

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»



На правах рукописи

Салихов Кирилл Зуфарович

**Адаптивная система автоматического управления процессом
охлаждения крупного стального слитка в ЗВО МНЛЗ: модели
и алгоритмы**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами» (в металлургии)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2011 г.

Работа выполнена на кафедре «Компьютерные информационные и управляющие системы автоматизи» Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки России,
доктор технических наук, профессор
Салихов Зуфар Гарифуллович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Генкин Аркадий Львович

кандидат технических наук,
Соболев Александр Иванович

Ведущая организация: Государственное учреждение Министерства образования и науки «Московский государственный вечерний металлургический институт»

Защита состоится «23» марта 2011 г. В 14-00 на заседании Диссертационного совета Д 212.132.07 при Национальном исследовательском технологическом университете «Московский институт стали и сплавов» по адресу: 119049, г. Москва, Крымский вал, д. 3, аудитория К-325

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Автореферат разослан «22» февраля 2011 г.

Отзывы и замечания по автореферату в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации, просьба выслать по адресу: **119049, г.Москва, Ленинский пр-т, д.4** на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.132.07,
кандидат технических наук, профессор



Е.А.Калашников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы:

Традиционно применяемые САУ, реализующие форсуночные способы управления процессом охлаждения крупных стальных слитков непрерывного литья в МНЛЗ (радиального типа) базируются на использовании математических моделей, исходные параметры которых для расчета и формирования управляющих воздействий имеют нестационарный и вероятностный характер. Например, площадь факела форсунки, через которые подается хладагент на поверхность слитка, существенно зависит от давления или расхода хладагента, а параметры лунки с жидкой сталью внутри кристаллизующегося металла вообще не контролируются. Принятые для моделирования коэффициенты теплопередачи изменяются в широких пределах из-за контакта хладагента с растворенными солями, взвесями, пылью, нефтепродуктами и окалиной, что в свою очередь может привести к полной потере управляемости процессом охлаждения слитка и авариям на МНЛЗ и снижению производительности последнего. Известно также, что расход охлаждающего агента при форсуночном способе значительно больше, чем теоретически требуется, т.е. велики расходы электроэнергии на перекачку хладагента через форсунки. Кроме того, до настоящего времени не изучены закономерности движения хладагента (воды и др.) на поверхностях слитка.

Безусловно, в условиях выхода России на мировой рынок с проектами прокладки газо-нефтепроводных стальных труб крупного размера, задача повышения качества и снижения их себестоимости приобретает особую важность для экономики России.

Отмеченная задача наиболее экономично и быстро может быть решена за счет **модернизации принципов управления процессом охлаждения слитка, повышения информативности процесса и на их базе – задача создания прогрессивной системы автоматического управления (САУ) процессом охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения (ЗВО), является актуальной.**

Актуальность решения задачи модернизации информационной части и принципов построения САУ процессом охлаждения непрерывно-литого стального слитка – сляба обусловлена значительным объемом брака до 20% заготовок из МНЛЗ, их низкой конкурентоспособностью и антисанитарными условиями обслуживания средств КИП и автоматики, а также низких сроков службы последних.

Цель работы: исследование и модернизация способов и средств автоматического контроля технологических параметров и управления процессом охлаждения стальных слитков в ЗВО МНЛЗ, обеспечивающих снижение объема некондиционных заготовок, расхода хладагента и электроэнергии, улучшение санитарно-гигиенических условий обслуживания МНЛЗ и повышение ее производительности за счет управляемости и контролируемости процесса охлаждения слитка.

Решение сформулированной актуальной научно-технической задачи и достижение цели работы, обеспечивается:

- исследованиями закономерности эффективного использования хладагента при форсуночном охлаждении слитка в ЗВО МНЛЗ;
- модернизацией способа и устройства охлаждения слитка и улучшения информационной части САУ на основе выдвинутой автором **идеи прямого контроля в реальном времени коэффициентов теплоотдачи слитка охлаждающему агенту в зоне ЗВО и других ранее неконтролируемых параметров состояния объекта;**
- разработкой: многозонных математических моделей нестационарности процессов форсуночного и роликового охлаждения движущегося слитка; идентификацией их моделей; разработкой алгоритмов формирования управляющих воздействий по новому способу и устройству теплосъема со слитка и функционирования компьютерного моделирования процесса взаимодействия охлаждающего агента с поверхностями слитка в ЗВО;
- созданием САУ процессом охлаждения слитка на основе модернизированных способов и средств теплосъема, новых математических моделей и алгоритмов, внедрение которых обеспечивает снижение объема некондиционных заготовок, улучшение санитарно-гигиенических условий обслуживания, снижение расхода охлаждающего агента и расхода электроэнергии на его транспортировку, а также повышение безаварийности и производительности МНЛЗ;
- подтверждением эффективности и работоспособности модернизированной САУ с новыми алгоритмами и математическими моделями ее функционирования.

Автор выносит на защиту: математическую и физическую модели динамики движения охлаждающего агента при форсуночном охлаждении крупного стального слитка в ЗВО МНЛЗ и результаты исследования на них закономерностей использования хладагента и зоны изменения управляющих воздействий;

- новые способ и средства охлаждения слитка в ЗВО МНЛЗ;
- методологию математического моделирования нового процесса охлаждения слитка в ЗВО и математические зависимости для непрерывного контроля коэффициентов теплоотдачи и интенсивности охлаждения движущегося слитка;
- алгоритмы динамического компьютерного моделирования и идентификации математической модели модернизированного способа охлаждения слитка;
- адаптивную САУ модернизированным процессом охлаждения крупного стального слитка (сляба) в ЗВО и результат имитационного моделирования ее функционирования.

Научная новизна работы состоит: впервые разработаны: физическая и математическая модели динамики распределения охлаждающего агента (воды) при форсуночном охлаждении слитка в ЗВО МНЛЗ; алгоритмы идентификации математической модели и компьютерного моделирования;

- экспериментальными и теоретическими исследованиями выявлено, что подача хладагента через форсунки на поверхность крупного слитка образует ламинарный нетеплопроводный поток нагретого хладагента, резко снижающий чувствительность теплоотдачи к изменению управляющего воздействия – расхода воды и обуславливает снижение к.п.д. использования хладагента на (30 – 40)%;
- впервые установлено, что процессом охлаждения слитка можно управлять только в узком диапазоне изменения форсуночного охлаждения;
- впервые разработаны новый способ и средства охлаждения слитка в ЗВО, заключающиеся в том, что охлаждающий агент подают под давлением через направляющие ролики МНЛЗ, выполненные полыми и заполненные медными шариками, совокупность которых создают турбулентный поток охлаждающего агента, непрерывно измеряют температуру входного и выходного потока и по их разнице определяют в реальном времени фактические значения коэффициентов теплоотдачи, а по разнице температур выходных потоков хладагента из соседних полых роликов непрерывно определяют границы жидкой фазы слитка;
- впервые использован метод многозонного разбиения поперечного сечения слитка при разработке математической модели модернизированного роликового охлаждения слитка, обеспечивающая расчет материальных и тепловых потоков в сечениях

слитка при его непрерывном движении вдоль технологической оси МНЛЗ с учетом реальных значений коэффициентов теплосъема и интенсивности охлаждения слитка;

- на основе модернизированного способа охлаждения крупногабаритных непрерывнолитых слитков, создана адаптивная САУ, в состав структуры которой входят алгоритм управления температурным профилем слитка-сляба в ЗВО-Р и идентификатор моделью процесса охлаждения слитка полыми роликами с турбулентным потоком хладагента, выполняющий функции наблюдения и адаптации системы по результатам прямого контроля значений коэффициентов теплосъема в реальном времени движения слитка, а также непрерывного контроля размера границы жидкого и кристаллического состояния металла в слитке.

Практическая ценность работы. Созданные математическая и физическая модели форсуночного охлаждения слитков в ЗВО и алгоритм ее идентификации позволяют определить эффективность использования хладагента для конкретной МНЛЗ, а также научно обоснованное принятие решения о необходимости ее модернизации и оценки неэффективных зон управления процессом форсуночного охлаждения слитка.

Предложенный новый способ охлаждения позволяет практически полностью снять антисанитарные условия обслуживания процесса охлаждения крупных и малых слитков, обеспечивает переход от вероятностных методов управления процессом охлаждения к точным методам и повышать точность управления в 2 раза, что исключает возможность появления трещин и других дефектов на слитке. Снизить расход хладагента, стабилизировать его теплосъемные характеристики за счет отсутствия контакта с солями, пылью, нефтепродуктами и турбулентности потока в зоне съема тепла, обеспечивает экономию электроэнергии (на 30 – 40)%.

Предложенный в работе прямой контроль границы жидкой и кристаллизовавшейся части металла в слитке исключают опасные аварийные ситуации на МНЛЗ.

Созданная адаптивная САУ после заполнения ее базы знаний по результатам длительной эксплуатации может дополнительно выполнять функции тренинговой и интеллектуальной системы..

Реализация результатов. Проведено испытание адаптивной САУ, математических моделей и алгоритмов в имитационном режиме на опытной площадке ЗАО «КонСОМ СКС». Кроме того, результаты работы используются при подготовке высококвалифицированных специалистов в ВУЗах (имеются акты).

Методы исследования. Классические и авторские методы построения математических моделей, идентификация их численными и экспериментальными методами, и построением алгоритмов на основе математических зависимостей, полученных фундаментальными исследованиями автора с последующей проверкой их эффективности в составе испытанной адаптивной САУ.

Достоверность результатов. Обеспечивается строгостью применяемых математических аппаратов, теорий кристаллизации, ТАУ и подтверждается результатами численного и имитационного моделирования, а также испытаниями на физических моделях и патентами на изобретения России.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на 5-ти международных и всероссийских конференциях, научно-практических семинарах (приведены в составе источников литературы) и всероссийских выставках (получена золотая медаль).

Публикации. По теме опубликовано 12 работ, в том числе, в изданиях входящих в перечень ВАК – 3 работы и 3 патента на изобретения России.

Диссертация состоит из 4-х глав, заключения и списка литературы.

Личный вклад соискателя. Основные положения выносимые на защиту, новые математические модели, алгоритмы, основные подходы к построению адаптивной САУ процессом модернизированного охлаждения и результаты имитационного моделирования принадлежат аспиранту. Изобретения созданы с его творческим участием на базе результатов исследований аспиранта.

Краткое содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности и важности темы диссертации, сформулированы цель и вопросы исследования, научная новизна и практическая значимость работы, основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приводится анализ методов, моделей, принципов построения САУ процессом охлаждения непрерывнолитых крупных стальных слитков в ЗВО. Анализируется мировой опыт построения математических моделей для прогноза кристаллизации и способы охлаждения жидкого металла в слитке. Особое внимание уделяется на отсутствии прямых методов и средств контроля параметров жидкой фазы

слитка, определению границ затвердевшей его части и нестационарности характеристик форсуночного способа и средств (форсунок) распределения хладагента по поверхностям непрерывно движущегося слитка. Отмечается, что САУ, построенные на базе прогнозирующих моделей и эмпирических зависимостей не всегда могут с необходимой точностью обеспечить охлаждение слитков, особенно крупных, из условия получения требуемого качества заготовок. Объем бракованных заготовок доходит до 30%, а потери хладагента до 30 – 40%, что обуславливает перерасход значительного количества электроэнергии, повышает себестоимость и снижает конкурентоспособность стальных изделий. Потеря управляемости и контролируемости процесса охлаждения слитка иногда приводит к опасным авариям. В результате анализа выдвинута идея непрерывного высокоточного контроля: коэффициентов теплосъема слитка, границ кристаллизации жидкой стали внутри слитка и температуры и интенсивности ее изменения на поверхностях движущегося слитка-сляба на МНЛЗ.

В заключительной части 1-ой главы сформулированы вопросы исследования диссертанта, предполагающие, что совокупность решения этих вопросов позволяет решить сформулированную актуальную научно-техническую задачу.

Во второй главе исследованы закономерности распределения хладагента на плоских поверхностях крупных стальных слитков-слябов в процессе их охлаждения в ЗВО с форсуночным способом охлаждения. Такие исследования при анализе состояния техники не выявлены и наши предварительные экспериментальные исследования показали, что динамика распределения хладагента при форсуночной его подаче весьма неравномерна и существенно влияет на качество заготовки. Для более глубокого изучения этого процесса, в рамках диссертационного исследования были разработаны физическая и математическая модели процесса форсуночного охлаждения плоского слитка в ЗВО, произведена идентификация модели и предложены алгоритмы компьютерной ее реализации и идентификации. Разработан программный модуль, реализующий численные расчеты динамики массы хладагента на поверхности заготовки, его температуры в каждой зоне рассматриваемого участка ЗВО.

Охлаждающий агент (вода), попадая на верхнюю поверхность слитка создает пограничный слой, который обеспечивает ламинарное течение в дальнейшем. Вода беспрепятственно стекает по плоской поверхности слитка, постепенно нагревается и испаряется, однако ей не дает полностью испариться вновь поступающая охлаждающая

вода из форсунок. В результате значительная часть охлаждающей воды не испаряется, а нагревается и стекает с поверхности слитка, т.е. не в полной мере выполняет свое предназначение. Согласно предложенной на рис. 2.3* схеме, было составлено математическое описание динамики распределения хладагента на поверхности, которое подробно описано в наших работах [1, 3]. При разработке математической модели была использована методика многозонного моделирования, что позволило разработать вычислительный комплекс, осуществляющий расчет распределения масс слоев хладагента и значения их температур по всей длине выбранной секции ЗВО МНЛЗ. Точность расчетов обеспечивается за счет тонкой настройки параметров математической модели по экспериментальным данным, полученным на разработанной автором физической модели водоструйного охлаждения.

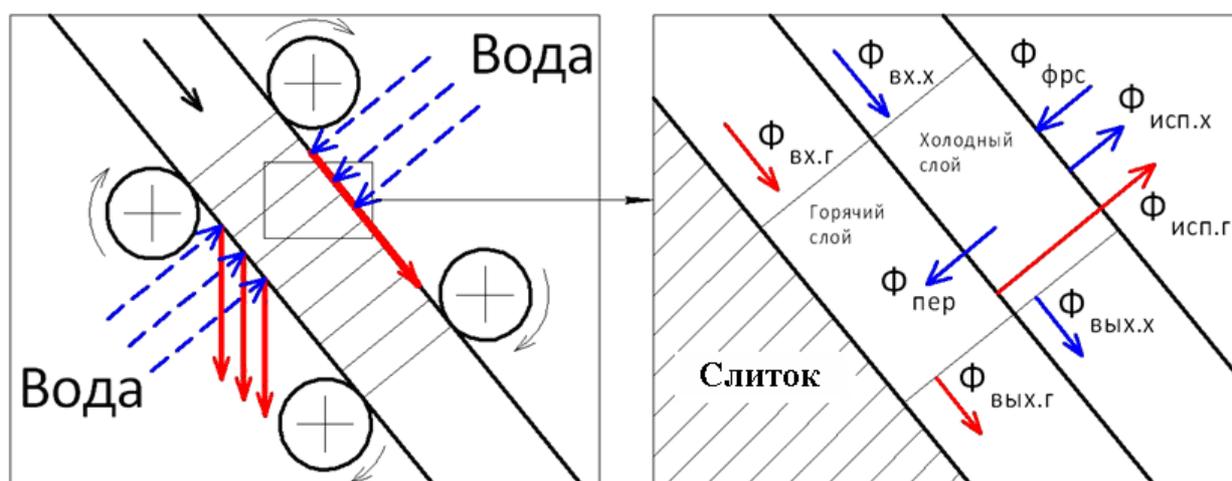


Рис.2.3. Схема распределения хладагента по поверхности слитка при форсуночном водном охлаждении

Параметрическая идентификация проведено на методе стохастической аппроксимации по критерию минимизации квадратичной ошибки. С учетом регламентированности объема автореферата, промежуточные математические выражения из диссертации не приводятся, а приводится блок-схема алгоритма идентификации и численного моделирования динамики охлаждающей воды на поверхности слитка (рис.2.7). Данный программный модуль будет применен в качестве дополнения к существующим САУ для оценки эффективности способов охлаждения в ЗВО МНЛЗ, а также для использования в качестве исследовательской модели при определении необходимости модернизации способов и средств управления процессом охлаждения слитка в ЗВО.

* Обозначения, номера рисунков и формул совпадают с обозначениями в диссертации.

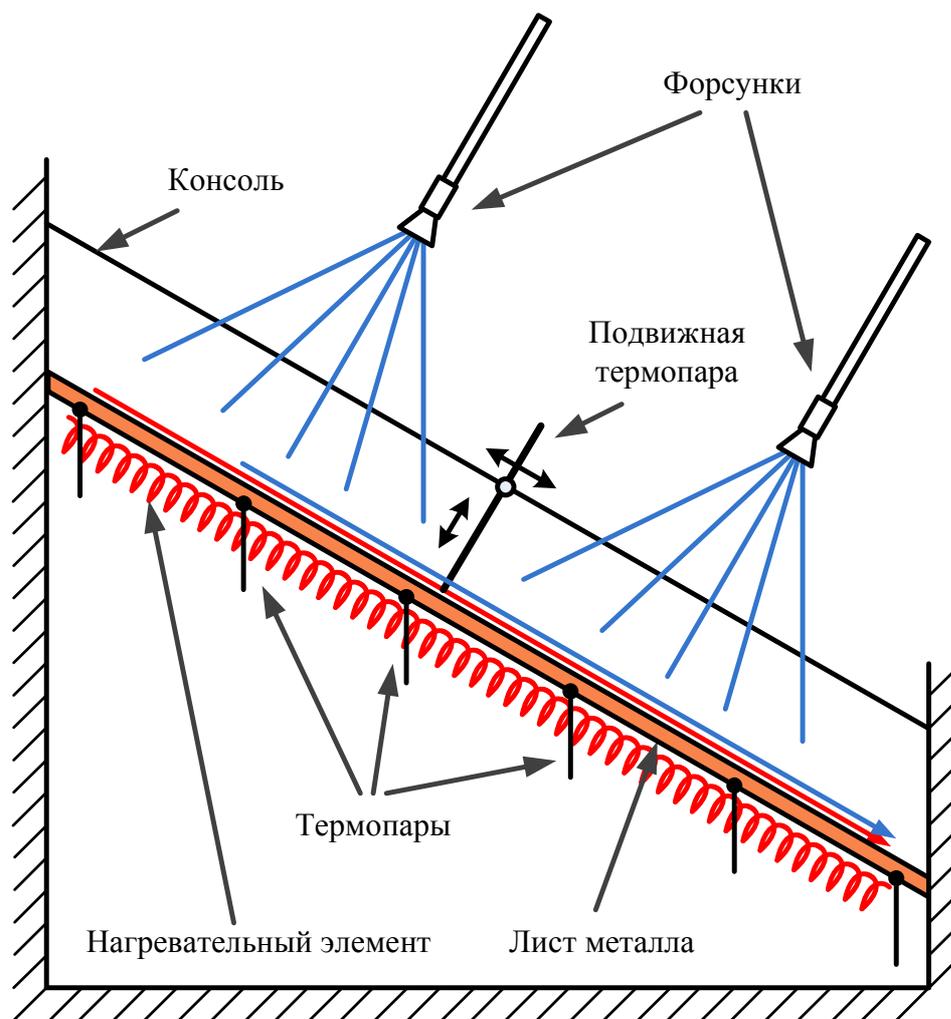


Рис. 2.6 Схема физической модели

Анализ результатов компьютерного моделирования процесса движения хладагента по поверхности слитка при форсуночном охлаждении:

- **из графиков на рис. 2.8 видно: с увеличением расхода охладителя на поверхность слитка с меньшим радиусом толщина образующегося теплоизолирующего слоя растет, а температура этого слоя уменьшается, т.е. чувствительность температурного поля слитка к росту охладителя снижается;**

- **эффективность использования или к.п.д. охладителя подаваемого через форсунки на поверхность слитка меньшего радиуса кривизны снижается на 30 – 40 % с увеличением расхода охладителя. Такое явление подтверждает выдвинутую идею автора о том, что форсуночное охлаждение слитка ограничено узким диапазоном изменения управляющего воздействия, т.е. при увеличении расхода охладителя происходит снижение эффективности его воздействия на съем тепла со слитка, а при уменьшении существенно нарушается требуемая равномерность распределения**

охлаждателя из-за изменения формы факела форсунки, т.е. в обоих случаях снижается возможность управления качеством получаемой заготовки;

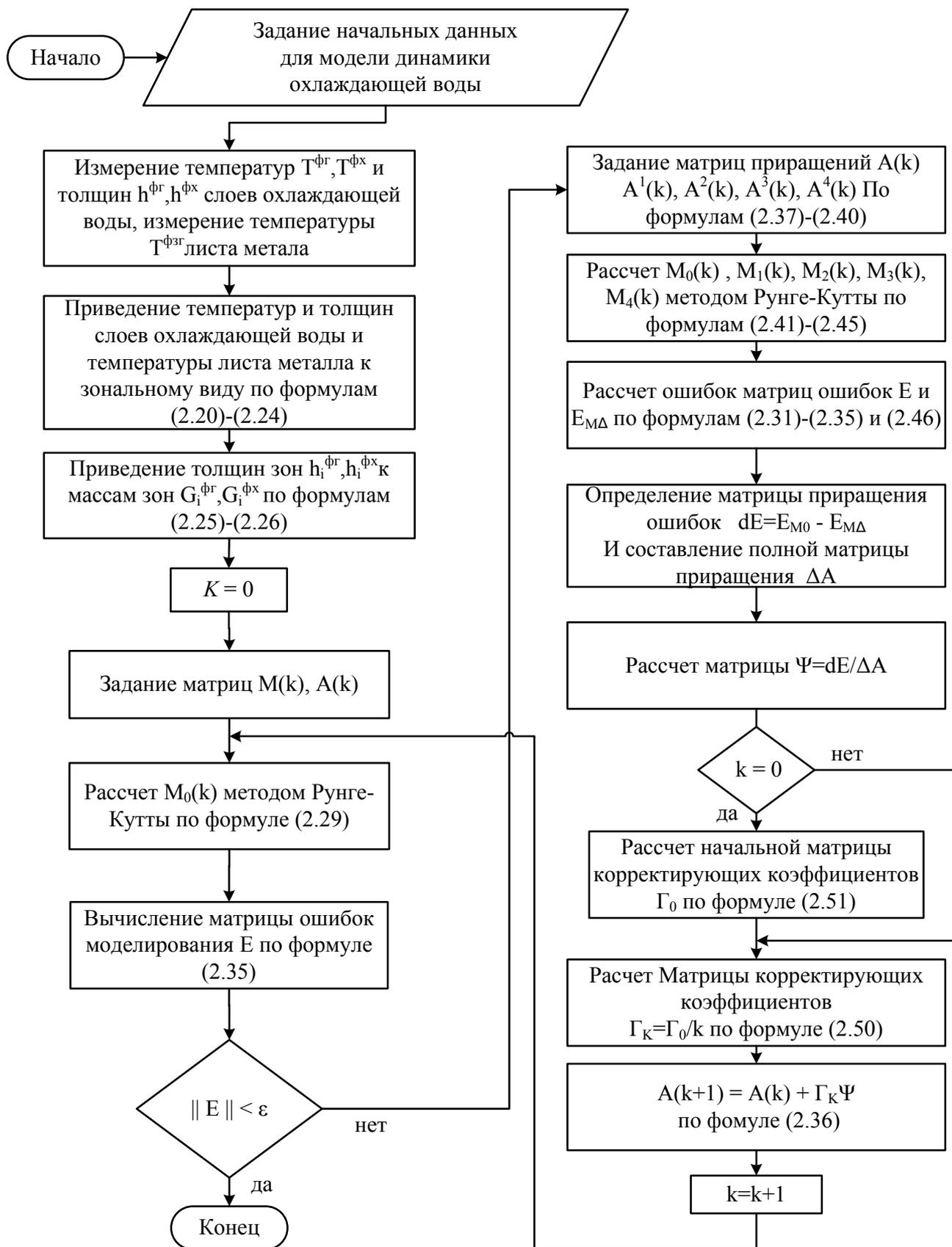


Рис. 2.7 – Блок-схема алгоритма идентификации математической модели динамики охлаждающей воды

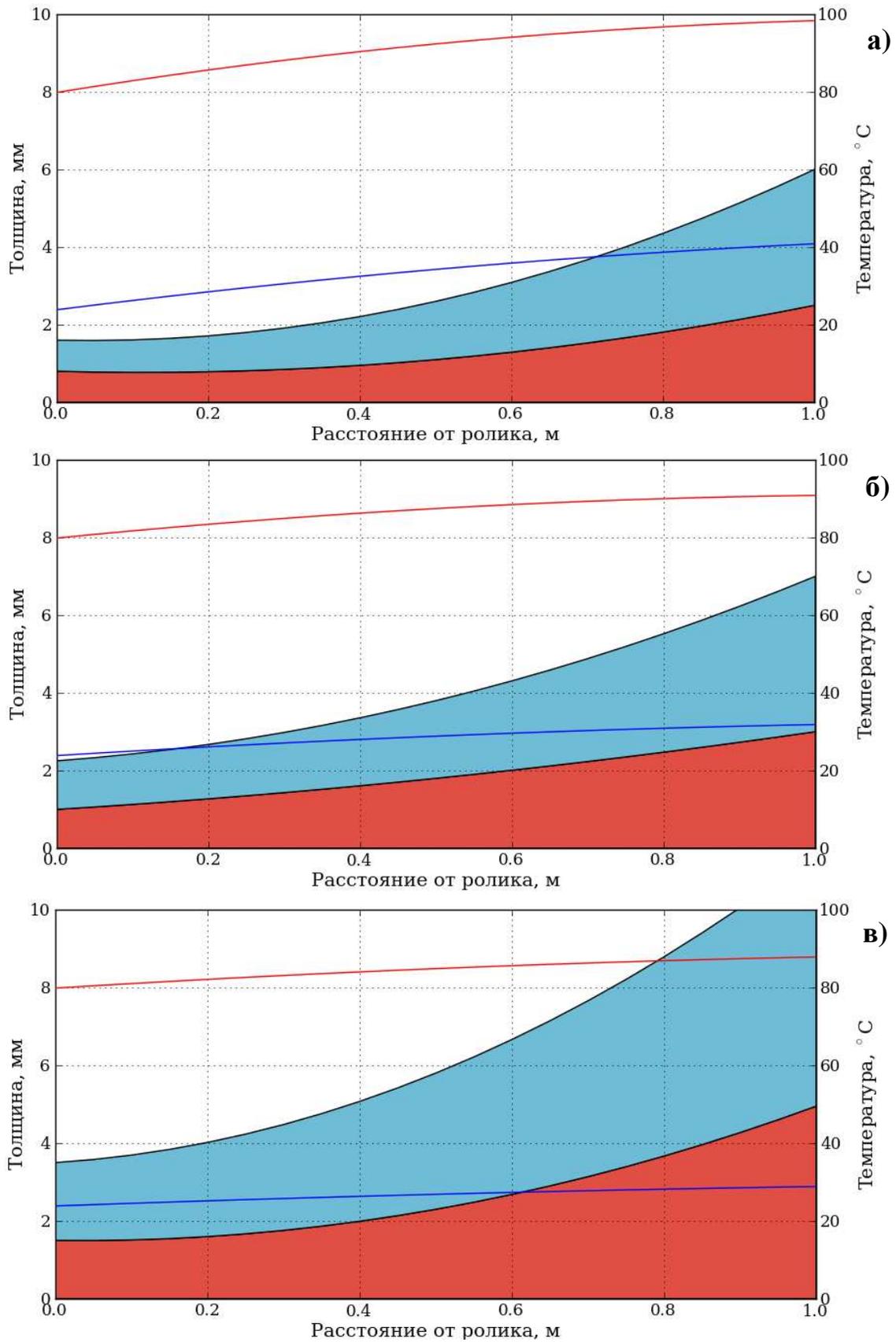


Рис. 2.8 – Диаграмма изменения толщины слоев горячей и холодной воды в межроликовом пространстве при расходе хладагента через форсунки:
а) $2 \text{ м}^3/\text{ч}$; б) $4 \text{ м}^3/\text{ч}$; в) $6 \text{ м}^3/\text{ч}$

- подтверждается необходимость совершенствовании способов и средств подачи охладителя на слиток.

Разработанная математическая модель полезна для определения технологически и экономически (сокращение электроэнергии на управляемую подачу охладителя на процесс охлаждения) допустимых пределов изменения расхода охладителя слитка в ЗВО МНЛЗ.

Модель также полезна для обоснования необходимости и оценки эффективности модернизации любой МНЛЗ с форсуночным охлаждением.

В главе 3 приводятся материалы о новом способе и устройстве управления процессом охлаждения слитка на основе контактного метода съема тепла и разработка математической модели (модернизированного) процесса охлаждения слитка в ЗВО.

Из результатов исследований главы 1 сделан вывод, что одной из основных причин низкого качества крупных слитков после охлаждения в ЗВО является ограниченность управления форсуночным охлаждением. Возникает необходимость поиска альтернативных способов охлаждения слитка, а также расширения зон управления. На первом этапе реализации нового способа и средств теплосъема следует их рассматривать как дополнительные составляющие системы управления процессом охлаждения слитка в ЗВО; и только по мере освоения новых разработок, придать им соответствующие приоритеты. В главе 3 предлагается новый способ и средства охлаждения и измерения параметров охлаждения, математическая модель процесса нового – роликового охлаждения слитка и методика идентификации математической модели усовершенствованной системы управления процессом охлаждения слитка в ЗВО МНЛЗ; алгоритм численного динамического моделирования теплового состояния слитка, движущегося вдоль технологической оси МНЛЗ, который используется при формировании управляющих воздействий на процесс охлаждения слитка по новому способу охлаждения.

В работе [2] предложен новый принцип построения САУ процессом охлаждения заготовки в ЗВО МНЛЗ, согласно которому сначала (до начала литья заготовки) определяют расчетным путем или с использованием известной математической модели вероятностной кристаллизации слитка «SLITOK» (разработка фирмы «УРАЛМАШ-ИНЖИНИРИНГ МО») – температурное поле слитка вдоль технологической оси ЗВО. Затем, **вне реального времени**, с учетом заданного состава и температуры заливаемого жидкого металла, определяют регламентную траекторию изменения интенсивности

теплообмена из условия вероятного обеспечения необходимого качества заготовки при исходных условиях процесса ее литья и скоростях разливки, движения слитка по направляющим и вытягивающим роликам. После этого, из условия выполнения регламентной интенсивности охлаждения слитка, рассчитывают расходы охладителя по охлаждающим слиток элементам ЗВО. При этом **в качестве модернизированных охлаждающих заготовку элементов используют полые направляющие и/или вытягивающие ролики, расположенные в ЗВО вдоль по технологической линии МНЛЗ.** Для испытания эффективности этой операции стандартные упомянутые **цельные или водоохлаждаемые (с проточками) ролики заменяют на полые ролики и в полость под напором 2 – 8 кгс/см²,** подают охладитель (воду, жидкий азот и т.д.) и создают тем самым поток охладителя для одновременного охлаждения заготовки и элементов (самых роликов, подшипников и т.д.). **Охладитель находится в циркулирующей схеме через холодильник или внецеховой теплообменник, поэтому охладитель практически не загрязняется и не теряется.**

Известно, что **коэффициент теплоотдачи от стали к медной поверхности равна 62,8 кВт/(м²·К), а к водной всего 8 кВт/(м²·к).** Поэтому **полые ролики** для охлаждения слитка **изготавливают из меди, что почти в 8 раз увеличивает скорость теплосъема охлаждающим роликом по сравнению с водяными форсунками.** Этот технический результат с одной стороны дает возможность увеличить темп и коэффициенты теплосъема со слитка, т.е. **позволяет увеличение диапазона изменения и быстрое действие управляющего воздействия.** Эти положительные технические эффекты более усиливаются когда полости охлаждающих роликов заполняют **медными шариками, обеспечивающие высокую турбулентность потока охладителя и уменьшить коэффициент теплосъема при низких скоростях вращения роликов за счет неполного использования охладителя.** В последнем случае нижняя часть расслоенного потока охладителя меньше будет снимать тепло с заготовки, т.к. охладитель больше снимет тепло с элементов самого охлаждающего ролика, причем, **это произойдет за счет саморегулирования.** По предлагаемому принципу построения САУ процессом охлаждения [2], непрерывно измеряют температуру хладагента на входе и выходе полового охлаждающего ролика и по их разности определяют интенсивность процесса охлаждения слитка. Полученное значение интенсивности охлаждения слитка сравнивают с регламентным его значением, соответствующим заданным в функции установившихся

величин скорости литья и места расположения соответствующих полых охлаждающих роликов от зеркала кристаллизатора. В случае отсутствия равенства сравниваемых величин, устраняют отклонение путем увеличения или уменьшения расхода охладителя через соответствующие месту установки полых охлаждающих роликов. Перечисленные операции прямого измерения разности температур охладителя на входе и выходе полого охлаждающего ролика, а также сравнение получаемой при этом информации о темпе снятия в единицу времени тепла со слитка и его сравнение происходят с высокой точностью, а ошибка управления процессом охлаждения устраняется практически 8-ми кратным быстродействием.

Для непрерывного формирования сигнала (информации) об изменяющейся величине коэффициента теплоотдачи предложено значения хладагента на входе и на выходе достаточно просто и точно контролировать типовыми быстродействующими термометрами сопротивления. Измерение разности температур на выходах соседних охлаждающих роликов позволяет точно определить характеристики процесса, например, темпа кристаллизации, **время завершения кристаллизации** слитка и объективно формировать величину технологически допустимой скорости вытяжки и темпа его охлаждения слитка в ЗВО.

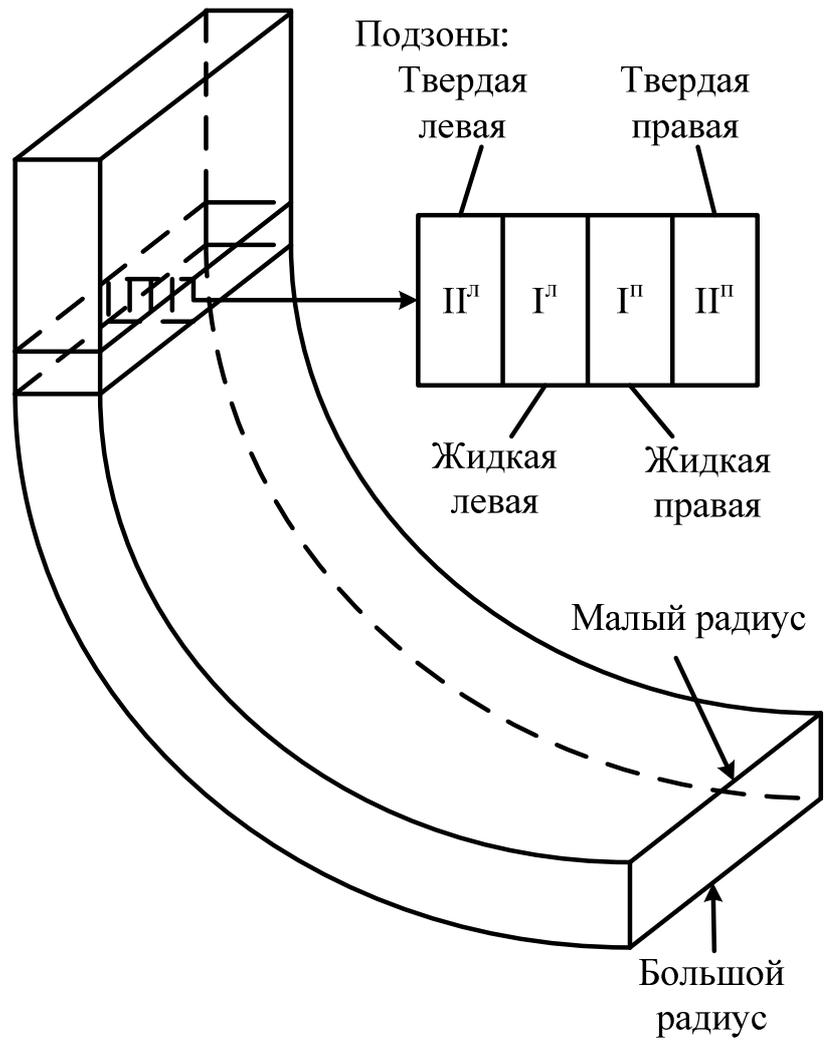
Для разработки системы численного моделирования охлаждения по новому способу, была составлена структурная модель слитка, движущегося вдоль технологической оси ЗВО, рис.3.4.

При этом состояние слитка будет определяться толщиной каждой из подзон ($h_i^{IIл}$, $h_i^{Iл}$, $h_i^{IIн}$, $h_i^{Iн}$), а также температурой металла в этих подзонах ($T_i^{IIл}$, $T_i^{Iл}$, $T_i^{IIн}$, $T_i^{Iн}$). Для описания состояния слитка в классической форме представления задач тепло- и массообмена и используем массу подзон ($G_i^{IIл}$, $G_i^{Iл}$, $G_i^{IIн}$, $G_i^{Iн}$) вместо толщины, рассчитываемую согласно выражению:

$$G_i^q = \frac{d \cdot l \cdot h_i^q}{\rho(T_i^q)}, q = \{I^л, II^л, I^н, II^н\}, \quad (3.1)$$

где d – высота зоны, l – длина зоны, $\rho(T_i^q)$ – плотность металла.

На основании схем массо- (рис. 3.6) и теплообмена (рис. 3.7) были составлены балансовые дифференциальные уравнения, подробно описанные в наших работах [3-4].



II^Л – подзона левой твердой фазы; I^Л – подзона левой жидкой фазы;
 I^П – подзона правой жидкой фазы; II^П – подзона правой твердой фазы.

Рис.3.4. Макроструктурные подзоны в объеме слитка

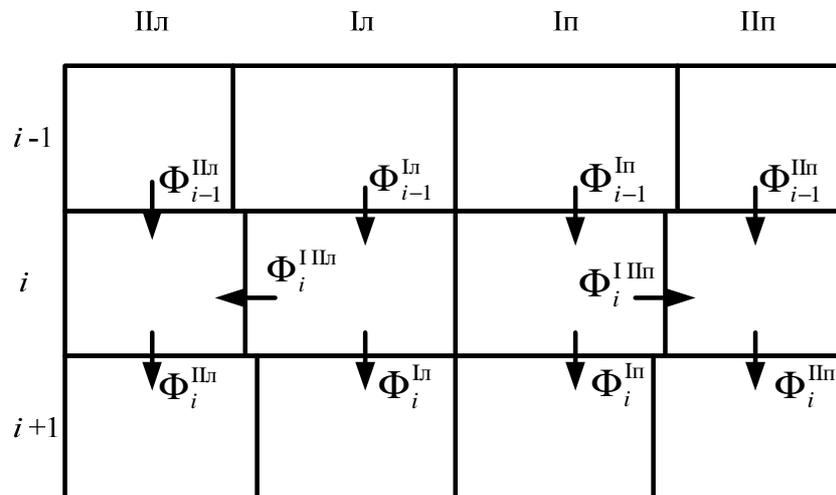


Рис.3.6. Схема массообмена металла от зоны к зоне, происходящего в слитке

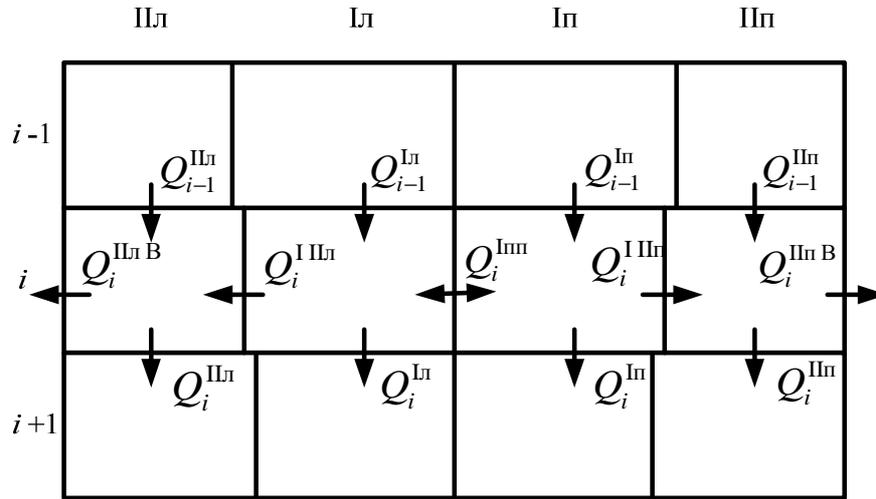


Рис.3.7. Схема теплообмена между зонами и подзонами внутри слитка

Согласно технологической схеме непрерывной разливки стали, основной поток металла в слитке (на интересующем нас участке) движется сверху вниз. Для отдельной зоны это движение определяется величинами: потока металла [кг/сек] ($\Phi_{i-1}^{Шл}, \Phi_{i-1}^{Лл}, \Phi_{i-1}^{Ин}, \Phi_{i-1}^{Пп}$), передаваемого из вышестоящей зоны, для каждой подзоны отдельно; а также потока металла [кг/сек] ($\Phi_i^{Шл}, \Phi_i^{Лл}, \Phi_i^{Ин}, \Phi_i^{Пп}$), передаваемого в нижестоящую зону, также по каждой подзоне. Параллельно, в границах каждой зоны, часть металла кристаллизуется, т.е. переходит из жидкой фазы в твердую. Причем, как мы уже отмечали, это происходит с разной интенсивностью для левой и правой части слитка. Тогда поперечное движение металла характеризуется величинами: $\Phi_i^{Шл}$ – поток металла [кг/сек], кристаллизовавшегося металла из подзоны левой жидкой фазы, $\Phi_i^{Пп}$ – поток металла [кг/сек], кристаллизовавшегося металла из подзоны правой жидкой фазы.

Полученные уравнения материального и теплового баланса имеют классическую структуру, поэтому не приведены в автореферате. Рассмотрим наиболее важные для данного диссертационного исследования, слагаемые балансовых уравнений, описывающих теплообмен. Для вертикального движения тепла присущ как конвективный (так как металл движется), так и кондуктивный теплообмен. Тогда уравнения, характеризующие вертикальное движение тепла, будут иметь вид:

$$Q_i^{Шл} = A_p S_i^{Шл} (T_i^{Шл} - T_{i+1}^{Шл}) + C_p \Phi_i^{Шл} T_i^{Шл}, \quad (3.2)$$

$$Q_i^{Лл} = A_p S_i^{Лл} (T_i^{Лл} - T_{i+1}^{Лл}) + C_p \Phi_i^{Лл} T_i^{Лл}, \quad (3.3)$$

$$Q_i^{Ин} = A_p S_i^{Ин} (T_i^{Ин} - T_{i+1}^{Ин}) + C_p \Phi_i^{Ин} T_i^{Ин}, \quad (3.4)$$

$$Q_i^{\text{IIп}} = A_p S_i^{\text{IIп}} (T_i^{\text{IIп}} - T_{i+1}^{\text{IIп}}) + C_p \Phi_i^{\text{IIп}} T_i^{\text{IIп}}, \quad (3.5)$$

где A_p – коэффициент теплоотдачи, Дж/(м²·с·К), S_i^k – площадь поперечного сечения отдельной подзоны, м², C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); Φ_i^q , $q = \{\text{IIл}, \text{IIп}, \text{IIIл}, \text{IIIп}\}$ – поток металла, по каждой подзоне, кг/с; T_i^q – температура каждой подзоны, К.

В зависимости от того, с какой средой контактирует металл (воздух или теплоотводящий ролик), возможны два варианта – радиационное и контактное.

Определение теплоотвода происходящего за счет радиационного охлаждения осуществляется с помощью формулы:

$$Q_i^{\text{IIпВ}} = \sigma \left[\left(\frac{T_i^{\text{IIп}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cp}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.26)$$

$$Q_i^{\text{IIIлВ}} = \sigma \left[\left(\frac{T_i^{\text{IIIл}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cp}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.27)$$

где $T_i^{\text{IIп}}$, $T_i^{\text{IIIл}}$ – температуры левой и правой подзоны твердой фазы, К; T_{cp} – температура среды, К; σ – коэффициент пропорциональности от степени черноты слитка.

Оценка потоков тепла, отводимого от поверхности слитка с помощью охлаждающих роликов, производится на основании значений температуры и расходы хладагента, измеряемых датчиками на входе и выходе его из ролика, и определяется с помощью формул:

$$Q_i^{\text{IIпВ}} = C_p V_k^{\text{IIп}} (T_k^{\text{IIп2}} - T_k^{\text{IIп1}}) \quad (3.28)$$

$$Q_i^{\text{IIIлВ}} = C_p V_k^{\text{IIIл}} (T_k^{\text{IIIл2}} - T_k^{\text{IIIл1}}), \quad (3.29)$$

где C – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); ρ – плотность воды, кг/м³; $V_k^{\text{IIп}}$, $V_k^{\text{IIIл}}$ – расход воды на правом и левом роликах м³/с; $T_k^{\text{IIп1}}$, $T_k^{\text{IIIл1}}$ – температуры на входе в правый и левый ролик, $T_k^{\text{IIп2}}$, $T_k^{\text{IIIл2}}$ – температуры на выходе, К; k – номер ролика; i – индекс зоны, соответствующей роликовому охлаждению, рассчитываемый как k умноженный на количество зон между двумя смежными роликами. Описание методики параметрической идентификации модели модернизированного управления процессом

охлаждения слитка в ЗВО МНЛЗ подробно приведено в материалах диссертации, а ее алгоритм схож по принципам с алгоритмом, приведенным на рис 2.7.

В четвертой главе дается описание разработки адаптивной системы автоматического управления модернизированным процессом роликового охлаждения слитка в ЗВО МНЛЗ. Результаты исследований, приведенные в предыдущих главах диссертации, дополнили объем достоверной информации о процессе и позволили, при нестационарности самих объектов управления, формировать более точные управляющие воздействия за счет предложенных модернизаций информационной части САУ.

На НТС ОАО «Уралмаш» и ОАО «ММК» было решено вести посекционную замену форсуночного охлаждения на роликовое, начиная от тянущих роликов в сторону кристаллизатора. На рис.4.1 показано такое разделение объекта управления на ЗВО-Ф – форсуночное и ЗВО-Р – роликовое управление охлаждением слитка в ЗВО.

В главе 4 приведены функциональная схема объекта с элементами КИП и автоматикой, сгруппированные векторы управляемых и контролируемых внешних и внутренних параметров объекта ЗВО-Р, совокупность которых позволил составить схему координат состояния объекта. Далее теоретическими исследованиями получены аналоговые и дискретные выражения для ошибки и критерии управления с ограничениями. Разработана адаптивная САУ (далее АСАУ) модернизированным охлаждением слитка ЗВО-Р. Получены также математические выражения для формирования управляющих воздействий и заданий для локальных подсистем управления [10 – 11]. Дается общая функциональная схема АСАУ, затем подробное описание работы каждого элемента или модуля. На примере одного из охлаждающих роликов показана методика настройки быстродействующих регуляторов в составе АСАУ. На основе теоретических исследований сформулированной задачи управления нестационарным многокоординатным объектом разработан алгоритм управления температурным профилем слитка в ЗВО-Р и имитационным моделированием управления объектами ЗВО-Ф и ЗВО-Р получены наглядные оценки качества управления при различных способах охлаждения.

Вписывая новый подход в существующую концепцию управления процессом вторичного охлаждения, и было предложено разделить ЗВО на два участка (рис. 4.1).

Как показано на рис 4.3., процесс вторичного охлаждения разделен на два этапа: 1) в ЗВО-Ф – неконтролируемое и управляемое в разомкнутом контуре охлаждение форсунками; 2) в ЗВО-Р – контролируемое по температуре поверхности слитка и

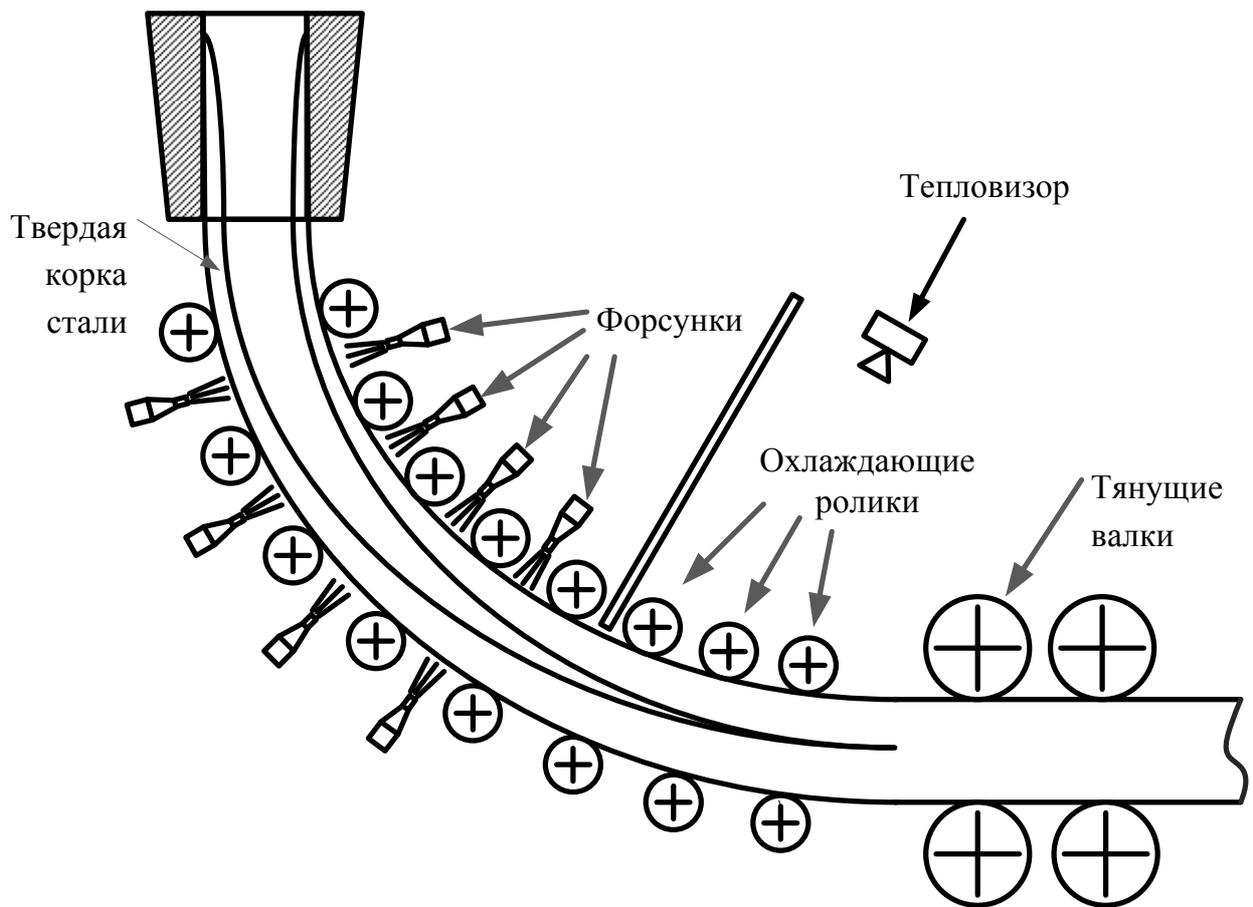


Рис.4.1. Модернизированная схема охлаждения слитка в ЗВО

интенсивности теплоотвода, управляемое в замкнутом контуре, охлаждение роликами. Очевидно, что при выборе идеологии управления, при наличии новых средств охлаждения, предпочтение было отдано оперативному управлению. В таком случае, с точки зрения оперативного управления, первый участок ЗВО является не объектом управления, а возмущающим фактором, который приводит к существенным отклонениям случайного характера фактической температурной кривой от регламентной [5 – 6].

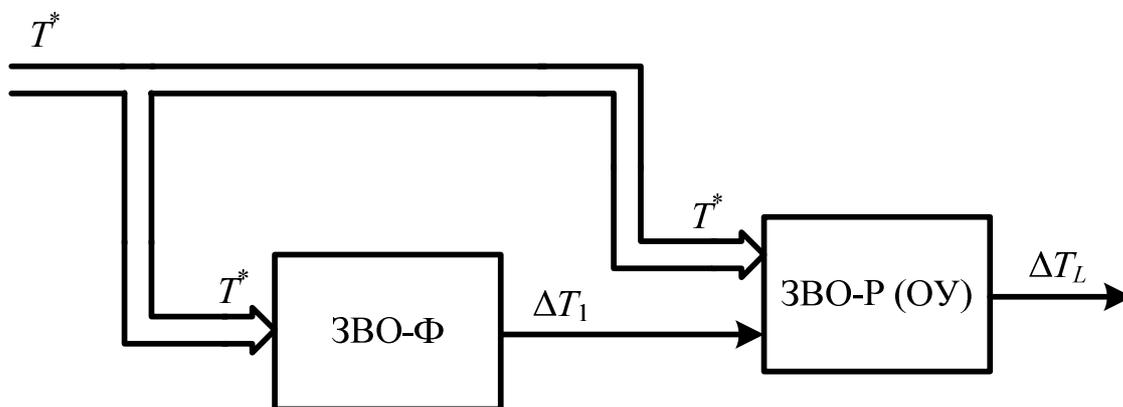


Рис. 4.3. Общая блок-схема комплексного (форсуночного + роликового) способа управления охлаждением слитка в ЗВО

В такой схеме система охлаждения ЗВО-Ф функционирует как отдельный объект управления (принципы управления форсуночным охлаждением подробно рассмотрены в первой главе диссертации). Существующие модели форсуночным охлаждением (например «SLITOK») предоставляют прогноз фазового и теплового состояния слитка вдоль технологической оси МНЛЗ. Это позволяет по модели рассчитать для границы участков ЗВО-Ф и ЗВО-Р прогнозируемые значения толщины корки, температуру твердой и жидкой фазы. При известной скорости вытяжки ν , в соответствии с рассуждениями из п. 3.2., эти данные в совокупности можно интерпретировать как начальные условия для ЗВО-Р по материальному \bar{G}_0 и тепловому \bar{T}_0 балансу:

$$\bar{G}_0 = \begin{pmatrix} G_0^{\text{лII}} & G_0^{\text{лI}} & G_0^{\text{пI}} & G_0^{\text{пII}} \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

$$\bar{T}_0 = \begin{pmatrix} T_0^{\text{лII}} & T_0^{\text{лI}} & T_0^{\text{пI}} & T_0^{\text{пII}} \end{pmatrix}. \quad (4.3)$$

Рассмотрев внешние воздействия на ЗВО-Р, перейдем к описанию его внутренней структуры и принципов функционирования. Функциональная схема объекта управления представлена на рис. 4.4.

Управление температурным состоянием слитка осуществляется с помощью регулирования расхода ($\Delta V_k^{\text{л}}$ или $\Delta V_k^{\text{п}}$) охлаждающего агента, пропускаемого через охлаждающие ролики. Измеряя температуру охлаждающего агента на входе ($T_k^{\text{лI}}$ или $T_k^{\text{пI}}$) и выходе ($T_k^{\text{лII}}$ или $T_k^{\text{пII}}$) из ролика, при контролируемом его расходе ($V_k^{\text{л}}$ или $V_k^{\text{п}}$) рассчитывается, согласно выражениям (3.28) и (3.29), величина интенсивности теплоотвода [7 – 9].

Проведя группировку управляющих и измеряемых величин получены наборы векторов, которые в пересчете на теплосъем, согласно математическому описанию процесса охлаждения, определяет температурное и фазовое состояние **непрерывно движущегося слитка** по всей длине технологической оси. Данные величины, характеризующие внутреннее состояние **движущегося объекта** управления, оцениваются с помощью разработанной математической модели для модернизированного способа охлаждения.

Критерий управления для правой и левой группы охлаждающих роликов примет вид:

$$E_{\text{пр}}(\Delta \bar{V}^{\text{л}}, \Delta \bar{V}^{\text{п}}, \nu) = \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=jn}^{(j+1)n} \left[\left(T_i^* - T_{\text{фи}}^{\text{л}}(V_j^{\text{л}}, V_j^{\text{п}}, \nu) \right)^2 + \left(T_i^* - T_{\text{фи}}^{\text{п}}(V_j^{\text{л}}, V_j^{\text{п}}, \nu) \right)^2 \right] \rightarrow \min_{\Delta \bar{V}^{\text{л}}, \Delta \bar{V}^{\text{п}}, \nu}, \quad (4.13)$$

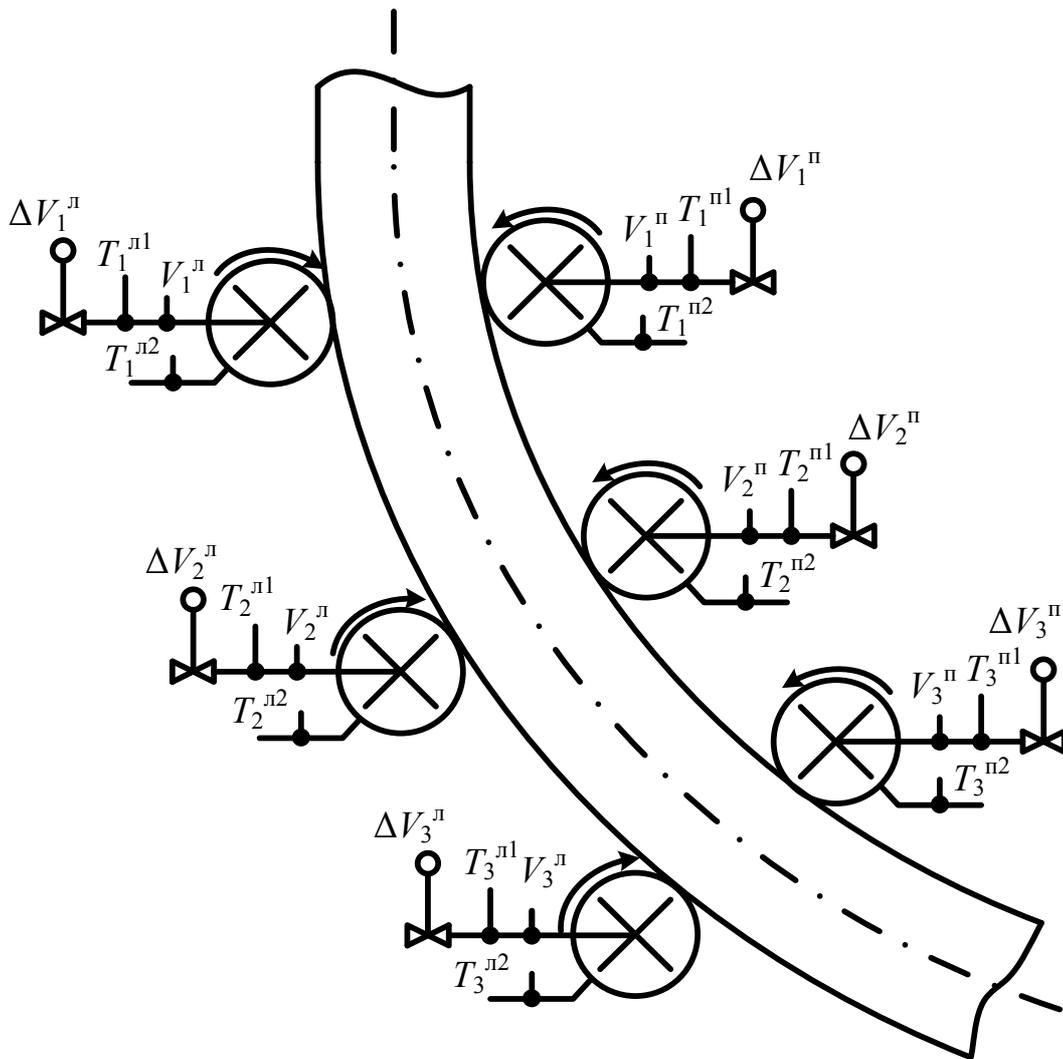


Рис. 4.4. Функциональная схема объекта управления (ЗВО-Р)

при следующих ограничениях на управление:

$$V_{\min} \leq V_j^{\text{л}} \leq V_{\max}; \quad (4.14)$$

$$V_{\min} \leq V_j^{\text{п}} \leq V_{\max}; \quad (4.15)$$

$$T_{\text{ф}N}^{\text{л}} \leq T_{\text{кр}}; \quad (4.16)$$

$$T_{\text{ф}N}^{\text{п}} \leq T_{\text{кр}}; \quad (4.17)$$

$$|T_{\text{ф}i}^{\text{л}} - T_{\text{ф}i}^{\text{п}}| \leq \Delta T_{\text{кр}}, \quad (4.18)$$

где $[V_{\min}, V_{\max}]$ – рабочий диапазон по расходам для правой и левой группы охлаждающих роликов; $T_{\text{кр}}$ – температура поверхности, соответствующая закрытию жидкой лунки; $\Delta T_{\text{кр}}$ – критическая разность температур поверхности на малом и большом радиусе. При выходе за ограничения необходимо переводить работу МНЛЗ в аварийный режим и уменьшать скорость разливки.

Таким образом, первый и второй контуры образуют САУ контактным охлаждением на участке ЗВО-Р, а третий контур включен в общую АСУТП в качестве системы-советчика. Схема САУ и ее место в АСУТП представлены на рис. 4.6.

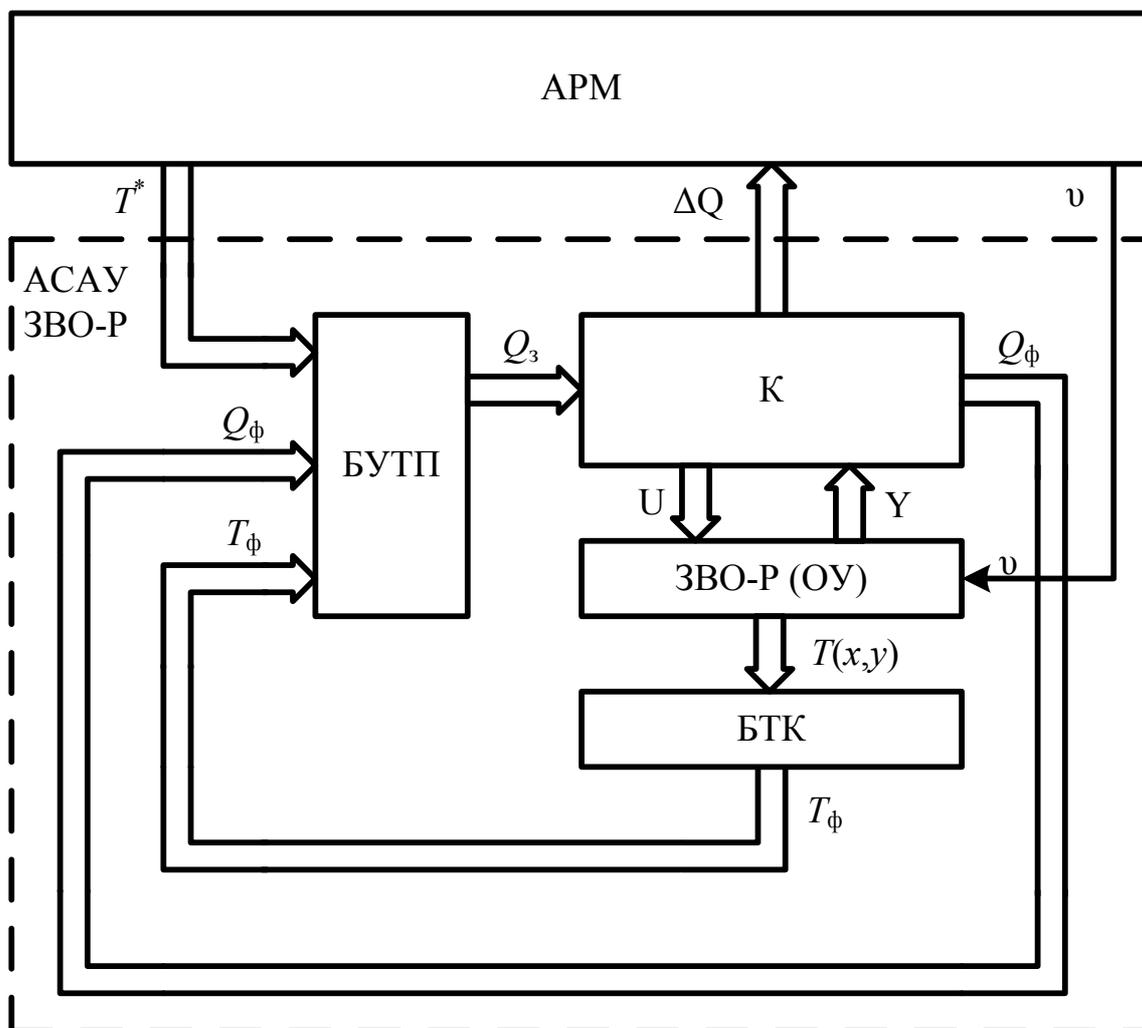


Рис. 4.6. Блок-схема АСАУ процессом охлаждения слитка в ЗВО-Р

Перед описанием работы АСАУ сделаем одно важное замечание.

В силу существенной нестационарности процесса охлаждения в ЗВО МНЛЗ при непрерывной разливке, **работу АСАУ целесообразно осуществлять в режиме постоянной автоматической адаптации.** Тогда в блок управления тепловым профилем необходимо включить идентификатор с моделью (математические основы которых изложены в п. 3.2 и п. 3.3), осуществляющий функцию наблюдения и коррекции работы системы исходя из текущих свойств конкретной плавки, разливаемой в МНЛЗ. По тем же причинам контроллер роликового охлаждения должен выполнять также функции самонастройки своих параметров исходя из теплопроводящих свойств отливаемой стали.

Таким образом, работа системы осуществляется по следующей схеме: БТК по измеренной температуре поверхности слитка формирует фактический температурный профиль T_ϕ , который сопоставляется с регламентным температурным профилем T^* в БУТП, где по их расхождению формируются задание на теплоотвод Q_3 по каждому

охлаждающему ролику. Это задание подается на контроллер периодически (с периодом Δt , рассчитанным исходя из динамических характеристик охлаждающего ролика, см. п. 4.3.2), контроллер их обрабатывает путем изменения расхода охлаждающего агента на отдельных роликах. Результаты работы контроллера в виде значений фактического теплоотвода по каждому ролику Q_{ϕ} постоянно передаются в БУТП, где они вместе с фактическим температурным профилем T_{ϕ} используются для непрерывной идентификации процесса и адаптации работы системы. Параллельно в АРМ передается матрица отклонений ΔQ , по которой оператор может оценить положение «хвоста» жидкой лунки, и, в случае необходимости, изменить скоростной режим разливки. Далее в работе дается детализация принципов функционирования отдельных узлов созданной АСАУ, целевые функции управления, блок-схемы каждого модуля, методы оценки температуры в каждом сегменте слитка и математические выражения для динамической идентификации математических моделей и многокоординатного непрерывного идентификатора их по реальным значениям ошибки по температуре слитка на участке ЗВО-Р. Для программной реализации АСАУ, на рис. 4.12 приведена блок-схема алгоритма управления температурным профилем в ЗВО-Р.

Как видно из графиков, иллюстрирующих результаты имитационного моделирования работы системы (рис. 4.15), построение АСАУ на базе нового вторичного охлаждения позволяет добиться существенного снижения как общей интегральной ошибки на участке ЗВО-Р, так и его пороговых значений (в 2,5 раза). Это дает возможность говорить о существенном снижении температурных градиентов на поверхности слитка и повышению равномерности процесса охлаждения в целом, что по известным работам приводит к улучшению качества поверхности и макроструктуры слитка.

Заключение и общие выводы по диссертационной работе

Исследованиями установлено, что применение форсуночного охлаждения имеет достаточно ограниченную зону изменения основного управляющего воздействия – расхода воды на форсунки. Характеристики факелов форсунок и охлаждающего агента существенно нестабильны, наблюдаемость и контролируемость некоторых параметров объекта управления вообще невозможна. Имеющиеся математические модели имеют только вероятностные характеристики. Поэтому, в настоящее время получение качественных заготовок, особенно крупных слябов для трубопроводов большого размера, – проблематично.

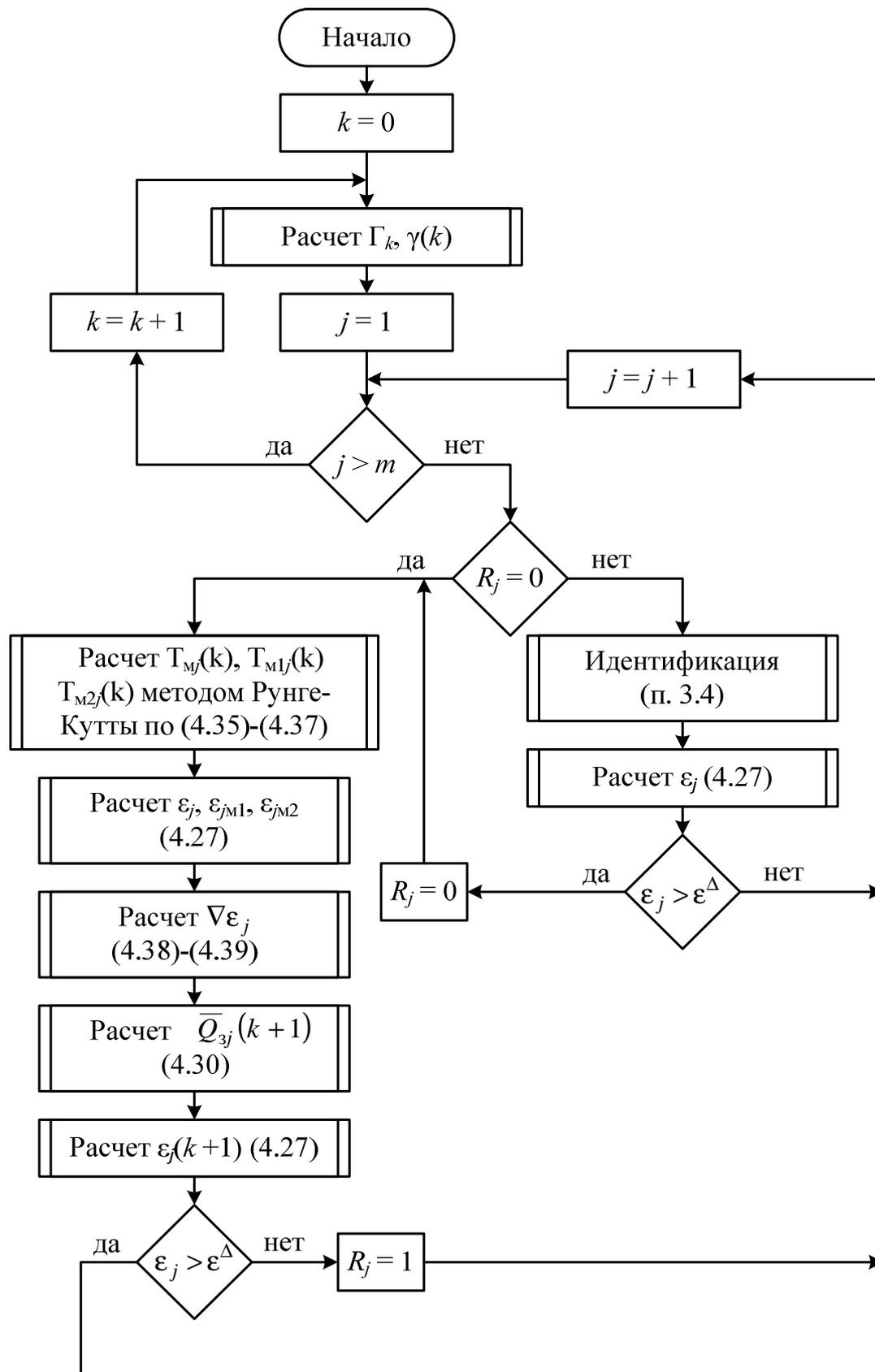


Рис. 4.12. Блок-схема алгоритма управления температурным профилем слитка в ЗВО-Р

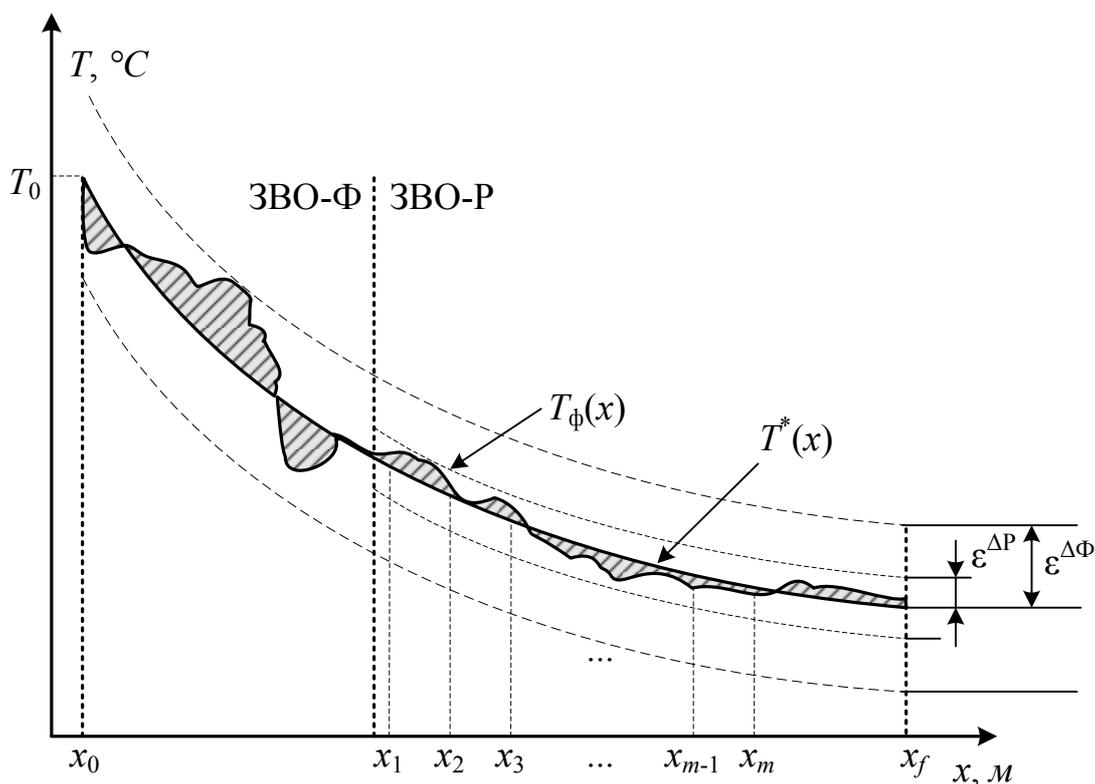


Рис. 4.15. Оценка отклонения фактической температуры слитка от регламентной при форсуночном и новом способе вторичного охлаждения приведены при работе САУ

В результате компьютерных исследований разработанных в диссертации математических моделей, созданных автором на основе новых методов их построения и предложенных модернизированных способов охлаждения слитка в ЗВО, методами прямого непрерывного контроля основных параметров, важных для построения САУ, придать ей свойства адаптации и накопления знаний в реальном масштабе времени.

Имитационным и физическим моделированием в работе показано, что совокупность решенных автором вопросов позволил достаточно эффективно **решить актуальную научно-техническую задачу создания САУ процессом охлаждения крупного слитка в ЗВО и устранить основные причины брака** непрерывнолитых заготовок, а также устранить многие негативные факторы процесса форсуночного охлаждения на качество заготовок. Создание адаптивной САУ и совершенствование информационной ее базы позволили снизить значения градиентов температур на поверхности слитка не менее 2,5 раза, снизить расход хладагента на 30% и создать хорошие санитарные условия обслуживания МНЛЗ и увеличить сроки службы элементов автоматики и электротехники, а также значительно снизить выход некондиционных слитков-слябов и исключить аварийные ситуации.

Подробное описание общих выводов по работе приведены в диссертации, а основные – отмечены в начале текста автореферата.

**Основные положения и выводы диссертации опубликованы
в следующих работах:**

1. Салихов З.Г., Ишметьев Е.Н., Газимов Р.Т., **Салихов К.З.** Математическое описание механизма использования охлаждающей воды в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ // Изв. Вузов «Черная металлургия». 2010. №3. С. 59 – 62.

2. Салихов З.Г., Ишметьев Е.Н., **Салихов К.З.**, Глебов А.Г., Романенко В.П., Газимов Р.Т. Способ охлаждения заготовок на машинах непрерывного литья. Патент на изобретение РФ по заявке №2009116182 от 24.04.2009 г. Решение Роспатента о выдаче и регистрации патента от 11 января 2011 г.

3. Z.G. Salikhov, E.N. Ishmet'ev, R.T. Gazimov, and **K.Z. Salikhov** / Effective Use of Cooling Water in the Secondary Cooling Zone of a Continuous Casting Machine // Steel in Translation, 2010, Vol. 40, No 3, pp. 229 – 232.

4. Салихов З.Г., Газимов Р.Т., **Салихов К.З.** Теоретические основы компьютерного оценивания и управления осевой асимметрией макроструктуры сляба в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ // Известия ВУЗов «Черная металлургия», 2010 г., №9, с.

5. Z.G. Salikhov, R.T. Gazimov, and **K.Z. Salikhov** / New method for cooling slabs in the secondary cooling zone of continuous casters that allows computer control of the slab crystallization process // Metallurgist, Vol. 54, Nos. 5 – 6, 2010, pp. 295 – 298.

6. Салихов З.Г., Газимов Р.Т., **Салихов К.З.** / Новый способ охлаждения слябов в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ, обеспечивающий компьютерное управление процессом кристаллизации сляба // Металлург, 2010, №5. С. 50 – 52.

7. **К.З. Салихов.** / Использование водноохлаждаемых роликов в системе корректирующего управления процессом формирования слитка в ЗВО МНЛЗ // Моделирование, идентификация, синтез систем управления: Сборник тезисов тринадцатой международной научно-технической конференции, 2010. С. 173 – 175.

8. **Салихов К.З.**, Ишметьев Е.Н., Салихов З.Г., Газимов Р.Т. Принцип оперативного управления охлаждением заготовки на МНЛЗ радиального типа // Моделирование, идентификация, синтез систем управления: Сборник тезисов двенадцатой международной научно-технической конференции, 2009. С. 152 – 153.

9. **Салихов К.З.** Исследование проблемы эффективного управления охлаждением слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ // 65-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции, 2010, с. 597.

10. Салихов З.Г., Газимов Р.Т., **Салихов К.З.** Инженерные основы компьютерного управления процессом кристаллизации сляба в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ. // V Международная научно-практическая конференция «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Безопасность технологических процессов», Москва НИТУ «МИСиС», 27 сентября – 2 октября 2010г.

11. Салихов З.Г., Афанасьев А.Г., Ишметьев Е.Н., **Салихов К.З.**, Орешкин С.А. Способ контроля верхнего уровня шлаковой фазы и границы раздела шлаковой и металлической фазы в ванне металлургической печи // Патент на изобретение №2368853. Бюлл. изобретений №27 от 27.09.2009.

12. Салихов З.Г., Ишметьев Е.Н., Щетинин А.П., **Салихов К.З.**, Усачев М.В. Устройство контроля температуры в электродуговой печи. // Патент на изобретение России по заявке № 2009125355 от 03.07.2009 г. Решение Роспатента о выдаче патента от 27.01.2011г.