

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Ткаченко В.Н., Иванова А.А., Волуева О.С.

Донецкий национальный технический университет, г.Донецк

кафедра автоматизации и телекоммуникаций

Донецкий институт прикладной математики и механики

E-mail: tkachenko@iamm.ac.donetsk.ua, ivanova@iamm.ac.donetsk.ua,
voluteva@fcita.dn.ua

Abstract

Tkachenko V.N., Ivanova A.A., Volueva O.S. The basic functions of the computer-based continuous steel casting process control system. The basic functions of continuous steel casting control system are identified. The hierarchical structural scheme of the control system which allows the maximum automatizing of the continuous steel casting process are developed. Mathematical models of heat transfer process are proposed. The principal mold and secondary cooling zone control problems are set.

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).

Анализ основных функций компьютерных систем управления технологическими процессами на участке непрерывной разливки стали.

Для построения компьютерной системы автоматического управления необходимо решить следующие основные задачи:

- 1) проанализировать технологический процесс как объект автоматического управления;
- 2) выделить основные функции, которые будет выполнять разрабатываемая система;
- 3) определить рациональное количество уровней разрабатываемой системы с точки зрения охвата основных задач автоматизации процесса;
- 4) определить границы функционирования системы.

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:

- 1) процессы подготовки стальной и промковшей;
- 2) процессы подготовки МНЛЗ к разливке;
- 3) 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 промковшей. Соответственно, ее основной функцией является измерение веса промковшей 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 разрабатываемой 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 состоянии 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 внештатных 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).

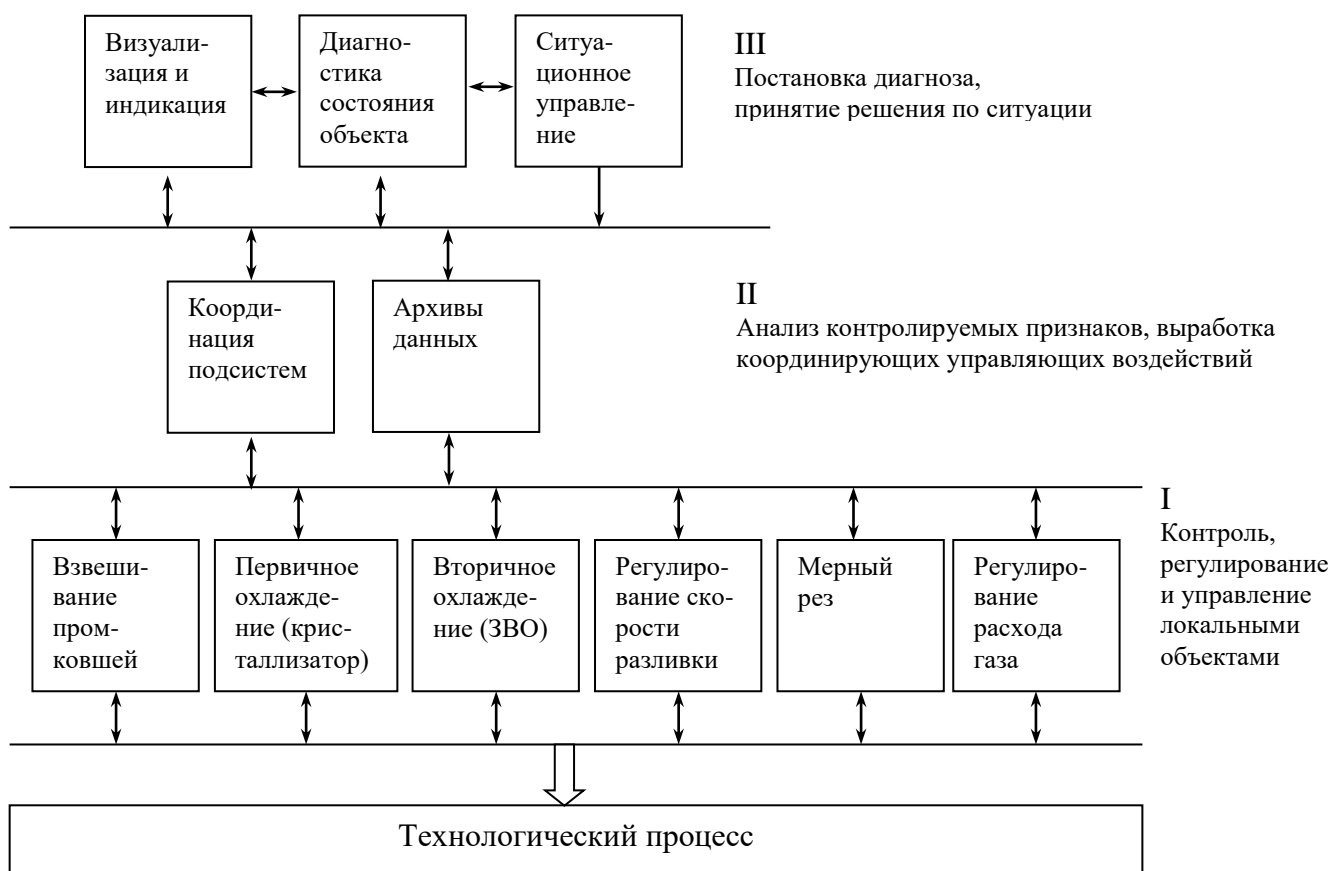


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления технологическим процессом непрерывной разливки стали

Комплексное использование подсистем позволит не только улучшить качество слитков, оптимизировать весь процесс, но и обеспечит надежную диагностику, настройку и следовательно уменьшит вероятность преждевременного износа оборудования и травмирования обслуживающего персонала.

Задача управления охлаждением кристаллизатора.

Важнейшими параметрами, которые должны быть соблюдены в процессе разливки 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 не меньше 30 – 35 мм, 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 найти расход охлаждающей воды в канале кристаллизатора, такой чтобы на выходе из кристаллизатора толщина твёрдой 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].

При переходе от подвижной системы координат, связанной со слитком, к неподвижной системе связанной с кристаллизатором, получаем следующие уравнения теплопроводности для металла:

$$v \frac{\partial T_i(x, z)}{\partial z} = \frac{1}{c_i(T_i) \rho_i(T_i)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial z} \right] \right\},$$

$$i = \begin{cases} 1, & 0 < x < \xi \\ 2, & \xi < x < l \end{cases},$$

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; ρ_1, ρ_2 – плотность; λ_1, λ_2 – теплопроводность; ξ – граница раздела фаз.

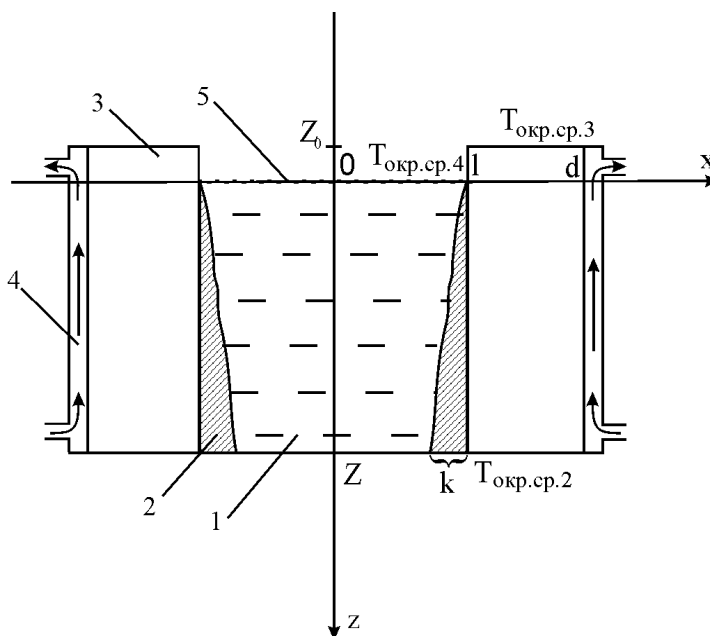


Рисунок 2 - Тепловая схема кристаллизатора (1 — жидкая фаза, 2 – твёрдая фаза, 3 – стенка кристаллизатора, 4 – охлаждающая вода, 5 – зеркало расплава)

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

Уравнение теплопроводности для стенки кристаллизатора выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_c(T_c) \frac{\partial T_c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_c(T_c) \frac{\partial T_c}{\partial z} \right] = 0,$$

где λ_c – теплопроводность внутри стенки кристаллизатора, T_c – температура стенки кристаллизатора.

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:

$$c_\epsilon S_\epsilon v_\epsilon \frac{\partial T_\epsilon}{\partial z} = P_c \alpha_1 (T_\epsilon - T_c|_{x=d}) - P_{\epsilon n} \alpha_{\epsilon n} (T_\epsilon - T_{\epsilon n}),$$

где c_ϵ – объёмная теплоёмкость воды; S_ϵ – сечение для прохода воды; v_ϵ – скорость воды; P_c – периметр стенки кристаллизатора; α_1 – коэффициент теплоотдачи от стенки кристаллизатора к воде; $P_{\epsilon n}$ – периметр внешней стенки; $\alpha_{\epsilon n}$ – коэффициент теплоотдачи от воды к внешней стенке, T_ϵ – температура воды, $T_{\epsilon n}$ – 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 задачи 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.

Задача управления охлаждением слитка в зоне вторичного охлаждения.

Дальнейшее охлаждение непрерывного слитка производится в зоне вторичного охлаждения. Как правило, во вторичной зоне 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.

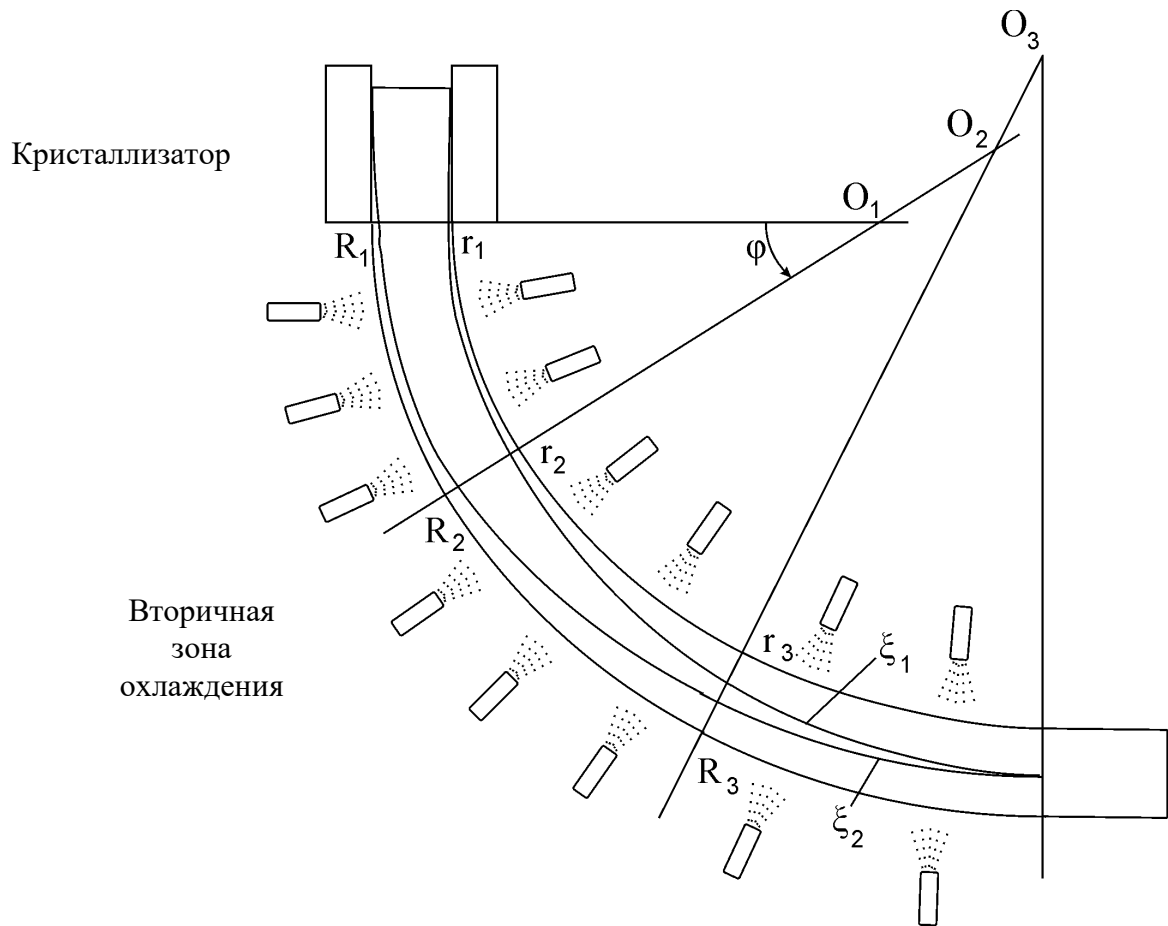


Рисунок 3 - Тепловая схема вторичной зоны охлаждения

Для вторичной зоны охлаждения уравнения теплопроводности в жидкой и твёрдой фазах, записанные в полярных координатах, имеют следующий вид:

$$v \left(\frac{\partial T_i}{\partial r} \sin \varphi + \frac{\cos \varphi}{r} \frac{\partial T_i}{\partial \varphi} \right) =$$

$$= \frac{1}{c_i(T_i) \rho_i(T_i)} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial \varphi} \right) + \frac{\lambda_i(T_i)}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right)$$

$$i = \begin{cases} 1, & \xi_1 < r < \xi_2 \\ 2, & r_j < r < \xi_1, \xi_2 < r < R_j \end{cases}, j = 1, \dots, n,$$

где ξ_1, ξ_2 – границы раздела фаз, r_j – внутренний радиус заготовки на j -м участке, R_j – внешний радиус заготовки на j -м участке, n – количество секций ЗВО.

На границах раздела фаз ξ_1 и ξ_2 задаётся 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:

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

- по внешнему радиусу:

$$-\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_j (G_{\epsilon}^j) [T_{\epsilon} - T(R_j, \varphi)] + \sigma_j [T_{\text{окр.ср.}j}^4 - T^4(R_j, \varphi)], \quad j = 1, \dots, n,$$

где G_{ϵ}^j – расход воды в j -й секции ЗВО, α_j – коэффициент теплоотдачи от поверхности слитка к охлаждающей воде, σ_j – приведённый коэффициент излучения.

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:

1) окончание процесса затвердевания непрерывного слитка в конце зоны вторичного охлаждения;

2) 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:

1) глубина жидкой фазы равна L ;

2) температура поверхности слитка находится в области пластических деформаций;

3) температура поверхности слитка является строго убывающей функцией по переменной φ .

Выводы.

Таким образом, были 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.

Литература

1. В.Г. Лисиенко, В.И. Лобанов, Б.И. Китаев. Теплофизика металлургических процессов. М., «Металлургия», 1982.
2. Н.Л. 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.