi}{dz},$$

где  $\mu$  – скрытая теплота кристаллизации;  $T_{кр}$  – температура кристаллизации (средняя из интервала ликвидус – солидус),  $\bar{n}$  – нормаль к поверхности раздела фаз.

Для стенки кристаллизатора записывается стационарное нелинейное уравнение теплопроводности.

Граничные условия для стенки кристаллизатора задаются как условия третьего рода – теплоотдача в окружающую среду. На стороне обращённой к слитку учитывается также и лучистая составляющая.

Температура охлаждающей воды в канале кристаллизатора описывается следующим балансовым уравнением:

$$c_w S_w v_w \frac{\partial T_w}{\partial z} = P_c \alpha_1 (T_w - T_c|_{x=d}) - P_{вн} \alpha_{вн} (T_w - T_{вн}),$$

где  $c_w$  – объёмная теплоёмкость воды;  $S_w$  – сечение для прохода воды;  $v_w$  – скорость воды;  $P_c$  – периметр стенки кристаллизатора;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от стенки кристаллизатора к воде;  $P_{вн}$  – периметр внешней стенки;  $\alpha_{вн}$  – коэффициент теплоотдачи от воды к внешней стенке,  $T_w$  – температура воды,  $T_{вн}$  – температура внешней стенки кристаллизатора.

Для управления толщиной твёрдой корочки на выходе из кристаллизатора необходимо иметь алгоритмы управления, позволяющие получить управляющее воздействие (расход охлаждающей воды в канале кристаллизатора) в зависимости от входных воздействий (скорости вытягивания слитка, температуры поступающего расплава, температуры охлаждающей воды на входе, теплофизических характеристик разливаемого металла и т.д.). В математическом плане расчёт требуемого расхода воды сводится к одномерному поиску. Для решения этой за-

дачи существует несколько различных численных методов. Среди них одним из наиболее эффективных по скорости сходимости является метод Ньютона, а наиболее простым алгоритмически – метод деления отрезка пополам.

Дальнейшее охлаждение непрерывного слитка производится в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). Как правило, в (ЗВО) отвод тепла от движущейся заготовки происходит за счёт излучения и конвективного нагрева окружающей среды. Последний включает нагрев водовоздушной смеси, распыляемой на поверхность слитка специальными форсунками, окружающего воздуха и воды в водоохлаждаемых роликах.

Уравнения теплопроводности в жидкой и твёрдой фазах для (ЗВО) записываются в полярных координатах. На границах раздела фаз  $\xi_1$  и  $\xi_2$  задаются соответствующие условия равенства температур и условия Стефана.

При форсуночно-роликовом охлаждении вода на слиток подаётся в распыленном состоянии. Установка форсуночно-роликового охлаждения позволяет охлаждать слиток с относительно небольшой интенсивностью. Это приводит к тому, что температура поверхности слитка в зоне вторичного охлаждения не опускается ниже 600-700°C, т.е. находится в области температур пластических деформаций.

Таким образом, граничные условия на поверхности слитка задаются следующими уравнениями:

- по внутреннему радиусу:

$$\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_j (G_w^j) [T_w - T(r_j, \varphi)] + \sigma_j [T_{окр.ср. j}^4 - T^4(r_j, \varphi)],$$

где  $G_w^j$  – расход воды в  $j$ -й секции ЗВО,  $\alpha_j$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности слитка к охлаждающей воде,  $\sigma_j$  – приведённый коэффициент излучения, и аналогичными условиями по внешнему радиусу.

Исследованиями установлено, что важнейшими факторами являются распределение расхода воды по высоте зоны и общая длина зоны вторичного охлаждения.

Технологически допустимым режимом охлаждения слитка в ЗВО является режим, обеспечивающий:

- окончание процесса затвердевания непрерывного слитка в конце зоны вторичного охлаждения;
- равномерное и непрерывное понижение температуры поверхности слитка вплоть до окончания затвердевания, но не ниже температуры перехода в

область упругих деформаций (с тем, чтобы сохранить пластичность металла).

Таким образом, требуется при заданной скорости вытягивания слитка, геометрических и теплофизических параметрах слитка во вторичной зоне охлаждения, а также параметрах окружающей среды найти расход охлаждающей воды по секциям ЗВО такой, чтобы были выполнены следующие условия:

- глубина жидкой фазы равна  $L$ ;
- температура поверхности слитка находится в области пластических деформаций;
- температура поверхности слитка является строго убывающей функцией по переменной  $\varphi$ .

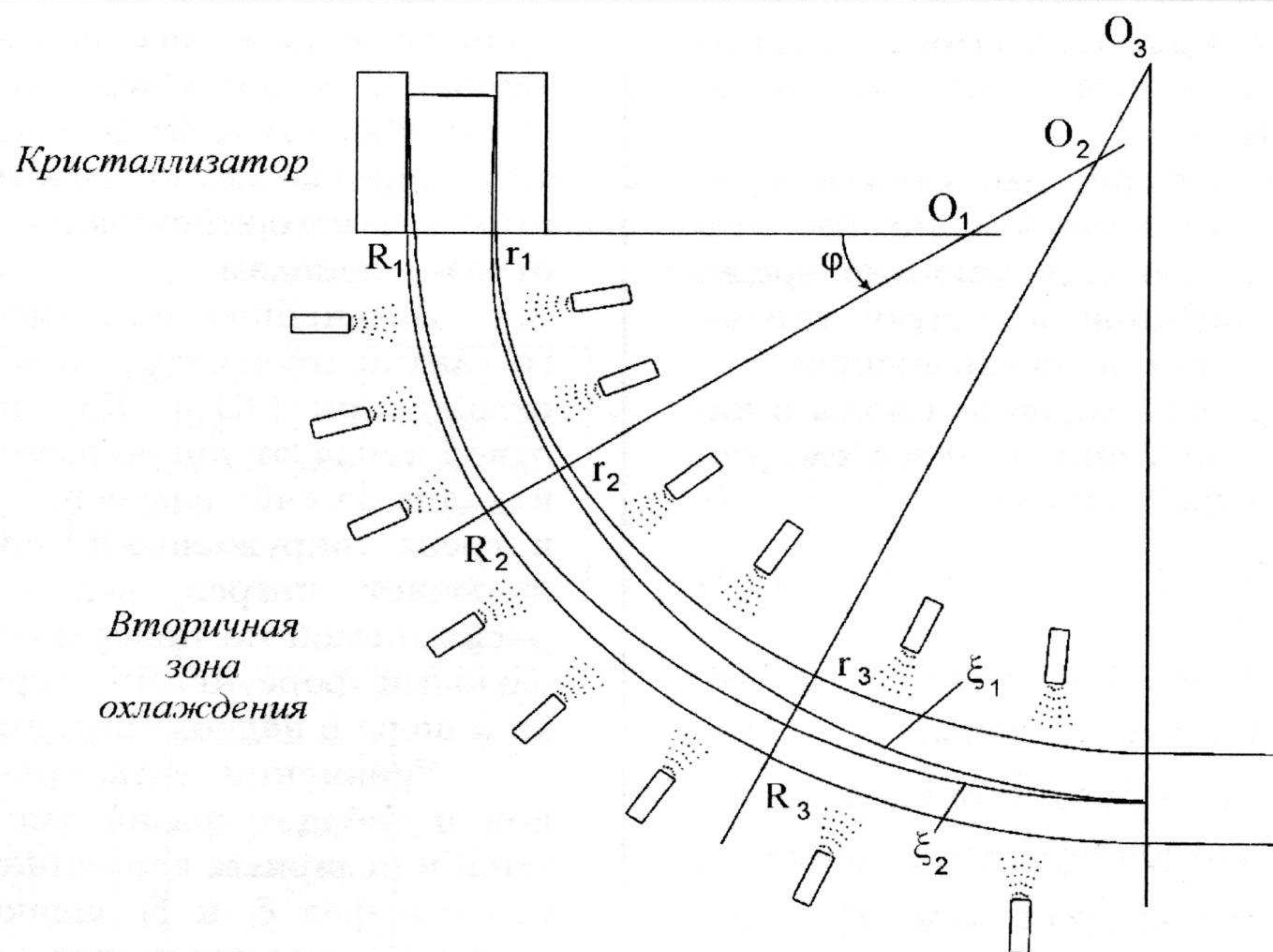


Рис.3. Тепловая схема вторичной зоны охлаждения

**Выводы.**

Таким образом, определены основные функции системы управления объектом. На основе анализа указанных функций разработана иерархическая структурная схема компьютерной системы управления, которая позволяет максимально автоматизировать процесс непрерывной разливки стали. Предложены математические модели тепловых процессов, выполнена постановка основных задач управления в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения.

**Список литературы.**

1. В.Г. Лисиенко, В.И. Лобанов, Б.И. Китаев. Теплофизика металлургических процессов. М., «Металлургия», 1982.
2. Н.А. Гольдман, А.Б. Успенский, Е.Н. Соболева, Е.Г. Шадек. Численный метод определения граничного режима на поверхности непрерывного слитка по профилю фронта затвердевания. ИФЖ, №4, Т. XXVII, октябрь 1974.
3. А.М. Мейрманов. Задача Стефана. Новосибирск, Наука, 1986.

УДК 681.512:622:24

©Семенцов Г.Н., Фадеева О.В., 2006

**Формування шкал лінгвістичних термів для входних сигналів нечітких пристроїв контролю параметрів процесу буріння свердловин на нафту і газ**

Семенцов Г.Н., докт. техн. наук, проф., Фадеева О.В.  
(ІФНТУНГ, Івано-Франківськ)

Розглядається методика формування шкал лінгвістичних термів для входних сигналів нечітких пристроїв контролю режимних параметрів і показників процесу буріння свердловин на нафту і газ, як нелінійного динамічного об'єкта, що функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності за наявності різного типу завад.

Розробка методів формування шкал лінгвістичних термів для входних сигналів нечітких пристроїв контролю і управління є актуальною задачею у зв'язку з інтенсивним впровадженням методів нечіткої логіки в системах контролю і автоматизації технологічними процесами буріння нафтових і

газових свердловин [1-2]. Проте, аналіз літературних джерел (наприклад, [1,3] та ін.) показує недостатній об'єм проведених досліджень в напрямку досліджень методів формування шкал лінгвістичних термів. Тому метою даною роботи є створення методики формування шкал лінгвістичних тер-