

Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК
ГРНТИ
Инв. №

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»
От имени Руководителя организации _____/_____ М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 2 этапа Государственного контракта
№ П2402 от 18 ноября 2009 г. и Дополнению от 19 марта 2010 г. № 1/П2402, Дополнению от 27 июля 2010 г. № 2, Дополнению от 14 марта 2011 г. № 3, Дополнению от 29 июня 2011 г. № 4

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»
Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.
Проект: Совершенствование методов сбора, регистрации, обработки, хранения, передачи и защиты информации для повышения эффективности управления металлургическими агрегатами, направленного на повышение производительности, качества продукции и экологических показателей.
Руководитель проекта: _____/Ячиков Игорь Михайлович (подпись)

Магнитогорск
2013 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ
по Государственному контракту П2402 от 18 ноября 2009 на выполнение
поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное образова-
тельное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский госу-
дарственный технический университет им. Г.И. Носова»

Руководитель темы:

доктор технических наук,
доцент

подпись, дата

Ячиков И. М.

Исполнители темы:

доктор технических наук,
доцент

подпись, дата

Логунова О. С.

кандидат технических
наук, без ученого звания

подпись, дата

Кухта Ю. Б.

кандидат технических
наук, без ученого звания

подпись, дата

Егорова Л. Г.

без ученой степени, без
ученого звания

подпись, дата

Ларина Т. П.

без ученой степени, без
ученого звания

подпись, дата

Зарецкий М. В.

без ученой степени, без
ученого звания

подпись, дата

Мацко И. И.

без ученой степени, без
ученого звания

подпись, дата

Мохов В. А.

без ученой степени, без
ученого звания

подпись, дата

Миков А. Ю.

без ученой степени, без
ученого звания

подпись, дата

Посохов И. А.

без ученой степени, без
ученого звания

подпись, дата

Сергеев Г. С.

без ученой степени, без
ученого звания

подпись, дата

Суханова М. Н.

без ученой степени, без
ученого звания

подпись, дата

Ячиков М. И.

Реферат

Отчет 277 с., 1 ч., 88 рис., 6 табл., 90 источн., 0 прил.

Алгоритм , имитационная модель , подсистема сбора информации , эвристический алгоритм , нейросетевая модель , статистическая модель , программное обеспечение , модель материального баланса , зашумленность данных , временной ряд

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 2 этапу Государственного контракта № П2402 "Совершенствование методов сбора, регистрации, обработки, хранения, передачи и защиты информации для повышения эффективности управления металлургическими агрегатами, направленного на повышение производительности, качества продукции и экологических показателей." (шифр "НК-425П") от 18 ноября 2009 по направлению "Обработка, хранение, передача и защита информации" в рамках мероприятия 1.2.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - Разработка алгоритмов для подсистем сбора, регистрации, обработки, передачи и хранения данных, поступающих с металлургических агрегатов

Численные методы, теория алгоритмов и структур данных, теория и практика объектно-ориентированного программирования. Численные методы решения уравнений математической физики, теория алгоритмов и структур данных, теория и практика объектно-ориентированного программирования, методы компьютерной графики. Гибридные нейросетевые методы распознавания и кластеризация элементов изображений. Нейросетевые методы анализа информационных потоков. Методы математической статистики.

Среды программирования на языках высокого уровня: C++, Delphi, Visual Basic, Visual Basic for Statitica.

1. Проведен аналитический обзор существующих алгоритмов сбора и оценки информации с агрегатов металлургического цикла и способов обработки информации при ее зашумленности и влиянии реальной колеблемости показателей.

2. Получены алгоритмы выработки корректирующих воздействий на процесс производства чугуна.

3. Разработаны алгоритмы и компьютерные программы поведения электровихревых течений и теплообмена в ваннах дуговых печей постоянного и переменного токов. Эти результаты могут быть использованы в качестве управляющего комплекса в автоматизированной системе электровихревого перемешивания расплава в ванне.

4. Получены инструменты в виде программных продуктов для проектировщиков, дающие возможность прогнозировать поведение электровихревых течений и теплообменных процессов в ванне расплава при использовании того или иного конструктивного или технического решения и выбирать из набора возможных вариантов оптимальный.

5. Разработаны алгоритмы для подсистем сбора, регистрации, обработки и хранения данных для прогнозирования теплового состояния и качества непрерывнолитой слэбовой заготовки.

Содержание

Введение	11
1 Аналитический отчет о проведении теоретических и (или) экспериментальных исследований	16
1.1 Разработка алгоритмов сбора с одновременной оценкой корректности информации с агрегатов полного металлургического цикла	16
1.1.1 Общая характеристика информационных потоков в металлургии	16
1.1.2 Алгоритмы сбора и обработки первичной технологической информации с металлургических агрегатов.....	26
1.1.3. Алгоритмы сбора и обработки информации в нечетких условиях (на примере доменного производства).....	31
1.2 Разработка имитационной модели хранения и распределения потоков информации с металлургических агрегатов	42
1.2.1 Применение имитационного моделирования	43
1.2.2 Структурный анализ функционирования машины непрерывного литья заготовок и имитационной модели	44
1.2.3 Принципы построения программного обеспечения имитационной модели	49
1.3 Разработка моделей расчета материального баланса сталеплавильного комплекса действующего производства	54
1.3.1 Модель расчета электрических параметров ДСП	56
1.3.2 Модели расчета баланса времени и сырья в ДСП	59
1.3.3 Модель расчета эксплуатационных и капитальных затрат ...	62
1.4 Разработка алгоритмов выработки корректирующих воздействий на процесс производства чугуна на основе анализа информационных потоков нейросетевыми методами	73

1.4.1 Характеристика информационных потоков, сопровождающих процесс производства чугуна	73
1.4.2 Эвристический алгоритм прогнозирования	74
1.4.3 Эвристический алгоритм оптимизации	77
1.4.4 Оценка полученных результатов.....	78
1.5 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для обработки информации агломерационно-доменного цикла с оценкой качества и зашумленности полученной информации	78
1.5.1 Зашумленность данных и способы устранения шумов	78
1.5.2 Алгоритмы отсев зашумленных данных	80
1.5.3 Алгоритмы проверки гипотезы о виде распределения данных	82
1.5.4 Алгоритм устранения зашумленности показателей.....	87
1.5.2 Программная реализация алгоритмов средствами Statistica .	90
1.6 Разработка методов расчета свойств конечного доменного шлака на основе данных аглодоменного комплекса.....	97
1.6.1 Теории строения и модели структуры расплавленных шлаков	99
1.6.2 Анализ состава шлака доменного комплекса ОАО «ММК»	105
1.7 Разработка алгоритмов оценки влияния колеблемости показателей работы аглодоменного комплекса на показатели работы сталеплавильного передела и качество непрерывнолитой заготовки .	108
1.7.1 Методика изучения и показатели колеблемости исходных данных	108
1.7.2 Показатели колеблемости исходных данных	110
1.7.3 Особенности оценки колеблемости во временных зависимостях.....	112

1.7.4 Моделирование сезонных колебаний временного ряда	116
1.7.5 Алгоритм оценки колеблемости показателей работы аглодоменного производства	117
1.8 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования оценки и прогнозирования качества непрерывно-литой заготовки нейросетевыми методами	119
1.8.1 Сегментация данных	121
1.8.2 Метод моментов для выделения инвариантных к аффинным преобразованиям признаков	121
1.8.3 Классификатор на основе нейронной сети	125
1.8.4 Проектирование и разработка программного обеспечения	127
1.8.5 Оценка полученных результатов	131
2 Результаты теоретических и экспериментальных исследований	132
2.1 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок	132
2.1.1 Систематизация и оценка полученных результатов	132
2.1.2 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей	138
2.1.3 Сопоставление созданной математической модели с известными данными	141
2.1.4 Результаты моделирования	144
2.1.5 Рекомендации по использованию результатов проведенных НИР в технологии непрерывной разливки стали	146
2.1.6 Рекомендации по использованию результатов НИР при создании научно-образовательных курсов	147

2.2 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования электровихревых течений в токонесущих расплавах металлургических агрегатов	147
2.2.1 Систематизация и оценка полученных результатов	147
2.2.2 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей	159
2.2.3 Сопоставление и обобщение результатов	166
2.2.4 Рекомендации по использованию результатов проведенных НИР	169
2.2.5 Рекомендации по использованию результатов НИР при создании научно-образовательных курсов.....	170
2.3 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования теплопереноса в токонесущих расплавах металлургических агрегатов	171
2.3.1 Систематизация и оценка полученных результатов	171
2.3.2 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей	176
2.3.3 Рекомендации по использованию результатов проведенных НИР	180
2.4 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования теплового состояния расплава в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок.....	180
2.4.1 Систематизация и оценка полученных результатов	180
2.4.2 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей	193
2.4.3 Сопоставление и обобщение результатов анализа научно-информационных источников и исследований	205

2.4.4	Оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем.....	206
2.4.5	Рекомендации по использованию результатов проведенных НИР в АСУ ТП непрерывной разливки стали	207
2.4.6	Рекомендации по использованию результатов НИР при создании научно-образовательных курсов.....	210
2.5	Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования оценки и прогнозирования качества непрерывно-литой заготовки статистическими методами	211
2.5.1	Систематизация и оценка полученных результатов	211
2.5.2	Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей.....	217
2.5.2.4	Алгоритм графического представления данных по набору изображений серных отпечатков.....	227
2.5.3	Сопоставление и обобщение результатов анализа научно-информационных источников и исследований	232
2.5.4	Оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем.....	232
2.5.5	Рекомендации по использованию результатов проведенных НИР в АСУ ТП непрерывной разливки стали	232
2.5.6	Рекомендации по использованию результатов НИР при создании научно-образовательных курсов.....	233
3	Публикации результатов НИР	235
3.1	Заключения экспертной комиссии по открытому опубликованию научных статей в изданиях, рекомендованных ВАК	235
	Копии статей, опубликованных в журнале с обязательной ссылкой на проведение НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы	239

3.2.1 Копия статьи «Программное обеспечение для моделирования тепловых процессов в прокатном валке	239
3.2.2 Копия статьи «Оценка социального заказа подготовки специалистов в многоуровневой системе образования России» .	245
3.2.3 Копия статьи «Программное обеспечение для математического моделирования тепловых процессов в слоистых структурах»	257
3.2.4 Копия статьи «Управление объемными электромагнитными силами в ванне дуговой печи постоянного тока».....	262
Заключение	268
Список используемых источников	269

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование технологических процессов в металлургии тесно связано с использованием математического моделирования и математических методов оптимизации.

Одним из основных переделов черной металлургии является сталеплавильное производство, основное и дополнительное оборудование которого существенно влияет на выход готового проката, расход энергетических и материальных ресурсов, экологический климат предприятия. Пристальное внимание среди металлургических технологий в настоящее время привлекают процессы, связанные с производством заготовок высокого качества для обработки металлов давлением: получение жидких расплавов и организация непрерывной разливки.

Эти процессы и ряд других применяемых на практике технологий в металлургии сопровождаются тепловой обработкой: нагревом и охлаждением материалов, при этом в материалах происходят химические и фазовые превращения из одного состояния в другое. Стабильно высокий мировой спрос на качественную металлургическую продукцию мотивирует новые исследования в области качества и снижения брака.

В процессе нагрева с целью, например, расплавления металлов и сплавов, затрачивается определенное количество тепловой энергии, получаемой за счет сжигания топлива, затрат электроэнергии, химических реакций и других источников тепла. Это тепло аккумулируется сначала в расплавах, затем - в слитках, отливках, заготовках, формирующихся в кристаллизаторах, изложницах и литейных формах. При этом в процессе затвердевания этих изделий часть тепла снова теряется, что является необходимым условием динамики технологического процесса. Затем определенная часть потерянного тепла восстанавливается в слитках и заготовках в

процессе нагрева в нагревательных печах перед обработкой металла давлением.

Параллельно с технологическими задачами на металлургических агрегатах решаются задачи повышения качества, производительности и экономичности работы металлургических агрегатов: за счет уменьшения расхода энергоресурсов, автоматизации производства, уменьшения выброса вредных веществ в атмосферу, т.е. улучшения экологии предприятия.

Для повышения производительности, качества продукции, экологических и социальных показателей очень важно качество собранной информации, ее своевременность и достоверность. Это позволяет эффективно воздействовать на объект управления и достигать поставленной цели. Одним из результатов эффективного управления технологическим процессом считают его высокую конкурентоспособность на отечественном и мировом рынке.

В области теории и практики АСУ металлургических производств накоплен значительный положительный опыт. Вопросы повышения эффективности управления отражены в трудах зарубежных и российских исследователей. Труды Бутковского А. Г., Растригина Л. А., Сиразетдинова Т. К., Лионса Ш. Л., Ногина В. Д., Девятова Д. Х. и других определили развитие теории управления и методов оптимизации.

За последние 40 лет в России разработаны В.Т. Борисовым, Ю.А. Самойловичем, В.А. Журавлевым, В.В. Соболевым и др. новые подходы к моделированию затвердевания заготовок из бинарных сплавов: квазиравновесная теория двухфазной зоны, которая была использована при моделировании и решении задач оптимизации в данной работе.

Повышение мощности и эффективности современных электрометаллургических агрегатов происходит, прежде всего, за счет увеличения тока дуги, достигающего десятков килоампер. Использование таких токов, а также наличие нескольких токоподводов к расплаву, приводит к созданию

существенных электровихревых течений.

В последнее время интерес к изучению электровихревых течений усилился в связи с появлением дуговых сталеплавильных печей постоянного тока (ДППТ), в которых они используются для перемешивания расплава, а в перспективе могут быть применены в качестве эффективного инструмента для целенаправленного управления потоками жидкого металла и воздействия на процессы теплообмена (ТМО). Существенный вклад в изучение ТМО при перемешивании расплава в различных металлургических агрегатах внесли Явойский В.И., Новиков Ю.П., Лисиенко В.Г., Закамаркин М.К., Казаков С.В., Пилюшенко В.Л., Кубланов В.Я. и др.

Основными проблемами действующих в условиях металлургического производства информационных систем являются:

- 1) отсутствие системы методов комплексного сбора информации о протекании процессов получения чугуна, выплавки полупродукта, доводки стали и ее разлива непрерывным способом;
- 2) отсутствие системы математических моделей для получения информации о процессах расплавления и затвердевания расплава на различных этапах производства металлургической продукции;
- 3) недостаточное формализованное описание производственных многостадийных процессов с учетом их декомпозиции на этапы, выявление и классификация возможных целей управления, расширение области применения методов оптимизации;
- 4) отсутствие комплекса пакетов прикладных программ для интеллектуальной поддержки управления металлургическими процессами, выбора новых технологий и конструкций металлургических агрегатов.

Целью исследования является разработка алгоритмов для подсистем сбора, регистрации, обработки, передачи и хранения данных, поступающих с металлургических агрегатов.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

– аналитический обзор существующих алгоритмов сбора и оценки информации с металлургических агрегатов;

– аналитический обзор способов обработки информации при ее зашумленности и влияния колеблемости показателей;

– разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования электровихревых течений и теплообмена в токонесущих расплавах металлургических агрегатов;

– разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования теплового состояния заготовки в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок;

– разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок;

– разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования оценки и прогнозирования качества непрерывнолитой заготовки статистическими и нейросетевыми методами.

При исследовании указанных проблем были использованы:

– методы аналитического и численного решения уравнений теплопроводности, массопереноса и Навье-Стокса в цилиндрической системе координат со сложными граничными условиями;

– статистические и нейросетевые методы.

Научная значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Впервые проведено комплексное математическое моделирование гидродинамических и теплообменных процессов в ванне токонесущего расплава.
2. Разработан алгоритм определения параметров перемешивания расплава и определения минимального времени, необходимого на проведение процесса рафинирования металла.

3. Разработаны статистические и нейросетевые модели оценки и прогнозирования качества непрерывнолитого слитка без снижения производительности существующего оборудования.
4. Разработаны алгоритмы прогнозирования и оценки теплового состояния слитка в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ;

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов исследований, базирующихся на фундаментальных законах сохранения массы, энергии, импульса, заряда, уравнениях математической физики, теории электродинамики сплошных сред, теории физического подобия, известных и апробированных численных и эвристических методах. Адекватность созданных алгоритмов и математических моделей подтверждается:

- сопоставлением компьютерного моделирования и теоретических исследований с лабораторными и промышленными экспериментами;
- согласованием результатов расчета тестовых и методических задач с результатами расчетов по методикам других авторов и известными экспериментальными данными;
- непротиворечивостью созданных моделей устоявшимся представлениям и самим себе;
- соответствием всех утверждений, измерений и выводов закону достаточного основания.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ О ПРОВЕДЕНИИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И (ИЛИ) ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Разработка алгоритмов сбора с одновременной оценкой корректности информации с агрегатов полного металлургического цикла

1.1.1 Общая характеристика информационных потоков в металлургии

Автоматизированная система управления на металлургическом предприятии обеспечивает автоматизированный сбор и обработку информации, необходимую для оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с принятым критерием, и реализацию управляющих воздействий на технологический объект.

Производственная деятельность крупного металлургического производства, включающего множество технологических циклов и потребляющего разное сырье, всегда ставит задачу контроля технологических цепочек на всех этапах. В металлургии сбои в технологическом цикле могут иметь как тяжелые финансовые последствия, так и приводить к крупным авариям. Соответственно контроль должен осуществляться в реальном времени и непрерывно, что выдвигает требования к производительности информационных систем и их надежности.

Любое предприятие металлургической отрасли представляет собой конгломерат нескольких независимых друг от друга производств. В зависимости от размеров предприятия и области металлургии, в которой оно специализируется, количество этих производств может варьироваться. Относительная автономность всех производств, тем не менее, подразумевает их слаженную работу и сопряженность технологических циклов. Главная цель информационных систем в металлургии – создание эффективной и надежной информационной структуры анализа сквозной технологии, пригодной к промышленному использованию. По сквозной технологией в

черной металлургии для предприятий с полным металлургическим циклом понимают комплекс технологических операций в системе подготовка руд к плавке – доменный передел – изготовление стали – изготовление металлопроката.

Управление отдельными металлургическими процессами и всем производством базируется на разветвленной информационной сети, включающей каналы прямой и обратной связи между отдельными производственными звеньями и управляющим звеном (рисунке 1.1).



Рисунок. 1.1– Схема материальных и информационных потоков металлургического производства

Принятие оптимальных решений управленческим персоналом требует оперативного представления ему объективной информации о матери-

альных и энергетических затратах, а также о параметрах технологического процесса [1]. На основе аналитической и измерительной информации, а также информации из портфеля заказов и текущих данных экономики предприятия реализуется управление технологическими процессами и металлургическим производством. Источниками такой информации являются специальные средства анализа, испытаний и измерений. Аналитические средства, применяемые в экспресс-лабораториях металлургических цехов, функционируют в дискретном режиме по мере поступления проб сырых материалов или металла, отбираемых на ходу плавки.

Средства измерений таких технологических параметров, как давление и расход жидких и газообразных сред, уровень жидкостей и сыпучих материалов в открытых и закрытых резервуарах и т.д., позволяет получать измерительную информацию в непрерывном режиме. Что же касается измерения особо важного в технологическом смысле параметра – температуры расплава чугунов и стали, то здесь, на практике, к настоящему времени наибольшее распространение получили дискретные устройства на основе термопар погружения, хотя в отдельных случаях возможно применение специальных термопар длительного погружения в расплав или пирометров, непрерывно визируемых на искусственно создаваемую в расплаве замкнутую полость.

Типовая архитектура информационной системы управления технологическими процессами на металлургическом предприятии включает следующие уровни:

- Уровень Input/Output – уровень непосредственного взаимодействия с технологическим объектом, на котором осуществляется сбор данных от датчиков и воздействие на технологический процесс с помощью исполнительных механизмов и регулирующих органов;

- Уровень Control, на котором осуществляется непосредственное управление технологическими параметрами. На этом уровне используются программируемые логические контроллеры с открытой архитектурой и свободно программируемые контроллеры.
- Уровень автоматизированного рабочего места оператора, включающий диспетчерскую систему сбора и управления технологическим процессом. На этом уровне собирается необходимая информация от многих источников низшего уровня, он включает контуры управления и принятия решения не только на основе вычислительных средств, но и оператора. На этом уровне предусматривается решение задач оптимизации, прогнозирования технологического процесса.

На самом нижнем уровне на вход управляющего вычислительного комплекса от датчиков (термопар, индуктивных датчиков, счетчиков продукции и др.) поступает измерительная информация о текущих значениях параметров, характеризующих ход технологического процесса (состояние и параметры заготовок, качество обработанных деталей, их количество и др.). ЭВМ обрабатывает эту информацию, определяет управляющие воздействия, которые необходимо приложить к исполнительным механизмам для изменения управляемых параметров, с тем, чтобы управляемый процесс протекал оптимальным образом.

Первичные преобразователи вырабатывают свои сигналы в виде напряжения, силы тока, сопротивления, угла поворота в форме аналогового сигнала. Подводимые к исполнительным механизмам управляющие воздействия должны вырабатываться в форме напряжений в аналоговой или дискретной форме.

Так как процессор компьютера оперирует с цифровыми величинами, то поступающие на его вход величины должны предварительно быть преобразованы в цифровую форму, а вырабатываемые управляющим вычис-

лительным комплексом величины управляющих воздействий – из цифровой формы в аналоговую или дискретную, т.е. в соответствующие напряжения. Некоторые входные параметры (например, выдаваемые конечными выключателями, фотореле и др.) и некоторые выходные управляющие сигналы (например, включение двигателей) имеют релейный характер.

Обязательной частью системы управления являются устройства связи с объектом, назначение которых заключается в сопряжении датчиковой аппаратуры и исполнительных механизмов контролируемого объекта и технологический процесс с вычислительными средствами системы. Такие устройства представляют собой комплекс в виде специализированных функциональных блоков, осуществляющих необходимый информационный обмен между технологическим объектом и управляющей информационной системой. На устройства связи с объектом возлагаются следующие функции:

1. Нормализация аналогового сигнала – приведение границ шкалы первичного непрерывного сигнала к одному из стандартных диапазонов входного сигнала аналого-цифрового преобразователя измерительного канала (0 – 20 мА, 4 – 20 мА, от 0 до 5 В; от -5 до 5 В; от 0 до 10 В, а также сигналы датчиков с естественными выходными сигналами – термомпары, термометры сопротивления, тензометрические датчики и т.п.).
2. Предварительная низкочастотная фильтрация аналогового сигнала – ограничение частот первичного сигнала с целью снижения влияния на результаты измеренных помех различного происхождения. На промышленных объектах наиболее распространены помехи с частотой сети переменного тока, а также хаотические помехи, вызванные влиянием на технические средства измерительного канала переходных процессов и наводок при коммутации исполнительных механизмов повышенной мощности.

3. Обеспечение гальванической развязки между источником аналогового или дискретного сигнала и измерительными каналами системы. В равной степени это относится к изоляции между каналами дискретного вывода системы и управляемым силовым оборудованием. Помимо собственной защиты выходных и входных цепей, гальваническая изоляция позволяет снизить влияние на систему помех по цепям заземления за счет полного разделения вычислительной системы и контролируемого оборудования.

Помимо перечисленных функций, ряд устройств связи с объектом может выполнять более сложные задачи за счет наличия в их составе подсистемы аналого-цифрового преобразования и дискретного ввода-вывода, микропроцессора и средств организации одного из интерфейсов последовательной передачи данных.

Распределенность физических параметров и широкий диапазон их видов и размерностей на металлургических объектах требуют многовариантного подхода к организации измерительных схем. В одном случае, превращение многоканальной информации в одноканальную. В этом случае, ее обработка осуществляется с помощью многоканального аналогового коммутатора, подключаемого на вход одного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а в другом случае на каждый канал включается индивидуальный АЦП.

Обработка информации, поступающей с металлургических агрегатов, подразумевает реализацию большого объема вычислений, для которых существенными являются точность и время вычислений. Вычисления представляют собой длинные цепочки итераций и требуют сохранения высокой точности. Такие вычисления характерны для числовой обработки. Такая обработка информации способствовала развитию математического

моделирования технологических процессов в металлургии, идентификации методов численного решения сложных математических задач.

Если выходной технологический параметр y_i (рисунке 1.1), например, температура расплава или содержание в нем отдельных химических элементов изменяется с постоянной скоростью во времени $y' = const$, то варьирование интервала T опроса компьютером источников информации не влечет за собой дополнительной (динамической) погрешности измерения и влияет лишь на своевременность ввода текущей информации о состоянии технологического процесса. С изменением же этой скорости, т.е. при возникновении ускорения $y'' \neq 0$, требуется оптимизация T по минимуму упомянутой погрешности. Согласно О.Н. Тихонову [3] оптимальное значение интервала опроса составляет:

$$T_{\text{опт}} = 2 \sqrt{\frac{(\Delta y)_c}{|y''_{\text{max}}|}}. \quad (1.1)$$

где: $(\Delta y)_c$ – суммарная (систематическая и случайная) погрешность, присущая средству измерения величины y , ед. изм.; y''_{max} – максимальное ускорение процесса изменения y во времени, ед. изм./с².

При этом дополнительная динамическая погрешность измерения скорости изменения рассматриваемого параметра определяется по формуле

$$\delta' = \frac{T}{2} y''_{\text{max}} + \frac{2(\Delta y)_c}{T} \quad (1.2)$$

Знание скорости и ускорения процессов изменения выходных величин технологического процесса во времени необходимо для прогноза и коррекции управляющих воздействий x_i , $i = 1, k$, вырабатываемых по ходу принятия оптимальных решений при управлении.

При выполнении расчетов с использованием в них результатов измерений различных физических величин важную роль играет точность, с которой были определены эти величины.

Известно, что средняя квадратичная погрешность одного измерения из общего числа ряда n таких измерений оценивается формулой Бесселя:

$$\sigma(\Delta y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2}{n-1}}, \quad (1.3)$$

где величина

$$\Delta y = y_i^* - \bar{y} \quad (1.4)$$

является абсолютной погрешностью i -го измерения, y_i^* – результат i -го измерения, \bar{y} – среднее арифметическое результатов измерений:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (1.5)$$

По правилу «трех сигм» значение 3σ принимают за предельную погрешность средства измерения

$$\Delta y_i = 3\sigma \quad (1.6)$$

определяющую его класс точности [5]. При этом систематические погрешности компенсируются совершенствованием конструкций средств измерения или относят к числу случайных, подчиняющихся принципам теории вероятности и математической статистики. Чтобы уменьшить роль случайных погрешностей при обработке измерительной информации по различным алгоритмам, часто прибегают к усреднению результатов многократных измерений. Среднее арифметическое (1.5) аналогично $(\Delta y)_c$ (1.4) также является случайной величиной, оценка средней квадратичной погрешности которой определяется как

$$\sigma(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2}{n(n-1)}}. \quad (1.7)$$

Таким образом, с увеличением числа n точность усредненного из нескольких результатов измерений оказывается выше точности однократного измерения.

При машинной переработке информации наряду с усреднением результатов измерений осуществляют также их интерполяцию и экстраполяцию. Интерполяция требуется для моделирования промежуточных между моментами опроса состояний объектов, а экстраполяция данных позволяет прогнозировать стремление к будущему развитию переходных процессов и предупреждать нежелательные осложнения.

Для сложных измерительных и управляющих информационных систем удобным математическим аппаратом исследования качества системы оказалась теория информации Клода Шеннона. Эта теория дает возможность оценить информационную способность системы и выразить ее количеством информации (в битах), передаваемой в единицу времени.

В теории информации применяется такое важное понятие, как энтропия, которая при вычислении выражается в битах:

$$H = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(y) \log_2 [f(y)] dy, \quad (1.8)$$

где $f(y)$ – плотность вероятности распределения результатов измерения y . Обычно эта величина распределена в конкретном диапазоне

$$y_{min} \leq y \leq y_{max}. \quad (1.9)$$

Тогда в выражении (1.8) пределы интегрирования от $-\infty$ до $+\infty$ следует заменить пределами от y_{min} до y_{max} .

Количество информации I бит, получаемое в результате однократного измерения, равно разности энтропий до (H_1) и после (H_2) измерения

$$I = H_1 - H_2. \quad (1.10)$$

Для характеристики информационных систем необходимо пользоваться понятием информационной способности системы, или потока информации, бит/с

$$Q=nI, \quad (1.11)$$

где n – количество равнооточных измерений в течение 1 с.

В процессе контроля за ходом технологического процесса и принятия оптимальных решений в потоке задач металлургического производства оператор автоматизированного управляющего комплекса должен располагать заранее разработанными пакетами специализированных прикладных программ.

Одновременно с числовой обработкой информации существует и нечисловая обработка, когда предполагается отсутствие большого объема вычислений, но объем хранимых данных очень велик. В этом случае на систему накладываются следующие функции:

- надежное хранение информации;
- предоставление доступа к информации пользователям системы;
- выполнение функций по преобразованию информации, специфичных для данного приложения;
- предоставление удобного интерфейса для конечных пользователей.

Современные информационные системы на металлургических предприятиях характеризуются огромными объемами хранимых данных (включающих миллионы записей), сложной организацией, необходимостью удовлетворять разнообразные требования многочисленных пользователей (рисунке 1.2).

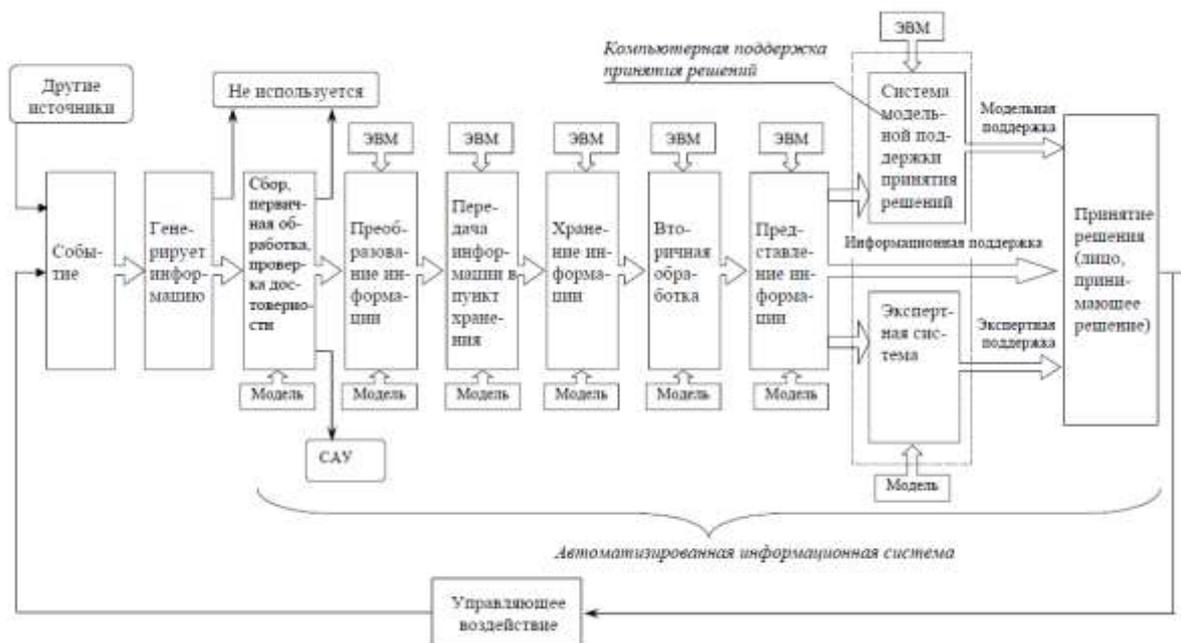


Рисунок. 1.2 – Структура информационной системы

Сложность таких систем в том, что они широки по номенклатуре обрабатываемой информации, сложны по структуре аппаратной платформы и программного обеспечения, территориально распределены и различны в алгоритмах обработки информации. Поэтому ошибки на начальных стадиях создания информационной системы особенно дороги.

1.1.2 Алгоритмы сбора и обработки первичной технологической информации с металлургических агрегатов

Первичные технологические данные доставляются через интерфейсы устройств связи с объектом (УСО) от внешних систем и устройств. Предложенный алгоритм обрабатывает данные и выдает сообщения о происходящих изменениях значений параметров базы данных.

Входной информацией для задачи обработки являются:

- первичные значения в формате интерфейсов УСО;
- нормативно-справочная информация, хранящаяся в паспортах БД;
- информация, вводимая техническим персоналом с автоматизированных рабочих мест.

Результаты работы задачи обработки информации:

- текущие значения технологических параметров и признаки их достоверности;
- текущие значения технологических параметров, приведенные к единому формату хранения;
- выдача различных текстовых сообщений и звуковая сигнализация о происходящих изменениях по мере их поступления;
- уведомления об изменениях, которые могут быть транслированы интерфейсами экспорта данных во внешние системы.

1.1.2.1 Обработка аналоговых параметров

Цикл начинается с расчета интегрального значения методом прямоугольников на основе предыдущего значения обрабатываемого параметра. Далее выполняется получение текущего значения. В случае если оно оказывается недостоверным или не соответствует рабочему диапазону, заданному нижней и верхней возможными границами измерений, дальнейшая обработка данного параметра заканчивается. Иначе значения проходят следующую обработку:

- линеаризацию измеренного значения;
- проверку на корректность полученного значения;
- контроль над скоростью изменения значения параметра;
- сглаживание кода параметра;
- запись обработанного значения в БД;
- подправку интегрального значения по методу трапеций;
- проверку на нарушение границ контроля параметра (с выводом соответствующего сообщения и включением звуковой сигнализации).

Линеаризация используется только для аналоговых параметров со шкалами с нелинейными характеристиками. Можно использовать следующие алгоритмы линеаризации:

- датчики с квадратичной шкалой $y_n=64x_n$;
- термопары и термометры сопротивления с типами градуировок ТСП 20, ТСП 1, ТСП 22, ТХК, ТХА, ТПП: $y_n=A_0+x_n(A_1+x_n)$.

Для подавления наложенных на параметры технологического процесса помех в составе подпрограмм обработки могут быть включены подпрограммы, реализующие следующие алгоритмы сглаживающих фильтров:

1. $Y_n = k_1 * x_n + k_2$;
2. $Y_n = k_1 * x_n + k_2 * y_{n-1} + k_3$;

при $n=0$ и $n=1$ $Y_0 = Y_{(-1)} = X_{(1)}$, где x_n и y_n – соответственно несглаженное и сглаженное значение параметра на n -ом шаге измерения; y_{n-1} – сглаженное значение параметра на $(n-1)$ -м шаге измерения; y_{n-2} – сглаженное значение параметра на $(n-2)$ -м шаге измерения; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты сглаживания, причем $k_1+k_2+k_3 = 1$.

Результат измерения после блока линеаризации не должен превышать возможных границ контроля обрабатываемого параметра. В случае нарушения этих границ выставляется бит достоверности параметра и номер нарушенной возможной границы контроля, дальнейшая обработка параметра не производится.

1.1.2.2 Обработка дискретных параметров

Выполняется получение текущего значения. В случае если оно оказывается недостоверным, обработка параметра заканчивается. Иначе значения проходят следующую обработку:

- запись обработанного значения в БД;
- контроль времени изменения параметра;
- проверку на изменение состояния параметра с выводом соответствующего сообщения и включением звуковой сигнализации.

1.1.2.3 Обработка параметров типа счетчик времени, счетчик импульсов

Рассчитывается новое значение параметра. Если значение параметра, по которому ведется счет времени, не совпадает со значением, при котором счет следует вести, ставится признак недостоверности, дальнейшая обработка данного параметра заканчивается. Иначе значения проходят следующую обработку:

- запись обработанного значения в БД;
- проверку на превышение установленного максимально возможного значения данного параметра счетчик времени (с выводом соответствующего сообщения и включением звуковой сигнализации).

1.1.2.4 Обработка параметров типа измерительная линия

Рассчитывается новое значение параметра на основе текущих значений соответствующих привязанных параметров и формирование признака достоверности в зависимости от достоверности значений исходных параметров.

1.1.2.5 Обработка параметров типа счетчик внешний, внешний таймер, дата- время

Выполняется получение текущего значения и его достоверности из УСО. Обработка не производится.

1.1.2.6 Расчет интегральных значений

Обработка технологических данных в процессе подсчета интегральных значений разделяем на две части по двум методам подсчета: методом прямоугольников и методом трапеций. Подсчет интегральных значений методом прямоугольников ведется всегда (вне зависимости от признака достоверности параметра). Оно рассчитывается из предположения, что значение данного параметра не изменилось. В дальнейшем, если значение

интегрируемого параметра достоверно, результирующее интегральное значение корректируется (увеличивается или уменьшается) на величину изменения значения данного параметра.

1.1.2.7 Контроль за изменением параметров

Данный способ обработки значений используется для всех параметров, которые имеют признак достоверности текущего параметра. Каждый параметр, в зависимости от его типа, имеет свои критерии оценки изменения его значения и определения граничных условий. Нарушение значением параметра этих граничных условий назовем событием по данному параметру. Каждое такое событие сопровождается при необходимости звуковым сигналом и выводом соответствующего сообщения на соответствующее устройство.

По способу контроля за изменением значений параметров, способу задания граничных условий и виду сообщений о нарушении этих условий параметры базы данных в зависимости от их типа можно разделить на 3 группы:

- аналоговые параметры;
- счетчик времени, счетчик импульсов, внешний таймер, внешний счетчик;
- дискретные и дискретные расчетные параметры.

Контроль за состоянием технологического процесса первой группы параметров необходимо осуществлять путем задания следующих полей:

- нижняя и верхняя технологические границы контроля;
- нижняя и верхняя аварийные границы контроля;
- нижняя и верхняя возможные границы контроля.

Событием для первой группы параметров является каждое нарушение (переход в ту или иную сторону) какой-либо границы. При этом необходимо выдавать сигнал и выводить сообщение.

Если принять за x - измеренное текущее значение параметра, за y_n - значение нижней границы контроля, а за y_v - значение верхней границы контроля, то состояние нарушения границы контроля можно записать соотношениями:

- $x \leq y_n$ – нарушение нижней границы контроля;
- $x \geq y_v$ – нарушение верхней границы контроля.

Состояние нарушения параметром нижней или верхней границы контроля считается устраненным, если выполнится соответственно соотношение:

- $x > y_n + d$ – устранение нарушения нижней границы контроля;
- $x < y_v - d$ – устранение нарушения верхней границы контроля,

где d – значение зоны нечувствительности.

Контроль за состоянием технологического процесса параметров второй группы необходимо осуществлять путем задания времени срабатывания сигнализации по данному параметру. Для этой группы событием является каждое превышение текущего значения параметра, заданного временем срабатывания сигнализации. При этом должна быть возможность изменять время срабатывания сигнализации и (или) обнулять текущее значение параметра (счетчик).

Контроль за состоянием технологического процесса параметров третьей группы необходимо осуществлять путем формирования пользователем текстов возможных состояний. Для этой группы событием является каждое изменение текущего значения (состояния) параметра.

1.1.3. Алгоритмы сбора и обработки информации в нечетких условиях (на примере доменного производства)

Автоматизированный технологический комплекс доменной печи характеризуется следующими основными признаками:

- большим объемом контролируемых переменных;

- отсутствием возможности непосредственного контроля отдельных параметров, т.е. низкой прозрачностью процесса выплавки чугуна;
- недостаточной точностью и представительностью результатов контроля параметров, определяющих ход доменной плавки;
- существенным запаздыванием информации о составе продуктов плавки;
- наличием случайных помех различной природы и характера, снижающих качество информации.

Обработка информации возложена на агрегатную подсистему, которая решает следующие функции:

- обработка данных, включая масштабирование;
- синхронизация работы подсистем;
- организация архивов по выбранным параметрам;
- резервирование каналов передачи данных;
- визуализация накопленной информации;
- расчет и выбор законов управления и настроек;
- хранение и дистанционная загрузка управляющих программ;
- обмен информацией с диспетчерским уровнем и подсистемами нижнего уровня;
- хранение данных.

Доменная печь является организованной управляемой интерактивной системой (рисунок 1.3).

Состояние этой системы определяется закономерностями комплекса физических процессов, протекающих в доменной печи, особенностями технологии, зависящей от конкретных топливно-сырьевых условий и оборудования доменной печи, включающей систему подготовки шихты, комбинированного дутья, систему обработки продуктов плавки, и принятым способом управления [2, 3]. В связи с этим при оценке эффективности до-

менной плавки приходится анализировать не только процесс выплавки чугуна в доменной печи с его комплексом физических закономерностей, но и организованную функциональную систему с системами сбора информации и управления.



Рисунок 1.3 – Управляемая технологическая система доменной печи: V_0 , U_0 , Y_0 – отчетные данные о параметрах и показателях работы доменной печи; V – входные воздействия; U – управляющие воздействия; Y – выходные показатели процесса; Z_x – неконтролируемые изменения внутренних характеристик процесса; $Z_{V,U}$ – неконтролируемые изменения входных и управляющих воздействий; Z_y – потери чугуна со скрапом и шлаком, вынос колошниковой пыли; $Ц$ – целевая функция управления;

A – алгоритм управления; O – ограничения.

При анализе технологического процесса выделяем следующие группы переменных:

- режимные параметры, отражающие средние значения контролируемых входных воздействий при установившемся состоянии технологического процесса (V , U);
- средние значения количественных и качественных показателей технологического процесса (Y);

- возмущения, которые условно можно разделить на внешние, приложенные к входам и выходам процесса ($Z_{v,u}$, Z_y), и внутренние, приложенные к состоянию процесса (Z_x).

Переходные процессы, связанные с действием возмущений, приводят к изменению теплового состояния процесса и, следовательно, к изменению состава продуктов плавки. При этом доменная печь как объект управления обладает большой инерционностью по отдельным каналам воздействий (постоянная времени достигает 2 – 4 часа) и запаздыванием (время запаздывания объекта 6 – 7 часов). Так при изменении состава шихты переходной процесс длится до 15 -16 часов. Эти обстоятельства значительно усложняют процесс управления. Компенсация колебаний химического состава чугуна осуществляется технологами в основном в основном за счет изменения массы кокса в подачу или изменения дутьевых параметров, распределения материалов и газов в колошнике. Величина управляющих воздействий определяется статическими и динамическими характеристиками процесса. Эти характеристики являются нелинейными и изменяются во времени при колебаниях условий плавки, требуя соответствующего изменения и величины управляющих воздействий.

Низкая точность оперативной информации, получаемой с объектов управления доменным процессом, возникающая ввиду погрешности датчиков замера технологических параметров; большого запаздывания при передаче информации по уровням управления; отсутствия возможности замеров параметров во всех точках технологического процесса, необходимых для моделей приводят к необходимости учета неопределенности информации. Наличие неопределенности информации вызывает неточность в задании переменных величин в моделях, начальных и граничных условий. Неточность моделей может возникать из-за неверно проведенной декомпозиции общей задачи управления, излишней идеализации модели сложного

процесса, разрыва существенных связей в технологическом комплексе, линеаризации, дискретизации, замены фактических характеристик оборудования паспортными, нарушения допущений, принятых при выводе уравнений (стационарности, изотермичности, однородности и т.д.). Ввиду большой сложности объекта, существенной нелинейности, трудностей формализации, наличия различных субъективных критериев и ограничений могут применяться нечеткие модели.

Крайне важным является правильный выбор для соответствующего уровня управления модели и объема передаваемых для расчетов данных. Усложнение математической модели, учитывающей большое число измеряемых параметров, приводит к снижению погрешности, вносимой моделью. Однако при большой размерности моделей очень существенной становится составляющая ошибки, вносимая неточностью применяемых аналитических и численных методов. Время решения задачи большой размерности также может стать неприемлемым при ее решении в реальном масштабе времени. Усложнение математической модели требует увеличения объема данных, передаваемых с нижнего уровня, а также приводит к росту соответствующей составляющей ошибки. Поэтому требуется находить разумный компромисс между этими факторами в зависимости от уровня управления.

Ввиду такой большой доли погрешности исходных данных, возникает и погрешность в расчете целевой функции, что приводит к значительной зоне неопределенности при выборе оптимального режима работы системы. Отсюда возникает необходимость разработки методов, учитывающих неопределенность исходных данных при решении задач многоуровневого управления технологическими процессами. Все методы можно разделить на две основные группы:

- подавление влияния неточной информации с дальнейшим использованием обычных детерминированных алгоритмов;
- переход при наличии неточной информации на специальные алгоритмы (стохастические, нечеткие, интервальные).

Применяются также методы восстановления отсутствующих данных, интерполирования и экстраполирования, робастные алгоритмы [4]. Свойство робастности выделяет класс процедур нечувствительных к небольшим изменениям исходных (начальных) предположений.

При решении задач в детерминированной постановке с ростом сложности и размерности модели возникают большие проблемы с устойчивостью оптимизационных задач. Сам процесс оптимизации подразумевает вывод системы на определенные предельные ограничения. В этой ситуации даже незначительные колебания второстепенных параметров (например, температуры) могут привести к потере режима. На практике диспетчерской службы не придерживаются этих границ с такой точностью - до второго – третьего знака после запятой, да и многие ограничения чаще всего являются «мягкими», допускающими их незначительное нарушение. Просто расширить эти ограничения нельзя – процедура оптимизации тут же доведет режим до новых границ и проблема устойчивости останется. Поэтому только представление ряда ограничений как нечетких дает возможность получать устойчивое решение в условиях погрешности информации и нечеткости производственных ограничений с указанием снижения степени допустимости этого режима, т.е. в виде функций принадлежности. Постановка задачи в нечеткой форме также значительно снижает возможность получения несовместимых решений при расчете и оптимизации. Принципиальным недостатком детерминированных моделей систем является отсутствие эффективных методов сравнения различных возможных моделей по назначению модели, ее погрешности и адекватности допуще-

ний, положенных в ее основу [6]. Построение моделей в рамках нечеткого подхода позволяет сравнивать модели и придавать точный смысл таким понятиям как «значимый» и «пренебрежимый». Появляется возможность формализации неточных знаний о предметной области, внесения в модель сведений о неполноте информации. За счет учета условий существования моделей, самих особенностей минимаксных операций Заде с помощью применения аппарата нечетких множеств удается добиться робастности алгоритмов, т.е. их нечувствительности к малым отклонениям от предположений.

Данные для расчета, получаемые с датчиков и контрольно-измерительных приборов всегда имеют погрешность порой очень значительную. Поэтому необходимо во всех задачах расчета и оптимизации использовать методы устойчивого приближенного решения некорректно поставленных задач. Эти методы основываются на использовании дополнительной априорной информации об искомом решении [7]. Примерами такой дополнительной информации являются:

- информация о монотонном, незначительном изменении во времени некоторых параметров (например, в виду инерционности объекта);
- априорная информация о принадлежности решения некоторому компактному множеству корректности.

Проблеме построения алгоритмов управления объектами с неполной информацией в настоящее время уделяется большое внимание. Это объясняется, прежде всего, тем, что при создании систем управления сложными технологическими процессами обычно не располагают достоверными моделями объектов. Ни одна из существующих теорий не может претендовать на то, что единственно она дает правильное описание работы систем. Скорее имеется целый спектр теорий, трактующих эти проблемы. При имеющемся сейчас узком рассмотрении лишь отдельных процессов и

только на определенных уровнях описания получается одностороннее представление о системе, не позволяющее иметь достоверные оценки обо всех процессах.

Поведение реальной системы характеризуется некоторой неопределенностью, причем при достаточно большом объеме информации об объекте внешнее возмущение, действующее на управляемый объект, можно представить как случайный процесс.

Стохастическое оптимальное управление в значительной степени базируется на основных положениях динамического программирования.

Для линейных систем с квадратичным критерием решение дается так называемой теоремой разделения, которая позволяет составлять оптимальную стратегию из двух частей: оптимального фильтра, который вычисляет оценки состояния в виде условного среднего при заданных наблюдениях выходных сигналов и линейной обратной связи. Линейная обратная связь может быть найдена путем решения задачи детерминированного управления. Оценка состояния характеризует выходную переменную фильтра Калмана, который по существу представляет математическую модель системы, когда управление осуществляется по наблюдениям.

Поведение динамического объекта может описываться уравнением состояния:

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma Q_k \quad (1.12)$$

при следующей схеме измерений:

$$Y_k = H x_k, \quad (1.13)$$

где Y_k – m - вектор замеров; $H[m, n]$ – матрица измерений. Рассмотрим, при каких условиях можно получить необходимую информацию о состоянии объекта, измеряя его выходные сигналы:

$$y_0 = H x_0; y_1 = H \Phi x_0; \dots; ; y_l = H \Phi^{l-1} x_0 \quad (1.14)$$

или транспонируя, получаем:

$$[y_0^T y_1^T \dots y_{n-1}^T] = x_0^T [H^T \Phi^T H^T \dots (\Phi^T)^n]. \quad (1.15)$$

Так как векторы y известны, существует единственное решение x_0 , когда матрица

$$N = [H^T \Phi^T H^T \dots (\Phi^T)^{n-1} H^T] \quad (1.16)$$

имеет ранг n . В этом случае пара (Φ, H) называется наблюдаемой. Тогда, если принять нестационарную систему:

$$\begin{cases} x_{k+1} = \Phi_{k+1,k} x_k + \Gamma_{k+1,k} Q_k \\ y_k = H_k x_k \end{cases} \quad (1.17)$$

квазистационарной на интервале дискретности T , то условия полной наблюдаемости системы (1.12) можно свести к нахождению ранга матриц N_k в опорных точках траектории коэффициентов матриц Φ_k, H_k , где k - количество опорных точек или интервалов дискретности. При высоких размерностях вектора состояния решение этой задачи требует довольно сложных алгоритмов и значительного объема вычислений. Чтобы устранить эти затруднения, образуют новые матрицы наблюдаемости W_k , в виде

$$W_k = N_k N_k^T, \quad (1.18)$$

где W_k - всегда квадратные матрицы размерностью $n \times n$. Таким образом, оценка наблюдаемости многомерных нестационарных объектов может быть сведена к простой процедуре вычисления в опорных точках определителей матриц W_k . При этом для полной наблюдаемости объекта необходимо, чтобы $\det W_k \neq 0$.

При построении адаптивных систем управления нестационарными объектами учет условий идентифицируемости, как и условий наблюдаемости, является принципиально необходимым. В противном случае задача не может быть решена или же будут получены неправильные результаты с физической точки зрения. Предполагая, что скорость изменения параметров нестационарной системы достаточно мала по сравнению со временем переходного процесса в системе, нестационарную систему можно заменить

эквивалентной системой с кусочно-постоянными параметрами. Тогда условие идентифицируемости можно получить следующим образом:

$$x_1 = \Phi x_0; \quad x_{n-1} = \Phi^{n-1} x_0. \quad (1.19)$$

или

$$[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n-1}] = \Phi [x_0 \ \Phi x_0 \ \dots \ \Phi^{n-1} x_0] \quad (1.20)$$

Так как векторы x_i известны, существует единственное решение для Φ , когда матрица V имеет ранг n

$$V = [x_0 \ \Phi x_0 \ \dots \ \Phi^{n-1} x_0] \quad (1.21)$$

При невозможности прямого измерения всех компонент вектора состояния, обычный классический подход к оценке методом наименьших квадратов приводит к использованию непоследовательных схем оценки, основной недостаток которых состоит в необходимости повторять полный расчет каждый раз, когда производится дополнительное наблюдение. Рекуррентные алгоритмы дают возможность уменьшить количество вычислительных операций и существенно упрощают программирование задач оценки. Алгоритм оптимальной в среднеквадратическом смысле оценки состояния динамической системы можно записать в виде:

$$\begin{aligned} x_{k+1,k+1} &= x_{k+1,k} + k_{k+1} (y_{k+1} - H_{k+1} - H_{k+1} x_{k+1,k}) \\ x_{k+1,k} &= \Phi_{k+1,k} x_{k,k} + \Gamma_{k+1,k} Q_k + G_{k+1,k} m_k \\ k_{k+1} &= F_{k+1} H_{k+1}^T (H_{k+1} F_{k+1,k} \\ &\quad + G_{k+1,k} e_k G_{k+1,k}^T)^{-1} \\ F_{k+1,k} &= \Phi_{k+1,k} F_{k,k} \Phi_{k+1,k}^T + G_{k+1,k} e_k G_{k+1,k}^T \\ F_{k+1,k+1} &= (I - k_{k+1} H_{k+1}) F_{k+1,k} \end{aligned} \quad (1.22)$$

Формулы (1.22) образуют рекуррентный алгоритм обработки измерений информации с объекта управления. Новая оценка состояния строится как экстраполированная по уравнениям динамики системы, старая

оценка плюс "взвешенная" разность между измерением выхода и прогнозом этого измерения на основании прошлых измерений". Для начала рекуррентной процедуры вычисления необходимы априорные сведения о ковариационных матрицах шумов e , R и начальном состоянии системы $x_{0,0}$ и F_0 .

Полученный алгоритм оценки состояния совпадает с фильтром Калмана, так как в основе алгоритмов лежит один и тот же критерий оптимальности и приняты те же самые ограничения.

Однако в отличие от существующих алгоритмов здесь рассматривается управляемое движение нестационарных объектов, и при этом учитываются ошибки измерений и нестационарность внешних возмущений.

Использование фильтров Калмана для оценки вектора $x_{k,k}$ предполагает наличие большой оперативной памяти ЭВМ и связано с методами декомпозиции исследуемого процесса. Поэтому для практических целей удобнее применять методы стохастической аппроксимации. Обозначим скалярный показатель качества идентификации, определяемый в виде:

$$j = \frac{1}{2} \| z_{k+1} - H_{k+1} x_{k+1} \|^2. \quad (1.23)$$

Оценка вектора состояния получается из алгоритма стохастической аппроксимации следующим образом:

$$x_{k+1,k+1} = x_{k+1,k} - P_{k+1} \frac{\partial j_{k+1}}{\partial x_{k+1,k}}. \quad (1.24)$$

Применение стохастических методов для контроля и управления процессом в некоторых ситуациях оказывается затруднительным ввиду отсутствия вероятностных распределений параметров. Сложность получения численных результатов при работе со случайными величинами также снижает практическую ценность стохастических алгоритмов.

Наряду с вышеизложенным в случае неполной информации о сложном процессе, возможно, представлять неточно заданные параметры в виде

нечетких величин и при работе с ними пользоваться теорией нечетких множеств [8–13].

1.2 Разработка имитационной модели хранения и распределения потоков информации с металлургических агрегатов

Всплеск интереса к развитию теории и методов имитационного моделирования можно отнести к середине 60-х годов прошлого века. Его можно объяснить, прежде всего тем, что это метод исследования, позволяющий строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности, когда изучаемая система заменяется моделью с достаточной точностью описывающей реальную систему и с ней проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе.

Такую модель можно «проиграть» во времени как для одного испытания, так и заданного их множества. При этом результаты будут определяться случайным характером процессов. Эксперт с помощью этих моделей и серии специально организованных вариантных расчетов получает те знания, без которых выбрать альтернативный вариант своей стратегии он не может. По этим данным можно получить достаточно устойчивую статистику.

Самое важное, что оказывается необходимым для реализации подобных идей – это умение организовать серию вариантных расчетов: эксперту важно представить себе характер изучаемого процесса, степень его «управляемости», характер предельных возможностей (множеств достижимости), т.е. организовать многократно повторенный машинный эксперимент с моделью. Экспериментирование с моделью называют имитацией (имитация – это постижение сути явления, не прибегая к экспериментам на реальном объекте).

Имитационное моделирование – это частный случай математического моделирования. Реализация имитационных моделей чаще всего пред-

ставляет собой компьютерную программу, которая шаг за шагом воспроизводит события, происходящие в реальной системе. Преимуществом имитационных моделей является возможность подмены процесса смены событий в исследуемой системе в реальном масштабе времени на ускоренный процесс смены событий в темпе работы программы. Результатом работы имитационной модели являются собранные в ходе наблюдения за протекающими событиями статистические данные о наиболее важных характеристиках сети: временах реакции, коэффициентах использования каналов и узлов, вероятности потерь пакетов и т.п.

Существует класс объектов, для которых по различным причинам не разработаны аналитические модели, либо не разработаны методы решения полученной модели. В этом случае математическая модель заменяется имитатором, который формирует логико-математическое описание объекта и может быть использован для экспериментирования на компьютере в целях проектирования, анализа и оценки функционирования объекта.

1.2.1 Применение имитационного моделирования

Металлургические агрегаты относятся к объектам, проведение экспериментов с которыми достаточно затруднительно. Возникают сложности и с построением аналитической модели: ведь в системе есть такие значимые переменные, как время, причинные связи, последствие, нелинейности, стохастические (случайные) переменные. Основная сложность – функционирование всей системы во времени. Поэтому нужно определить базовые элементы системы и существенные взаимосвязи между ними. Следовательно, при формировании имитационной модели в данном случае необходимо учесть:

- принцип последовательного продвижения по этапу создания системы. Это значит, что система должна исследоваться как на макроуровне, т.е.

во взаимоотношении с окружающей средой, так и внутри своей структуры;

- принцип согласования информационных, ресурсных и других характеристик проектируемых систем;
- принцип отсутствия конфликтов между целями отдельных подсистем и целями всей системы.

При построении имитационной модели был выбран синтез между агентным подходом и дискретно-событийным моделированием. Он применим в основном для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами (как в других парадигмах моделирования), а результатом индивидуальной активности объектов системы. Необходимо абстрагироваться от непрерывной природы событий и рассматривать только основные события моделируемой системы, такие как: «ожидание», «обработка заказа», «движение» и другие. Построение модели базируется на задаче получить представление об глобальных правилах функционирования составляющих системы, индивидуальных характеристиках отдельных активных объектов и их взаимодействии между собой, а также общем поведении системы.

Основной алгоритм будет продемонстрирован на основе металлургического агрегата «Комплекс МНЛЗ №6» ОАО «ММК» – «Система назначения и сопровождения плавок кислородно-конвертерного цеха».

1.2.2 Структурный анализ функционирования машины непрерывного литья заготовок и имитационной модели

Для создания надежной имитационной модели такого сложного агрегата как машина непрерывного литья заготовок необходимо иметь точное представление об устройстве и функционировании рассматриваемого объекта. Для этих целей производится структурный анализ функционирования МНЛЗ и построение IDEF0 диаграмм.

Основной функцией машины непрерывного литья заготовок является получение непрерывно-литой заготовки [14]. На рисунке 1.4 показана схема функционирования машины непрерывного литья заготовок.

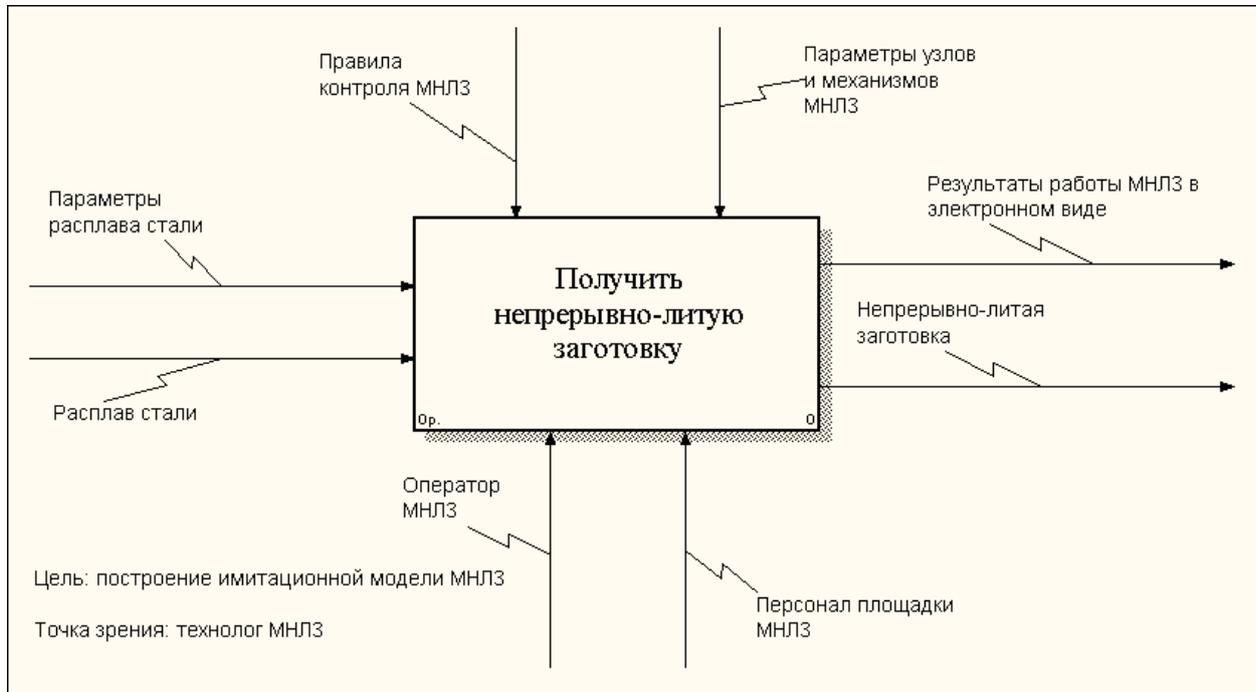


Рисунок 1.4 – Схема функционирования МНЛЗ

Материалом для получения непрерывно-литой заготовки является сталь в жидком состоянии при температуре свыше 1535°C . Так же на пост управления машиной поступают данные о плавке, которая будет разливаться.

Основными ограничениями при функционировании МНЛЗ являются параметры узлов и механизмов машины, а так же правила проведения технологического процесса.

Посредством АСУ ТП МНЛЗ разливкой стали на агрегате управляет квалифицированный персонал. В процессе работы МНЛЗ формируются данные о состоянии агрегата и стали и отправляются в диспетчерскую.

На выходе из агрегата получают заготовки фиксированного сечения.

Как видно из рисунка 1.5 процесс получения непрерывно-литой заготовки можно разделить на два процесса: функционирование агрегата и

функционирование системы управления машиной непрерывного литья заготовок.

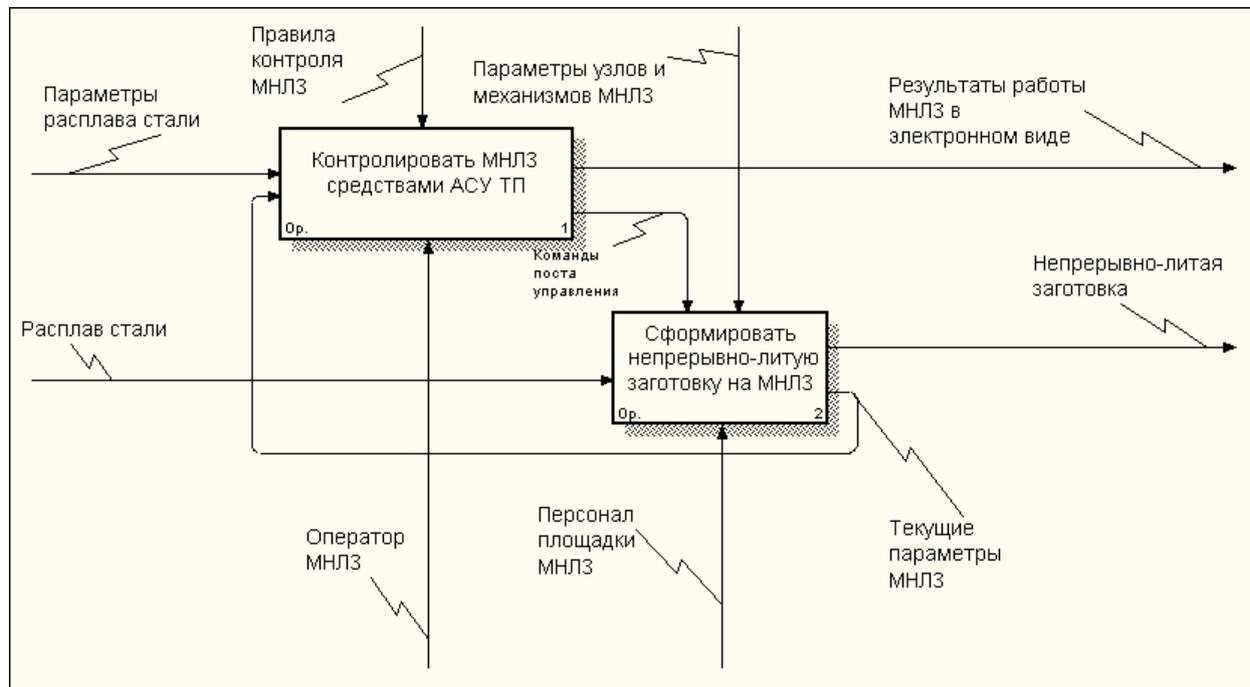


Рисунок 1.5 – Схема технологического процесса МНЛЗ

Система управления машиной непрерывного литья заготовок выполняет три основные функции. Это расчет состояния стали в машине, визуальное отображение состояния агрегата и стали в нем, и обработка команд оператора.

На рисунке 1.6 показано функционирование системы управления МНЛЗ. На основе показаний датчиков агрегата, постоянных параметров агрегата производится расчет и визуализация отображения состояния МНЛЗ.

Интерактивный интерфейс системы управления на основе расчетных данных и правил управления МНЛЗ позволяет оператору контролировать технологический процесс.

Результатом работы системы управления МНЛЗ являются команды для управляющих схем узлов и механизмов агрегата, а так же данные о состоянии агрегата и стали для диспетчерской.

Формирование непрерывно-литой заготовки на МНЛЗ схематично изображено на рисунке 1.7.

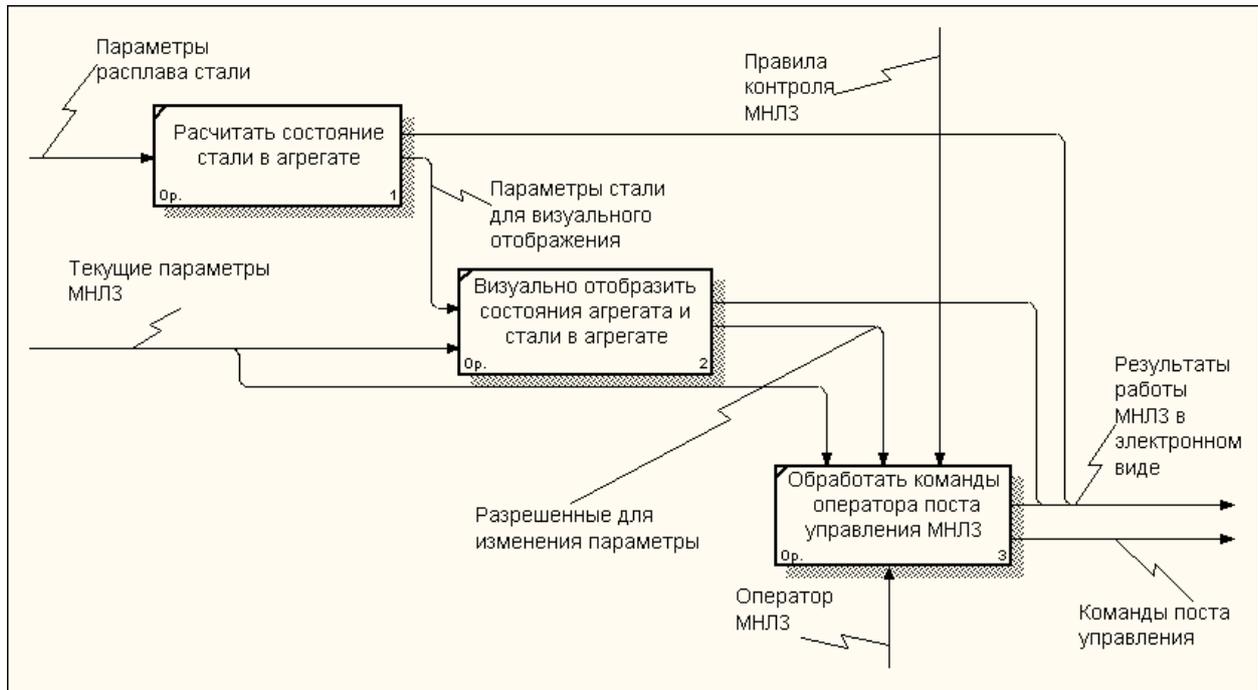


Рисунок 1.6 – Схема функционирования системы управления МНЛЗ

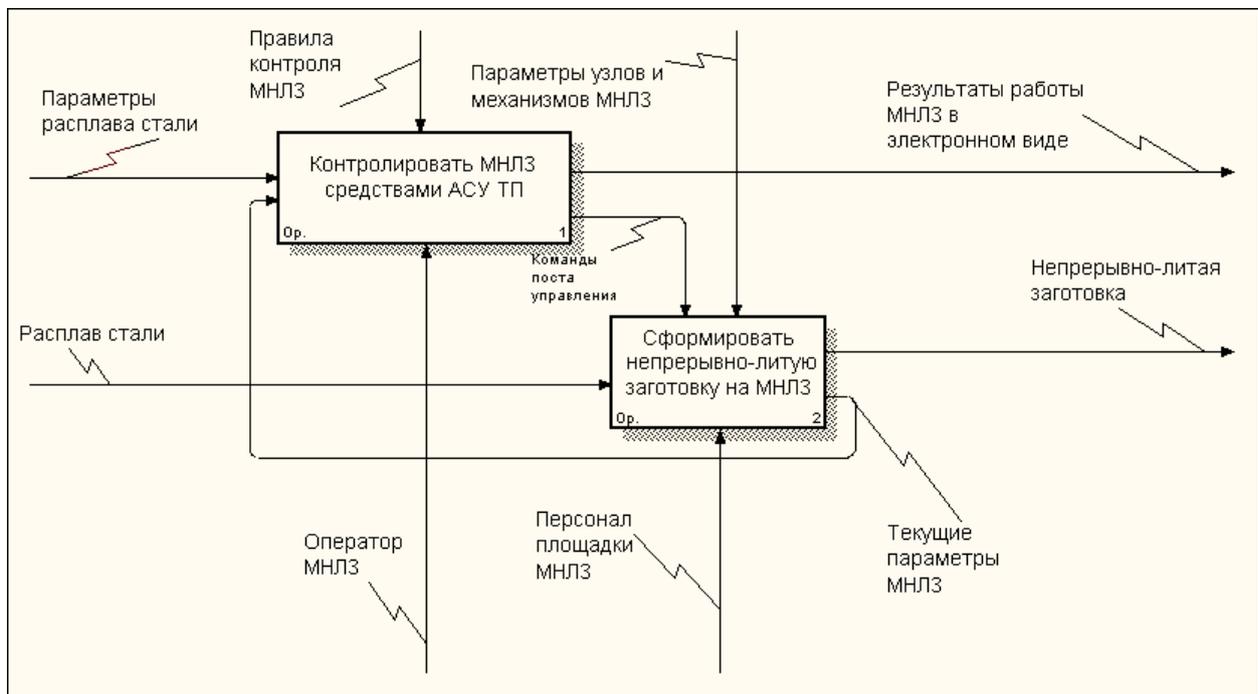


Рисунок 1.7 – Схема получения непрерывно-литой заготовки на МНЛЗ

В первую очередь необходимо обеспечить равномерное распределение стали по ручьям, и обеспечить равномерную скорость истечения стали

в кристаллизаторы даже при смене сталеразливочного ковша. Для реализации данных требований используется промежуточный ковш.

Вторым этапом технологического процесса является формирования оболочки из кристаллизовавшейся стали для придания заготовке заданного сечения. Первичная зона охлаждения слитка – кристаллизатор – отвечает за формирование такой оболочки.

Для окончательного охлаждения слитка до полной кристаллизации всего металла заготовки используется зона вторичного охлаждения.

Исходным материалом для формирования заготовки служит сталь в жидком состоянии – плавка. Технологический процесс происходит в зависимости от параметров агрегата и команд, поступивших от системы управления МНЛЗ.

На рисунке 1.8 приведена общая схема работы имитационной модели МНЛЗ на основе разработанных алгоритмов.

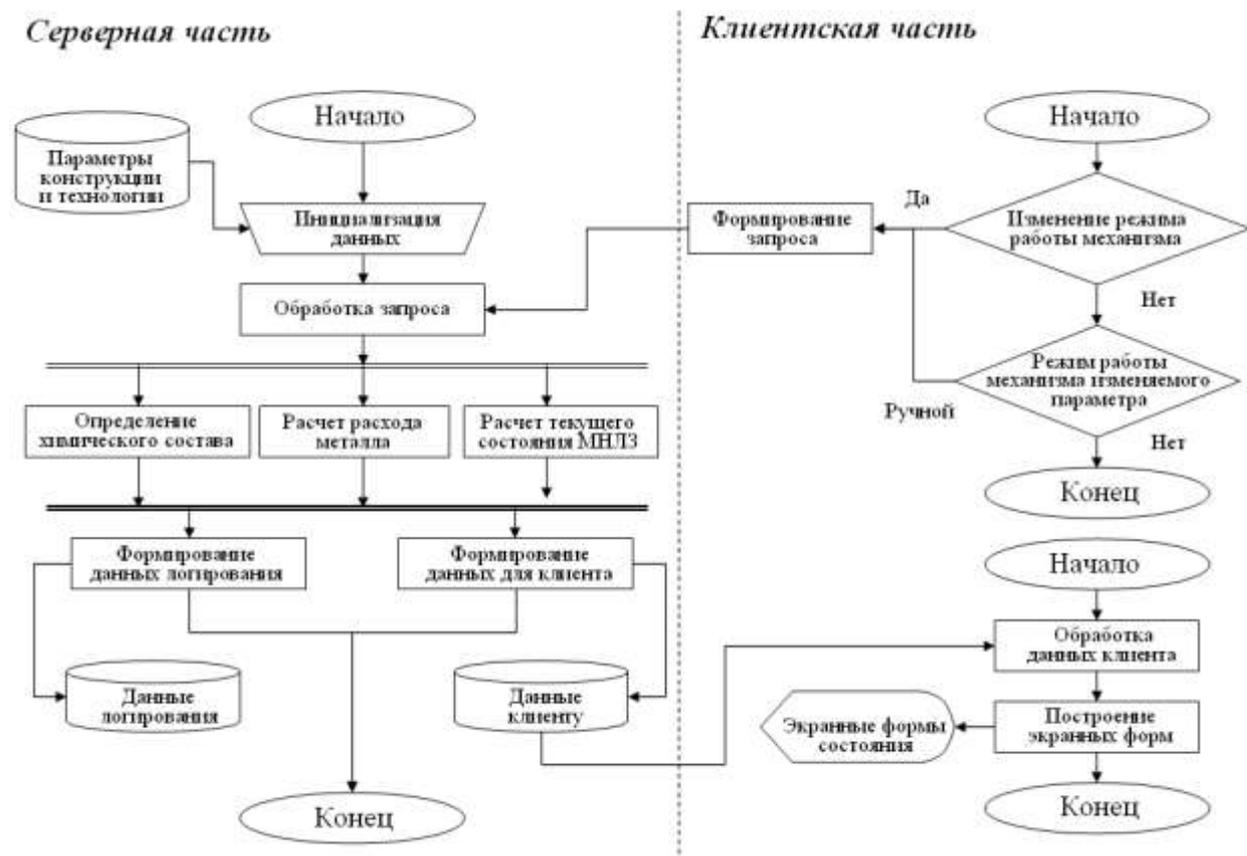


Рисунок 1.8 – Схема функционирования имитационной модели МНЛЗ

Согласно схеме классификации выделены две основные части: серверная и клиентская. Серверная часть включает в себя моделирование непосредственно агрегата, стали и серверной части системы управления МНЛЗ.

Клиентская часть модели соответствует клиентской части системы управления МНЛЗ и реализует две функции: формирование экранных форм на основе данных серверной части, и построение запросов на изменение состояния агрегата на основе текущих данных и запросов оператора.

1.2.3 Принципы построения программного обеспечения имитационной модели

1. Принцип функциональности модулей. Программный комплекс, моделирующий ГПУ МНЛЗ, состоит из 2-х основных частей: программы-сервера и программы-клиента. В свою очередь эти части разделены на модули, реализующие отдельные функциональные алгоритмы. Программа сервер выполняет моделирование всех процессов МНЛЗ, а так же за формирование и ведение протоколов изменений работы МНЛЗ и оператора (логирование). Программа-клиент выполняет формирование запросов пользователя к программе-серверу и вывод информации на экран. Функциональная модель серверной части представлена на рисунке 1.9. Функциональная модель построена при *целеполагании* «Смоделировать работу МНЛЗ при разливке стали» с точки зрения разработчика программного обеспечения.

Запросы на изменения параметров МНЛЗ формируются клиентской части программного комплекса на основе запросов пользователя. Организация и обработка запроса возлагается на один из модулей серверной части. Примерами запросов клиентской части являются: изменение скорости вытягивания на выбранном ручье, изменение частоты качания кристаллизатора, изменение расходов воды в кристаллизаторе и зонах вторичного

охлаждения, изменение режимов работы ручьев, кристаллизаторов, всего агрегата в целом.

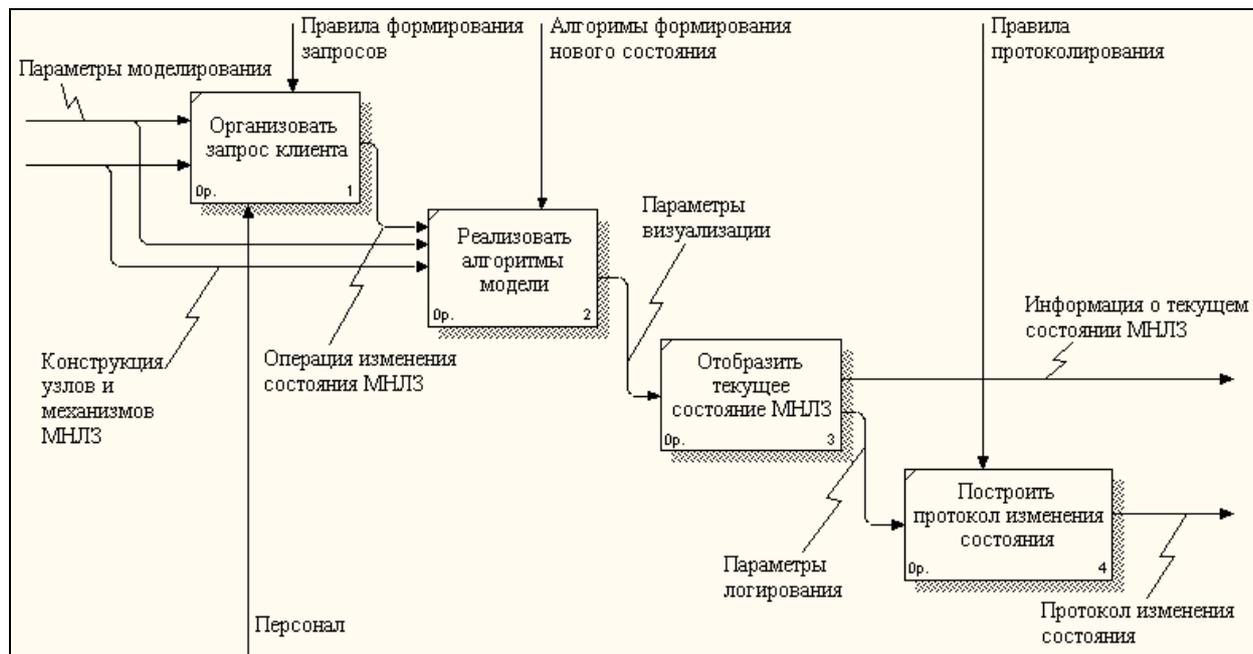


Рисунок 1.9 – Функциональная модель серверной части программного обеспечения имитационной модели

Например, запрос оператора – изменить частоту качания кристаллизатора №1 на 120 клиентом будет передан как запрос на изменение заданной частоты качания кристаллизатора №1 на 120.

2. Принцип протоколирования. В ходе работы программного комплекса ведется запись изменений, сделанных оператором (клиентом) – логирование работы МНЛЗ.

3. Принцип интерактивности. При разработке программного комплекса был определен диалог на основе меню, позволяющего в интерактивном режиме изменять параметры технологического процесса и выбирать формы для отображения его состояния. Схема главного меню программного обеспечения отображена на рисунке 1.10.

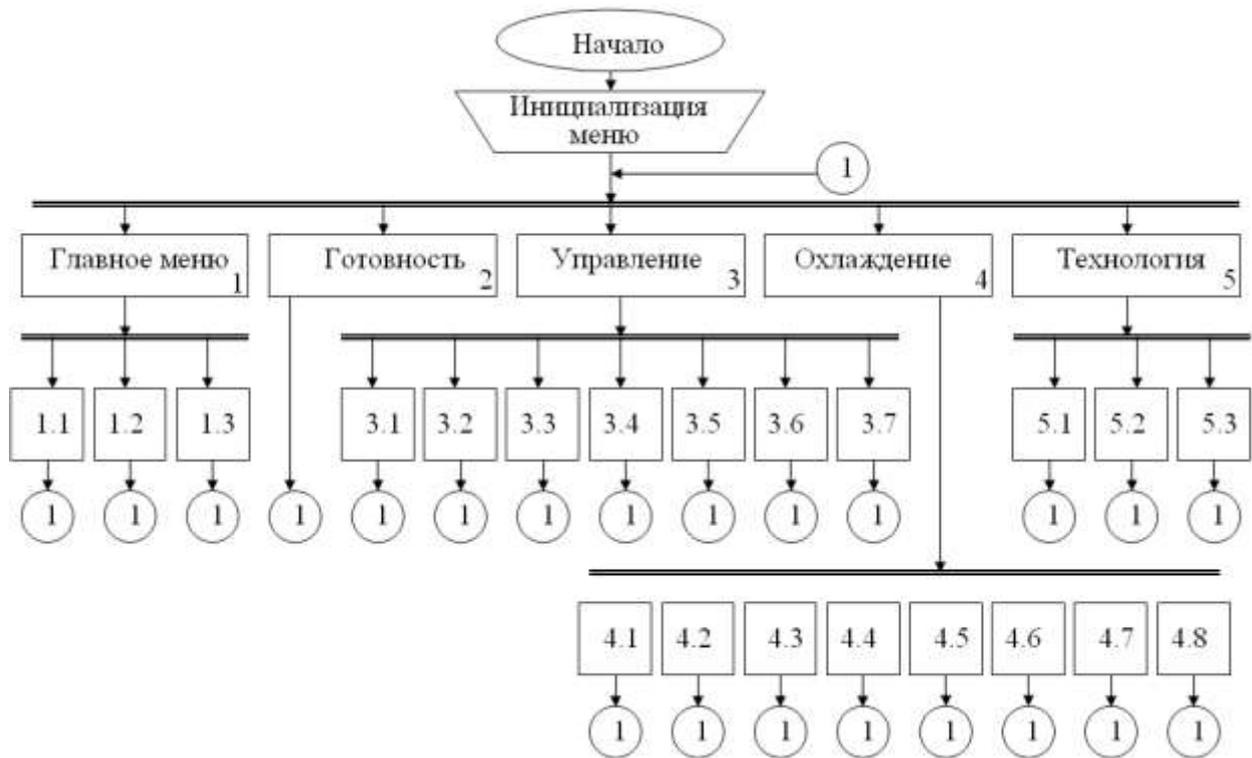


Рисунок 1.10 – Функциональная схема главного меню программного продукта (ГПУ)

Главное меню состоит из 5 основных пунктов.

1. *Главное меню*, позволяющее передавать управление между постами управления МНЛЗ и содержащее подпункты:

1.1. Технология ПУ 1 – главный пуль управления.

1.2. Технология ПУ 2 – пульт управления машиной газовой резки.

1.3. Авторизация.

2. *Готовность*, позволяющее отобразить на экране состояние готовности к работе всех систем МНЛЗ.

3. *Управление*, позволяющее переключать экранные страницы мониторинга ручьев:

3.1. Электронная страница ручья 5.

3.2. Электронная страница ручья 6.

3.3. Электронная страница ручья 7.

3.4. Электронная страница ручья 8.

3.5. Электронная страница ручья 5, 6.

3.6. Электронная страница ручья 7, 8.

3.7. Электронная страница всех ручьев.

4. *Охлаждение*, позволяющее переключать экранные страницы мониторинга систем охлаждения МНЛЗ и заготовки:

4.1. Электронная страница охлаждения кристаллизатора.

4.2. Электронная страница общих подводов охлаждения.

4.3. Электронная страница зон вторичного охлаждения ручьев 5 и 6.

4.4. Электронная страница зон вторичного охлаждения ручьев 7 и 8.

4.5. Электронная страница для регулирования вторичного охлаждения 5 и 6 ручьев.

4.6. Электронная страница для регулирования вторичного охлаждения 7 и 8 ручьев.

4.7. Электронная страница охлаждения опор.

4.8. Электронная страница готовности всего охлаждения.

5. *Технология*, позволяющая контролировать основные параметры плавки:

5.1. Электронная страница результатов химического анализа.

5.2. Электронная страница состояния текущей (следующей) плавки.

5.3. Электронная страница базовых таблиц охлаждения.

4. Принцип ментальности. Электронные страницы программного средства организованы на основе ментальной модели. Ментальная модель позволила использовать метафоры узлов и механизмов реального агрегата для их отображения на общих схемах. На рисунке 1.11 показан пример рабочего окна при управлении разливкой на ГПУ МНЛЗ.

Имитационная модель ГПУ МНЛЗ так же в точности копирует интерфейс программного обеспечения ГПУ МНЛЗ и позволяет представить пользователю всю информацию, которую получает оператор.

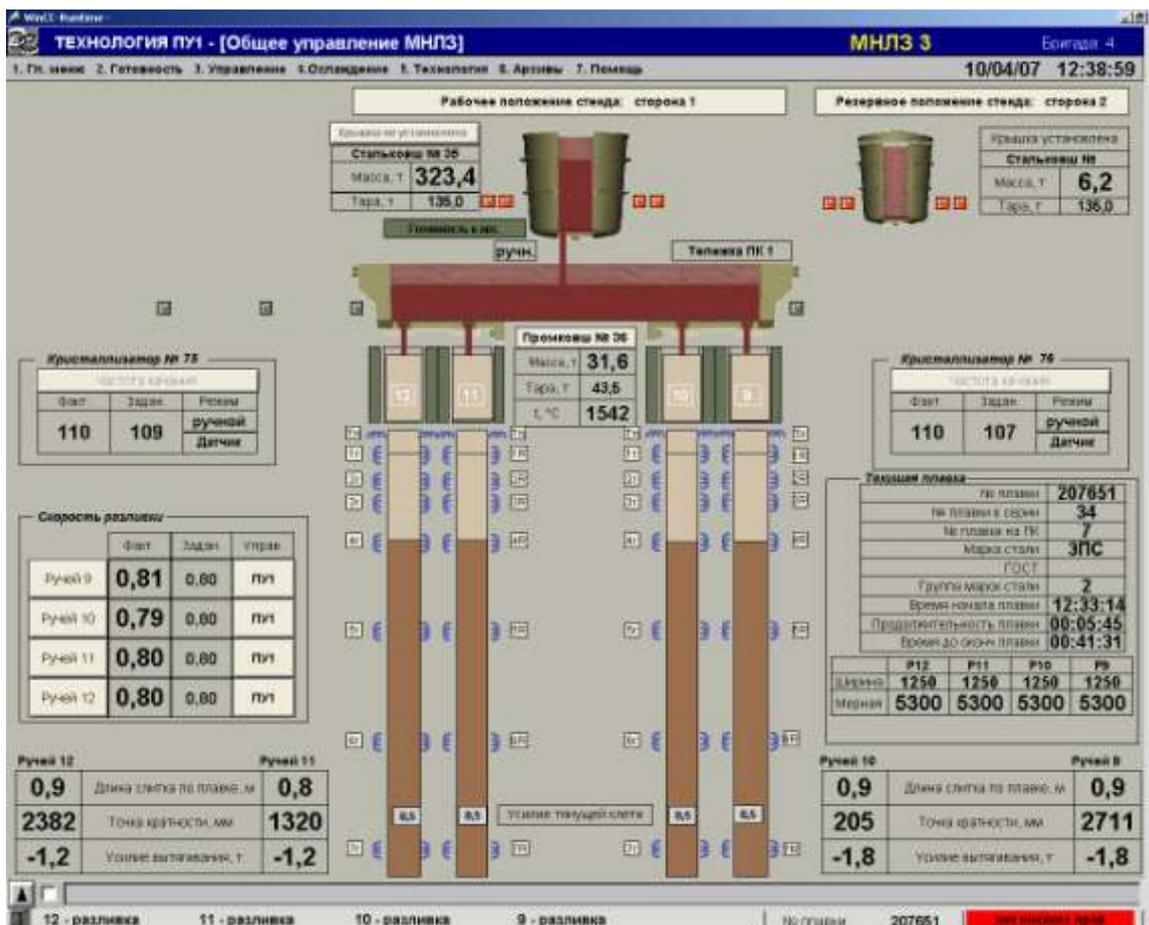


Рисунок 1.11 – Пример рабочего окна программного комплекса ГПУ МНЛЗ

Недостатком ментальной модели является отсутствие отображения теплового состояния металла в сталеразливочном и промежуточных ковшах, а также при нахождении в зонах вторичного охлаждения.

При проектировании и разработке имитационной модели ГПУ МНЛЗ выполнено построение имитационных моделей главного поста управления МНЛЗ, технологических процессов непрерывной разливки стали, затвердевания заготовки в условиях МНЛЗ.

Разработанные алгоритмы и принципы построения программного комплекса позволили создать надежную имитационную модель ГПУ МНЛЗ. Перспективным направлением развития проекта является синтез ГПУ с математическими моделями для описания теплового состояния расплава в сталеразливочном и промежуточных ковшах, описания процессов затвердевания заготовок в МНЛЗ.

1.3 Разработка моделей расчета материального баланса сталеплавильного комплекса действующего производства

Появление дуговых печей с трансформаторами высокой (0,4-0,5 МВ·А/т), а затем и сверхвысокой (1 МВ·А/т и более) мощности, применение в их стенах и сводах водоохлаждаемых панелей обусловило развитие концепции сверхмощной дуговой печи. Проведение технологических периодов в таких печах становится нецелесообразным, так как во время этих периодов мощность трансформатора используется лишь частично. Для более полного использования мощности трансформатора и эффективной работы сверхмощной печи ее целесообразно использовать лишь для расплавления шихты и нагрева металла до необходимой температуры. Операции рафинирования от вредных примесей, получения особонизкого содержания углерода, раскисления и легирования необходимо проводить в агрегатах внепечной обработки стали, сводя к минимуму продолжительность и других вспомогательных операций – заправки печи, загрузки шихты, выпуска металла и т.д. Современная мощная ДСП используется как агрегат для расплавления шихты и получения жидкого полупродукта, превращения которого в сталь заданного состава и качества осуществляется методами внепечной (ковшовой) металлургии.

На ОАО «ММК» в 2006 году фирмой VIA «Fuchs» реализован проект по замене мартеновского производства электросталеплавильным комплексом. В состав него входят две 180 т электродуговые печи и одна 180 т установка ковш-печь. Электросталеплавильный комплекс входит в единую технологическую линию с двумя действующими МНЛЗ, что позволило удвоить выпуск сортового проката. Характеристика установленного на ОАО «ММК» электросталеплавильного оборудования фирмой VIA «Fuchs» приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Проектные характеристики ДСП и АКП ОАО «ММК»

Характеристика	Значение
Электродуговые печи (ДСП)	
Емкость по жидкому металлу, т	210
Масса выпускаемого металла, т	180
Остаток жидкого металла в печи после выпуска, т	30
Мощность трансформатора, МВ А	150
Ступени вторичного напряжения, В	800-1225-1400
Рабочий ток, кА	70
Диаметр электродов, мм	610
Фурмы и горелочные устройства	5 комбинированных горелок системы RCB (2 устройства для вдувания порошка углерода)
Цикл плавки от выпуска до выпуска, мин	48
Число плавов в сутки, шт	до 34
Коэффициент мощности	до 0,82
Выпуск металла из печи	донный эксцентрикового типа VIA «Fuchs» EO-EBT
Выход годного по жидкой стали, %	90
Система АСУ ТП	1 и 2 уровней
Установка ковш-печь	
Тип	VIA «Fuchs» LF с одним постом
Емкость ковша, т	180
Цикл внепечной обработки, мин	40
Мощность трансформатора, МВ А	26
Система газоочистки	
Тип	Рукавные фильтры с системой пульсации
Мощность вентиляторов системы газоотсоса, кВт	2*1900

В данном разделе рассмотрим расчет материального баланса для высокопроизводительного сталеплавильного комплекса, такого как ОАО «ММК». Под материальным балансом будем понимать основные технико-экономические показатели работы сталеплавильного комплекса.

1.3.1 Модель расчета электрических параметров ДСП

Преобразование электрической энергии в тепловую осуществляется в ДСП в основном (на 80-85%) в электрических дугах, горящих в рабочем пространстве печи между графитированными электродами и металлом, покрытым шлаком. ДСП строятся в основном трехфазными, как крупные потребители электроэнергии переменного тока промышленной частоты 50 Гц. Электрические дуги горят над металлом и представляют нагрузку, соединенную по схеме «звезда» с расположением нулевой точки либо на твердой шихте, либо в жидком металле [19]. Подина в этом случае не является токопроводящей. Каждая дуга находится под фазным напряжением, которое в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного напряжения, приложенного между электродами.

- Электрическое питание ДСП от высоковольтных линий электропередачи (6, 35, 110 и 220 кВ) осуществляется через главные заводские понизительные подстанции (ГПИ) и затем через специальные понизительные печные трансформаторы, которые позволяют подавать линейное напряжение на электроды.

Методика расчета оптимальных электрических режимов дуговых сталеплавильных печей совершенствовалась, развивалась вместе с печами. Эксплуатационные коэффициенты электропечной установки сильно зависят от электрического режима. Рациональный электрический режим для каждой ступени мощности и вторичного напряжения – важнейшее и необходимое условие ее эксплуатации. Для определения таких режимов строят рабочие характеристики, изображающие зависимость между силой тока дуги I_d , кА и электрическими показателями работы ДСП.

Основными исходными для расчета электрическими параметрами ДСП считают:

1. Номинальную полную мощность электропечного трансформатора

S_n , кВ А, определяемую путем технико-экономического анализа по минимуму приведенных затрат;

2. Высшую ступень вторичного линейного напряжения $U_{2л}$ и соответствующее значение фазного напряжения $U_{2ф} = \frac{U_{2л}}{\sqrt{3}}$, В;

3. Номинальную силу тока $I_{д.ном}$, протекающего во вторичной цепи трансформатора, то есть через дугу $I_{д.ном} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{2л}}$, кА;

4. Эквивалентное активное сопротивление R электрической цепи одной фазы ДСП в эксплуатационном режиме, определяемое из опыта к. з. (короткого замыкания);

5. Эквивалентное индуктивное сопротивление X одной фазы ДСП в эксплуатационном режиме, также определяемое из опыта к. з.

Трехфазную ДСП можно представить как три однофазные цепи, а каждую фазу заменить эквивалентной схемой замещения (рис. 1.12). Поскольку мощность, выделяемая на активном сопротивлении участка электрода $R_{эо}$, расположенного ниже свода, участвует в теплообмене в свободном пространстве ДСП, эту часть R рассматривают как часть полезного сопротивления ДСП. По данным Н. В. Окорокова [18], в крупных ДСП мощность, выделяемая электродами, сравнима с мощностью тепловых потерь, то есть $3I_0^2 R_{эо} \geq P_{ТП}$.

Индуктивное сопротивление X создает сдвиг по фазе между током I_0 и напряжением $U_{2ф}$ на угол φ .

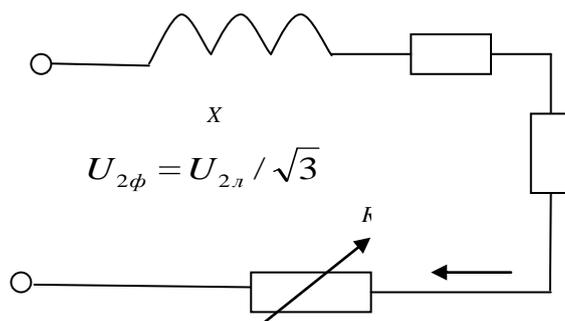


Рис. 1.12 - Эквивалентная схема замещения ДСП

Полная, реактивная и активная мощность печи:

$$S = 3U_{2\phi}I_d, \text{ кВ А}, \quad (1.25)$$

$$Q = 3I_d^2 X, \text{ кВ А}, \quad (1.26)$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} = U_{2\phi}I_d \cos \varphi, \text{ кВт}, \quad (1.27)$$

где $\cos \varphi$ - коэффициент мощности электропечной установки (ЭПУ) в эксплуатационном режиме.

Напряжение на дуге

$$U_d = \sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_d X)^2} - I_d R, \text{ В}. \quad (1.28)$$

Мощность электрических потерь

$$P_{\text{эл_пот}} = 3I_d^2 R, \text{ кВт}. \quad (1.29)$$

Мощность в дуге

$$P_d = 3I_d U_d, \text{ кВт}. \quad (1.30)$$

Коэффициент мощности

$$\lambda = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{\sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_d X)^2}}{U_{2\phi}}. \quad (1.31)$$

Электрический к.п.д.

$$\eta_{\text{эл}} = \frac{P_d}{P} 100, \%. \quad (1.32)$$

Длина дуги

$$l_d = \frac{(U_d - U_a - U_k)}{b}, \text{ мм}, \quad (1.33)$$

где $U_a + U_k$ - анодное и катодное падение напряжения; для условий ДСП [16] $U_a + U_k \approx 17\text{В}$; b - градиент потенциала в столбе дуги, для режима расплавления $b \approx 1$ В/мм, для окислительного и восстановительных периодов $b \approx 0,8$ В/мм.

С электротехнической точки зрения для обеспечения высоких значений коэффициента мощности $\lambda = \cos \varphi$ и электрического к.п.д. $\eta_{эл}$ целесообразно работать на более высоких напряжениях $U_{2\phi}$:

$$\lambda = \sqrt{1 - \left(\frac{I_d X}{U_{2\phi}} \right)^2}; \quad \eta_{эл} = \left(1 - \frac{R}{\sqrt{\left(\frac{U_{2\phi}}{I_d} \right)^2 - X^2}} \right) 100.$$

Однако повышение $U_{2\phi}$ и соответствующее возрастание напряжения на дуге U_d вызовут удлинение столба дуги, увеличение теплового потока на футеровку и ухудшение условий ее тепловой работы.

Увеличение силы тока I_d усиливает электродинамическую конвекцию в зоне дуги, повышает эквивалентный коэффициент теплопроводности и диффузии, способствуя теплопередаче и массообмену в ванне жидкого металла.

Выбор рациональных электрических параметров является важной задачей конструирования и эксплуатации ДСП. В частности, величины сопротивлений R и X зависят от конструкции токопровода.

1.3.2 Модели расчета баланса времени и сырья в ДСП

Простои ДСП связаны с капитальным ремонтом оборудования и полной заменой футеровки («холодные» простои), горячим ремонтом футеровки, заменой свода, установкой и наращиванием электродов («горячие»

простой по техническим причинам) и различными внешними (по отношению к ДСП и ЭСПЦ) причинами («горячие» простои по организационным причинам).

По данным Гипромеца [15, 17] можно принять:

$$Pr = 2,6k_{np}m_0^{0,31}, \%, \quad (1.34)$$

где m_0 - вместимость печи, т.

Снижение простоев путем сокращения сроков ремонта и увеличения межремонтного периода работы ДСП в результате повышения стойкости футеровки стен и свода является экстенсивным способом повышения производительности ДСП. При эксплуатации ДСП с водоохлаждаемыми панелями возможно снижение простоев в восемь-десять раз, в основном в результате уменьшения длительности горячих простоев по техническим причинам, что обеспечивает увеличение производительности на 5–10%.

В описываемую математическую модель (10) включено корреляционное уравнение введен коэффициент k_{np} , учитывающий снижение простоев при эксплуатации современных мощных и сверхмощных ДСП с водоохлаждаемыми панелями ($k_{np} = 0,1-0,25$).

Длительность τ_n подготовительного периода зависит от организации и уровня механизации вспомогательных операций по обслуживанию ДСП при сливе металла, очистке и заправке подины, загрузке металлошихты. С учетом опыта работы современных ДСП принято:

- слив металла предыдущей плавки $\tau_{слив}$,
- очистка ванны $\tau_{очистка}$,
- заправка подины (механизированная) $\tau_{запр}$,
- загрузка металлошихты (в один прием) $\tau_{загр}$.

Общее время составляет

$$\tau'_n = \tau_{\text{слив}} + \tau_{\text{очистка}} + \tau_{\text{загр}} + \tau_{\text{загр}}. \quad (1.35)$$

В ДСП специальной конструкции (эксцентрический донный или сифонный слив металла) при плавке на остатке (до 10 % вместимости) жидкого металла предыдущей плавки или при плавке с непрерывной загрузкой металлизированных окатышей возможна иная длительность τ_n подготовительного периода, поэтому в описываемую математическую модель включено соотношение

$$\tau_n = k_n \tau'_n, \text{ ч}, \quad (1.36)$$

где k_n - коэффициент, учитывающий снижение подготовительного периода. При частичном совмещении процесса расплавления металлошихты с окислительным периодом и при интенсивном ведении процесса удается провести окислительный период за 15–20 мин. С учетом операции скачивания окислительного шлака за 10 мин можно принять (независимо от вместимости ДСП) длительность окислительного периода

$$\tau_0 = k_0 0,5, \text{ ч}, \quad (1.37)$$

где k_0 - коэффициент учета отклонения окислительного периода от 0,5 часа.

Масса металлошихты, загружаемой в этот период в рабочее пространство ДСП

$$m_{ш} = k_p k_n m_0, \text{ т}, \quad (1.38)$$

где $k_n = (m_0 - m_n) / m_0$ - коэффициент, учитывающий отсутствие m_n в металлошихте $m_{ш}$; $k_p = 1 / (1 - 0,001U)$ - расходный коэффициент, U - угар жидкого металла, кг/т, m_n - масса компонентов металлошихты, не попадающих в завалку, т.

Угар происходит в результате окисления, испарения в зоне дуг, запутывания корольков жидкого металла в скачиваемом шлаке и т.п. Величина угара U зависит от сортамента и способа выплавки электростали, режима

плавки, расхода кислорода, структуры металлошихты, ее окисленности и замусоренности и составляет 40–120 кг/т (или 4–12 %). Возможное (вследствие снижения удельной поверхности раздела шлак – металл пропорционально $m_0^{0,33}$) влияние на величину угара размеров ДСП не выявлено из-за преобладающего влияния расхода кислорода. Расходный коэффициент металлошихты k_p следует считать внешним фактором и вводить в математическую модель на основе производственных данных. В проектных разработках Гипромезом принято среднее значение угара $U_{cp}=80$ кг/т. то есть средний расходный коэффициент на 1 т жидкого составляет

$$k_{p,cp} = 1/(1 - 0,001 \cdot 80) \approx 1,08, \text{ т/т.} \quad (1.39)$$

Угар металла не является постоянной величиной, а зависит от мощности трансформатора (рисунок 1.13). Уравнение регрессии показано около графика.

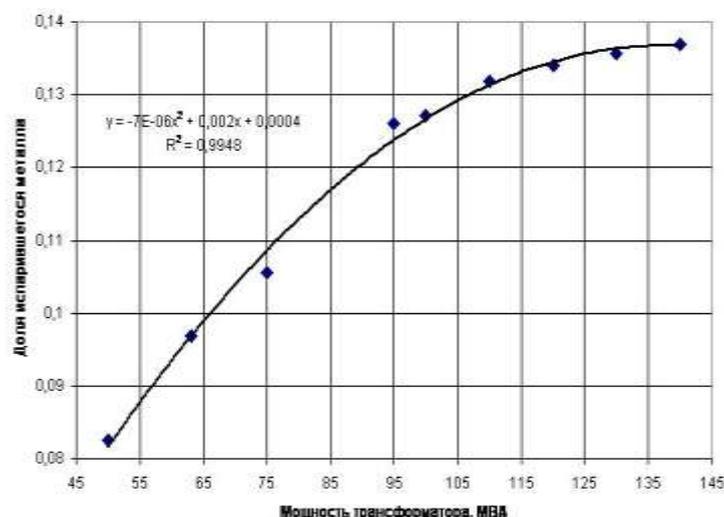


Рисунок 1.13 - Зависимость доли испарившегося металла от мощности трансформатора ДСП

1.3.3 Модель расчета эксплуатационных и капитальных затрат

В соответствии с калькуляцией себестоимости жидкой электростали себестоимость рассчитывают по статьям затрат в виде зависимости $C_y = \sum Z_i$

на 1 т жидкого [15, 17].

Считаем, что каждая из статей общецеховых затрат, а также общезаводские расходы связаны с изменением годовой производительности, причем доля D условно постоянных расходов разная для различных статей затрат.

1. Надбавка к тарифу за низкое использование установленной мощности (вследствие наличия некомпенсированной реактивной мощности).

В зависимости от коэффициента мощности $\lambda = \cos(\varphi)$ определяется коэффициент тарифа на электроэнергию:

$$k_u = 1,19 + 3(0,72 - \cos \varphi) \quad \text{при } 0,72 > \cos \varphi \geq 0,5;$$

$$k_u = 1,055 + 1,5(0,81 - \cos \varphi) \quad \text{при } 0,81 > \cos \varphi \geq 0,72;$$

$$k_u = 1,01 + 0,5(0,9 - \cos \varphi) \quad \text{при } 0,89 \geq \cos \varphi \geq 0,81;$$

$$k_u = 1 \quad \text{при } 1 \geq \cos \varphi \geq 0,9.$$

2. Затраты на технологическую электроэнергию с учетом двухставочного тарифа.

Затраты на технологическую электроэнергию Z составляют наибольшую долю и с учетом двухставочного тарифа являются явной функцией максимальной активной мощности P_m ЭПУ и удельного расхода W_y

$$Z = Z_p + Z_w = k_u (C_p P_m / M_z + C_w W_y), \text{ руб/т}, \quad (1.40)$$

где Z_p – затраты на основную плату за максимум заявленной активной мощности нагрузки по тарифу C_p ; Z_w – затраты на дополнительную плату за израсходованную электроэнергию по тарифу C_w .

3. Затраты на графитированные электроды.

Определяют по удельному расходу $H_{эо}$ электродов с учетом их цены $C_{эо}$ (руб/т). Расход электродов зависит от ряда факторов, в том числе и от расхода электрической энергии: $H_{эо} \approx (7,0 - 7,5)W_y^{1,23}$, кг/т жидкого.

$$Z_{эо} = 0,001C_{эо} \cdot 7W_y^{1,23}, \text{ руб/т.} \quad (1.41)$$

4. Затраты на подогрев холодной металлошихты.

В случае применения ТКГ в ДСП для интенсификации расплавления холодной металлошихты или для предварительного подогрева ее в загрузочной бадье имеем затраты

$$Z_г = 0,001C_г H_г, \text{ руб/т,} \quad (1.42)$$

где $C_г$ - цена газа, руб/(тыс. м³); $H_г$ - расход газа м³/т.

5. Затраты на кислород.

Затраты на кислород $Z_к$ используемый в технологическом процессе, например для интенсификации обезуглероживания металла, определяют аналогично

$$Z_к = 0,001C_к H_к, \text{ руб/т,} \quad (1.43)$$

где $C_к$ - цена кислорода, руб/(тыс. м³); $H_к$ - расход кислорода, м³/т, составляющий по проектным нормам Гипромеза (независимо от вместимости ДСП) при выплавке мартеновского сортамента 5, электропечного сортамента 14, коррозионностойких сталей - 33, в современных ДСП до 40–50 м³/т.

6. Затраты по переделу

$$Z_т = Z + Z_{эо} + Z_г + Z_к, \text{ руб/т.} \quad (1.44)$$

7. Затраты на силовую электроэнергию.

Примерно 80% расхода силовой электроэнергии приходится на подъемно-транспортные средства ЭСПЦ и силовое оборудование ДСП (без электропечных трансформаторов). Расчет производится на основе регрессионного уравнения норм расхода технических энергоносителей (Прило-

жение 1) и базовой годовой производительности по жидкому металлу $(M_z)_б$

$$Z_c = 0,001 \cdot C_c \cdot 120 m_0^{-0,25} [0,2(M_z)_б / M_z + 0,8], \text{ руб/т}, \quad (1.45)$$

где C_c - цена силовой электроэнергии, руб/(Мвт ч).

8. Затраты на расход пара.

Пар используют как низкотемпературный теплоноситель для обслуживания производства и для обеспечения потребности цеха в горячей воде. Расчет затрат на расход пара производится на основе регрессионного уравнения норм расхода технических энергоносителей (Приложение 1) и базовой годовой производительности по жидкому металлу $(M_z)_б$

$$Z_n = 7,35 C_n m_0^{-0,79} [0,9(M_z)_б / M_z + 0,1], \text{ руб/т}, \quad (1.46)$$

где C_n - цена пара, руб/ГДж.

9. Затраты на расход воды.

Воду расходуют, в основном, на охлаждение ДСП, газоочистку и на бытовые нужды. Расчет затрат на расход воды производится на основе регрессионного уравнения норм расхода технических энергоносителей и базовой годовой производительности по жидкому металлу $(M_z)_б$

$$Z_e = 0,001 C_e \cdot 55 m_0^{-0,21} [0,9(M_z)_б / M_z + 0,1], \text{ руб/т}, \quad (1.47)$$

где C_e - цена воды, руб/(тыс. м³).

10. Затраты на сжатый воздух.

Сжатый воздух расходуют, в основном, на продувку системы охлаждения, на подготовку разливного оборудования (что не имеет отношения к рассматриваемой задаче), а также на привод различных пневматических механизмов, в том числе и на ДСП. Расчет затрат на расход сжатого воздуха производится на основе регрессионного уравнения норм расхода технических энергоносителей и базовой годовой производительности по жидкому металлу $(M_z)_б$

$$Z_{жс} = 0,001 C_{жс} 120 m_0^{-0,67} [0,1(M_э)_б / M_э + 0,9], \text{ руб/т,} \quad (1.48)$$

где $C_{жс}$ - цена сжатого воздуха, руб/(тыс. м³).

11. Затраты на топливо.

Значительная часть топлива в ЭСПЦ расходуется на подготовку разливочного оборудования, а также на прокаливание ферросплавов и добавочных материалов на плавку. Удельный расход топлива H_n косвенно связан с массой сливаемого жидкого металла в виде зависимости

$H_n = 0,156 m_0^{-0,45}$ т условного топлива/т жидкого. Расчет затрат на расход сжатого воздуха производится на основе регрессионного уравнения норм расхода технических энергоносителей и базовой годовой производительности по жидкому металлу $(M_э)_б$:

$$Z_n = C_n \cdot 0,156 m_0^{-0,45} [0,9(M_э)_б / M_э + 0,1], \text{ руб/т,} \quad (1.49)$$

где C_n - цена условного топлива, руб/(т.у.т).

12. Затраты по переделу

$$Z_e = Z_c + Z_n + Z_в + Z_{жс} + Z_n, \text{ руб/т.} \quad (1.50)$$

13. Удельные затраты на зарплату

Расходы на заработную плату работников ЭСПЦ, выполняющих различную роль в производственном процессе, отражают в различных статьях калькуляции расходов по переделу. Заработную плату рабочих, занятых содержанием оборудования и проведением текущих ремонтов, отражают в статье «Текущий ремонт и содержание основных средств»; рабочих, занятых хранением сырья и материалов, уборкой цеха, а также инженерно-технических работников, служащих, младшего обслуживающего персонала – в статье «Прочие цеховые расходы»; оплату труда производственных рабочих по тарифу и сдельным расценкам, премии за производственные показатели, доплату за праздничные дни, сверхурочную работу и переработку по графику – в статье «Основная заработная плата производственных рабочих»; оплату очередных отпусков, времени выполнения государ-

ственных и общественных обязанностей, доплату за работу в ночное время, выплату единовременного вознаграждения за выслугу лет и т. д. – в статье «Дополнительная заработная плата производственных рабочих». В ЭСПЦ с более крупными ДСП имеет место более высокая производительность труда на одного списочного рабочего при практически неизменном среднем разряде, что определяет зависимость

$$Z'_{zn} = 18m_0^{-0,6}.$$

С течением времени выплавка металла в ЭСПЦ возрастает по мере постепенного ежегодного снижения продолжительности периодов плавки за счет внедрения результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, совершенствования энергетического и электрического режима ДСП, более полной механизации и автоматизации трудоемких операций, повышения уровня организации ведения плавки и уменьшения различного рода задержек. При этом доля затрат Z_{zn} в общей сумме расходов по переделу снижается, если темпы роста объема производства опережают соответствующее увеличение заработной платы. Возможное изменение себестоимости можно оценить по формуле

$$\Delta C = [1 - (100 + a)/(100 + b)]y,$$

где a и b – рост средней заработной платы и производительности, %;

y – доля заработной платы в себестоимости.

При условии $a < b$ себестоимость снижается, но при $a > b$ имеет место повышение себестоимости. По оценке А.М. Леонтьева [15], интенсивность снижения удельных затрат на заработную плату производственных рабочих отечественных ЭСПЦ опережает темпы роста объема производства в среднем на 0,8 %, что позволяет в рассматриваемой математической модели принять:

$$\begin{aligned} Z_{zn} &= k_{1990} 18m_0^{-0,6} 0,992^{(\Gamma-\Gamma_0)} (M_z)_0 / M_z = \\ &= 18k_{1990} m_0^{-0,6} 0,992^{(\Delta\Gamma)} (M_z)_0 / M_z, \text{ руб/т,} \end{aligned} \quad (1.51)$$

где Γ_0 – базовый год пуска печи; Γ – год, в котором рассчитывают затраты на заработную плату, $\Delta\Gamma$ – число лет эксплуатируется ДСП ($\Delta\Gamma=0$ для вновь проектируемых), k_{1990} – масштабный коэффициент уровня цен по сравнению с 1990 г.

14. Затраты на быстроизнашивающееся сменное оборудование.

Затраты на быстроизнашивающееся сменное оборудование, инструмент, малоценный инвентарь, приспособление особого значения Z_u имеют тенденции к снижению в ЭСПЦ с более крупными ДСП по уравнению:

$$Z_u \approx 7 m_0^{-0,6}, \text{ руб/т жидкого. Имеем следующее расчетное уравнение:}$$

$$Z_u = k_{1990} 7 m_0^{-0,6} [0,1(M_z)_0 / M_z + 0,9], \text{ руб/т.} \quad (1.52)$$

15. Расход огнеупорных материалов на ремонт футеровки ДСП.

Опыт проектирования и эксплуатации ДСП вместимостью больше 25 т показывает, что масса футеровки вдвое превышает вместимость ДСП, причем на изготовление подины расходуют около 60% материалов. Принимая, что в худшем случае капитальный ремонт подины один раз в год, поэтому числом ремонтов стен и свода определяется долговечность футеровки, которая по техническим расчетам должна составлять $T_{фк} \approx 1000$ ч. Отсюда получим расход огнеупорных материалов на ремонт футеровки ДСП вместимостью m_0 , кг/т жидкого:

$$H_{\phi} = 1000(0,6 \cdot 2m_0 + 0,4 \cdot 2m_0 \cdot T / T_{фк}) / M_z, \text{ кг/т,} \quad (1.53)$$

где $T_{фк}$ – длительность работы печи до капитального ремонта футеровки, ч.

16. Расход огнеупорных материалов на ремонт футеровки ковшей.

По проектным нормам Гипромеца

$$H_{ки} \approx 44,3 m_0^{-0,171}, \text{ кг/т.} \quad (1.54)$$

17. Затраты на огнеупорные материалы.

$$Z_{\phi} = 0,001(C_{\phi} H_{\phi} + C_{ки} H_{ки}), \text{ руб/т,} \quad (1.55)$$

где C_{ϕ} и $C_{ки}$ – средневзвешенная цена 1 т набора огнеупорных материалов различных марок, необходимых для ремонта ДСП и ковшей соответственно.

18. Затраты на вспомогательные материалы и запасные части.

В ЭСПЦ с более крупными ДСП затраты на вспомогательные материалы и запасные части $Z_{и}$ снижаются по зависимости (при $D_{и} = 0,7$)

$$Z_{и} = k_{1990} 3,37 m_0^{-0,39} [0,7(M_z)_o / M_z + 0,3], \text{ руб/т.} \quad (1.56)$$

19. Затраты на заработную плату вспомогательных рабочих и содержанию основных средств

$$Z_{ц} = k_{1990} 9,36 m_0^{-0,73} [0,7(M_z)_o / M_z + 0,3], \text{ руб/т.} \quad (1.57)$$

20. Затраты на услуги ремонтных и сторонних организаций

$$Z_{у} = k_{1990} 7,65 m_0^{-0,39} [0,6(M_z)_o / M_z + 0,4], \text{ руб/т.} \quad (1.58)$$

21. Затраты расходов по переделу

$$Z_p = Z_{\phi} + Z_{и} + Z_{ц} + Z_{у}, \quad \text{руб/т.} \quad (1.59)$$

22. Транспортные расходы.

Транспортные расходы Z_m в ЭСПЦ с более крупными ДСП снижаются в результате лучшего использования транспортных средств при увеличении размера партий одновременно транспортируемых материалов, руб/т жидкого: $Z'_m = 5,9 m_0^{-0,6}$. Приняв $D_m = 0,5$, получим для описываемой математической модели статистическую зависимость:

$$Z_m = k_{1990} 5,9 m_0^{-0,6} [0,5(M_z)_o / M_z + 0,5], \text{ руб/т.} \quad (1.60)$$

23. Доля затрат на оборудование.

Для расчета затрат Z_a на амортизационные отчисления необходимо знать уровень и структуру основных фондов ЭСПЦ, в котором установлена ДСП заданной вместимости m_0 . В описываемой математической модели рассмотрены капитальные затраты только на получение жидкого металла, т. е. без стоимости специальных устройств внепечной обработки и отделен-

ния (установки) непрерывной разливки стали. Элементами структуры основных фондов являются затраты на здание, сооружение, силовое, производственное и прочее оборудование. В ЭСПЦ с более крупными ДСП доля активной части основных фондов – затрат на оборудование возрастает и ее можно описать следующей зависимостью:

$$A = 22m_0^{0.19}, \% \quad (1.61)$$

24. Цена ДСП.

Доля затрат на наиболее активную часть фондов – ДСП с увеличением вместимости m_0 в затратах на оборудование возрастает, что обусловлено более быстрым повышением стоимости ДСП $C_{дсп}$ по сравнению с увеличением m_0 с учетом 5 % в на транспортные расходы и 10 % на монтажно-футеровочные работы или по корреляционному уравнению:

$$C_{дсп} = k_{1990} 3630m_0^{1.33}, \text{ руб.} \quad (1.62)$$

25. Стоимость электропечных трансформаторов в зависимости от их мощности:

Стоимость электропечных трансформаторов («силовое оборудование») можно определить по корреляционному уравнению:

$$C_{мп} = k_{1990} 1400(100 + S_n), \text{ руб.} \quad (1.63)$$

26. Удельные капитальные затраты.

Для ЭСПЦ в составе N ДСП одинаковой вместимости и годовой производительностью M каждая:

$$K_y = 2[(K_y)_\delta (M)_\delta + C_{дсп} + C_{мп}] / M, \text{ руб/т.} \quad (1.64)$$

Базовые удельные капитальные вложения $(K_y)_\delta$ определяются по корреляционному уравнению: $(K_y)_\delta = k_k(m_0)^{-a}$, причем коэффициенты k_k и a зависят от сортамента выплавляемой стали (таблица 1.2).

Таблица 1.2

Коэффициенты уравнения регрессии $(K_y)_\delta = k_k (m_0)^{-a}$ для расчета базовых капитальных вложений

Выплавляемый сортамент	Коэффициент k_k	Коэффициент a
Электropечной сортамент без внепечной обработки	52	0,15
Электropечной сортамент с внепечной обработкой	52	0,15
Мартеновский сортамент	37	0,12

27. Затраты на амортизацию

Для ЭСПЦ в составе N ДСП одинаковой вместимости и годовой производительностью M каждая:

$$Z_a = \{0,01 \cdot H_{зд} \cdot A + 0,01 \cdot H_{об} \cdot A \cdot (K_y)_\delta (M)_\delta + 0,01[H_{об} \cdot C_{ДСП} + H_{эл.об.} \cdot C_{ТР}]\} / M, \text{ руб/т}, \quad (1.65)$$

где $H_{зд}$ - амортизационные отчисления за здания и сооружения; $H_{зд}=2,4\%$;

$H_{об}$ - амортизационные отчисления на оборудование, $H_{об}=13,5\%$;

$H_{эл.об.}$ - амортизационные отчисления на электрооборудование,

$H_{эл.об.}=6,4\%$.

28. Затраты на повышение культуры производства и улучшение условий труда.

Статья «Прочие расходы цеха» учитывает затраты Z_y на повышение культуры производства и улучшение условий труда, являющиеся условно переменными ($D_y=0$) и описываемая корреляционным уравнением:

$$Z_y = k_{1990} 28,13 m_0^{-0,74}, \text{ руб/т}. \quad (1.66)$$

29. Расходы по переделу.

$$Z_n = Z_m + Z_e + Z_{zn} + Z_u + Z_p + Z_m + Z_a + Z_u, \text{ руб/т.} \quad (1.67)$$

30. Расходы общезаводские, на подготовку и освоение производства и прочие производственные:

Являются условно постоянными ($D_0=1$), снижаясь при базовой производительности для ЭСПЦ с более крупными ДСП согласно корреляционному уравнению

$$Z_o = k_{1990} 5,1m_0^{-33} (M_z)_o / M_z, \text{ руб/т.} \quad (1.68)$$

31. Затраты на шихтовые материалы.

$$Z_3 = C_{ш} k_p, \text{ руб/т,} \quad (1.69)$$

где $C_{ш}$ – средневзвешенная цена шихтовых материалов, зависящая от структуры металлошихты.

32. Затраты на добавочные материалы:

Определяются ценами C_i и удельными (на 1 т жидкого) расходами H_i применяемых материалов для заправки и на плавку – окислители, шлакообразующие и науглероживающие. Расход заправочных материалов определяется размером заправочной поверхности подины и имеет тенденцию уменьшения для более крупных ДСП при механизированной заправке (по данным Гипромеца) $H=40 m_0^{-17}$, кг/т. Расход добавочных материалов на плавку определяется способом выплавки, сортаментом и особенностями технологического процесса в каждом конкретном ЭСПЦ. Для рассматриваемой математической модели принято

$$Z_o = 0,001 \sum (C H)_i, \quad \text{руб/т,}$$

где C_i – цена, H_i – удельный расход применяемых материалов. Для рассматриваемой модели затраты Z_o считаем известными.

33. Себестоимость электростали

$$C_y = Z_3 + Z_o + Z_n + Z_o, \text{ руб/т.} \quad (1.70)$$

34. Удельные приведенные затраты

$$ПЗ_y = C_y + E_n K_y, \quad (1.71)$$

где E_n – отраслевой нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, равный для черной металлургии 0,15 руб/(руб. год).

1.4 Разработка алгоритмов выработки корректирующих воздействий на процесс производства чугуна на основе анализа информационных потоков нейросетевыми методами

1.4.1 Характеристика информационных потоков, сопровождающих процесс производства чугуна

Основным нормативным документом, регламентирующим производство передельного чугуна, в настоящее время является межгосударственный стандарт [20]. Данным стандартом в зависимости от марки чугуна, группы, класса, категории нормируется массовая доля кремния, марганца, фосфора, серы. Качество чугуна определяется, в первую очередь, его химическим составом [21].

Корректирующие воздействия на процесс производства чугуна осуществляются с целью обеспечения качественных параметров, соответствующих стандарту при условии соответствия технологического процесса заданным технико-экономическим и экологическим требованиям.

Поскольку каждая доменная печь возводится по специальному проекту и обладает индивидуальными характеристиками, в соответствии с принятой классификацией данный агрегат относится к разряду уникальных технических объектов, обладающих сложной многоэлементной структурой [21, 22].

Совокупность всей информации, описывающей процесс производства чугуна, образует информационные потоки. Для анализа хода технологического процесса и выработки корректирующих воздействий наиболее существенны:

- 1) информационные потоки, сопровождающие поступающие в печь материальные потоки – информация об агломерате, коксе;
- 2) информационные потоки, характеризующие ход технологического процесса;
- 3) информационные потоки, характеризующие произведенный чугун.

Информацию, доставляемую описанными информационными потоками, целесообразно представлять в векторной форме. Под вектором в данном случае понимается упорядоченная совокупность характеристик, позволяющих адекватно описать прогнозируемый технологический процесс. К свойствам компонент рассматриваемых векторов относят:

- 1) измеримость в различных шкалах;
- 2) разнотипность;
- 3) существенные различия в погрешности измерения.

1.4.2 Эвристический алгоритм прогнозирования

Корректирующие воздействия формируются на основании прогноза. Прогнозирование технологического процесса производства чугуна относится к задачам пространственной экстраполяции [22]. Под пространственной экстраполяцией понимается прогнозирование значений векторного поля по отдельным наблюдениям.

Погрешность измерения компонент наблюдаемого вектора характеристик в условиях действующего производства не может быть существенно уменьшена без значительных капитальных затрат.

Таким образом, существенная неопределенность в данных не может быть устранена. Кроме того, представляется проблематичным получение надежных статистических оценок для использования классических вероятностных моделей прогнозирования. В этих условиях задача прогнозирования может быть успешно решена с использованием ориентированных на применение в условиях принципиально неустранимой неопределенности

метаэвристик искусственных нейронных сетей, генетических алгоритмов (или их сочетаний).

Рассмотрим нейросетевой алгоритм прогнозирования параметров аглодоменного процесса по данным эксплуатации. В соответствии с наиболее распространенной методологией [22] будем рассматривать:

- 1) множество ситуаций $P_i, i \in \Omega_1$, упорядоченных документально протоколом R , где Ω_1 – период формирования прогнозной модели;
- 2) совокупность векторов $X_j, j \in \Omega_2$, характеризующих причины прогнозируемых ситуаций, где Ω_2 – период верификации прогнозной модели, $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ – множество временных отсчетов в течение всех периодов эксплуатации, используемых для формирования обучающих выборок, $\Omega_1 \cap \Omega_2 = \emptyset$.
- 3) параметры архитектуры нейросети – количество слоев V , множество значений весовых коэффициентов w_{ij} , где i, j – индексы нейронов соседних слоев, функция активации нейронов.

Требуется:

- 1) определить параметры прогнозной модели, путем обучения нейросети осуществить отображение элементов множества $X_j, j \in \Omega_2$ причин в элементы множества следствий $Y_j, j \in \Omega_2$ в соответствии с критерием пригодности $H \leq \Delta$, где H — максимальная относительная погрешность восстановления параметров системы при подаче на входной слой системы вектора причин;
- 2) определить множество векторов $Y_j, j \in \Omega_2$, характеризующих прогноз в течение временного интервала соответствующего интервалу верификации прогнозной модели.

Общий подход конкретизируется для рассматриваемой нами модели производства чугуна следующим образом [23]:

- 1) под ситуацией $P_i, i \in \Omega_1$ понимаем всю совокупность задокументированных сведений о плавке;
- 2) под совокупностью векторов $X_j, j \in \Omega_2$ понимаем набор разнотипных сведений, характеризующих причины прогнозируемых ситуаций; компонентами вектора являются сведения о химическом составе и механических свойствах агломерата и кокса, сведения о параметрах ведения технологического процесса.

Агломерат характеризуется данными о содержании: Fe, FeO, S, SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, TiO₂, P, Zn, Cr, MnO. Кокс характеризуется данными о реакционной способности и горячей прочности.

К параметрам проведения технологического процесса отнесем сведения о точности выполнения нормативных документов. Данные сведения имеют качественный характер.

Предварительная обработка данных состоит в следующем. Количественные данные по каждому из параметров преобразуются по формуле:

$$\bar{Q}_i = \frac{Q_i - Q_{\min i}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad i = 1, \dots, N,$$

где $\bar{Q} \in [0, 1]$ – преобразованное значение признака, Q_{\max} – максимально возможное значение признака, Q_{\min} – минимально возможное значение признака, N – количество наблюдений (величина выборки).

Для качественных признаков осуществляется кодирование в диапазоне от 0 до 1.

Для построения прогнозной модели, следуя [22], используется нейросеть прямого распространения. Количество промежуточных слоев (в отличие от рекомендаций [22]) определяется эмпирически. Активационная функция все нейронов – сигмоидная.

Параметры прогнозной модели определяются в результате работы обученной искусственной нейронной сети.

Полученная прогнозная модель используется для выработки корректирующих воздействий. Специфика доменного производства существенно сказывается на методах работы с информационными потоками. Рассмотрим основные факторы, определяемые данной спецификой. Как уже ранее отмечалось, каждая доменная печь является уникальным агрегатом. Поэтому построение нейросетевой модели производится в отдельности для каждой печи. Обладают определенной спецификой коксовые батареи и агломерационные фабрики. Параметры всех используемых в доменном процессе материалов не являются постоянными по времени. Не является постоянным временной лаг между производством агломерата и кокса и их использованием в доменном процессе.

В связи с указанными факторами невозможно установить однозначную систему информационных связей между звеньями технологического процесса. В этих условиях для определения периодов Ω_1 (формирование прогнозной модели) и Ω_2 (верификация прогнозной модели) применяется следующий эвристический подход. Рассматриваются относительно небольшие временные периоды (не более 10 суток), на которых данные не подвержены существенным колебаниям. Рассматривается лаг между производством агломерата и кокса и их использованием в доменном процессе от 1 до 3 суток.

1.4.3 Эвристический алгоритм оптимизации

Разработанная нейросетевая прогнозная модель является основой для построения эвристической оптимизационной модели. Решается задача минимизации целевой функции, которая имеет вид:

$$F = \max_i \Delta P_i, i = 1, \dots, M,$$

здесь ΔP_i – отклонение прогнозного параметра чугуна от нормируемого (выход за пределы допустимого интервала), M – количество параметров.

Целью оптимизации является определение оптимальных значений управляемых параметров. С учетом того, что прогнозные параметры формируются с использованием нейросети, оптимизационный метод должен быть приспособлен к работе в условиях неопределенности. Лучшие результаты показал в данных условиях классический генетический алгоритм [24].

Популяцию образуют допустимые наборы управляемых параметров. Размер популяции – 10 – 15 особей. Отбор производится методом «колеса рулетки» с сохранением лучшей особи. Применяется одноточечный кроссинговер. Вероятность мутации задается равной 0,05.

1.4.4 Оценка полученных результатов.

В результате проделанной работы:

- 1) проанализированы информационные потоки, сопровождающие процесс производства чугуна, сформулирована их специфика;
- 2) предложены эвристические методы прогнозирования доменного процесса, основанные на анализе рассмотренных информационных потоков;
- 3) предложены методы корректировки процесса на основе нейросетевого прогнозирования и оптимизации с использованием генетических алгоритмов.

1.5 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для обработки информации агломерационно-доменного цикла с оценкой качества и зашумленности полученной информации

1.5.1 Зашумленность данных и способы устранения шумов

Очень часто при решении задач обработки экспериментальных данных приходится сталкиваться с необходимостью определения параметров модели. При проведении реальных экспериментов исходные данные зашумлены и среди них могут встречаться ложные, совершенно случайные значения. Причиной этого является схемы проведения эксперимента, при-

рода исследуемых данных и т.п. Проблема исследования состоит в построении алгоритмов и программного обеспечения для выделения устранения сильно зашумленных данных в ходе исследования работы доменных печей.

В ходе наблюдения были получены значения показателей, приведенных на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Классификация показателей, характеризующих работу аглодоменного производства

Оценка зашумленности данных определяется на этапе предварительной обработки. Предварительная обработка результатов измерений или наблюдений необходима для того, чтобы в дальнейшем с наибольшей эффективностью, а главное – корректно, использовать для построения эмпирических зависимостей статистические методы.

Задачами предварительной обработки данных являются:

- отсеивание зашумленных данных;
- проверка соответствия распределения результатов измерения закону нормального распределения.

Грубые погрешности измерения, аномальные или сильно выделяющиеся значения, очень плохо поддаются определению. Причинами появления грубых погрешностей можно считать:

- изменение условий эксперимента;
- ошибки переноса данных на носители информации;
- ошибки округления, полученных значений.

Важным этапом предварительной обработки данных является определение вида распределения измеряемых величин. Если гипотеза о наличии нормального распределения не приемлема, то следует определить, какому закону распределения подчиняются исходные данные, и, если возможно, преобразовать данное распределение к нормальной форме.

1.5.2 Алгоритмы отсева зашумленных данных

Можно встретить большое количество различных рекомендаций для проведения отсева грубых погрешностей наблюдений (аномальных значений).

Приведем два способа для выборок небольшого объема, в которых количество наблюдений менее 25, и для больших выборок.

Если объем выборки n менее 25, то отсев можно производить методом вычисления максимального относительного отклонения.

Пусть в качестве исходных данных определен столбец значений $x_1, x_2 \dots x_n$, полученных в ходе наблюдения за некоторым показателем. Количество наблюдений $n < 25$.

Алгоритм отсева по максимальному относительному отклонению.

Для каждого наблюдения x_i вычисляется величина

$$\tau_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma},$$

где \bar{x} – среднее значение выбранной величины, σ – при условии малого объема выборки.

Из всех значений τ_i выбирается максимальное

$$\tau_{\max} = \max_{i=1, n} \tau_i .$$

Максимальное значение сравнивается с табличной величиной $\tau_{\text{табл}}$ при заданном уровне значимости α и количеством степеней свободы $n-1$. Значения $\tau_{\text{табл}}$ выбирают по таблице 1.3.

Таблица 1.3

Квантили распределения максимального относительного отклонения

n	Уровень значимости $\alpha, \%$				n	Уровень значимости $\alpha, \%$			
	10	5	2,5	1		10	5	2,5	1
4	1,65	1,69	1,71	1,72	15	2,33	2,49	2,64	2,80
5	1,79	1,87	1,92	1,96	16	2,35	2,52	2,67	2,84
6	1,89	2,00	2,07	2,13	17	2,38	2,55	2,70	2,87
7	1,97	2,09	2,18	2,27	18	2,40	2,58	2,73	2,90
8	2,04	2,17	2,27	2,37	19	2,43	2,60	2,75	2,93
9	2,10	2,24	2,35	2,46	20	2,45	2,62	2,78	2,96
10	2,15	2,29	2,41	2,54	21	2,47	2,64	2,80	2,98
11	2,19	2,34	2,47	2,61	22	2,49	2,66	2,82	3,01
12	2,23	2,39	2,52	2,66	23	2,50	2,68	2,84	3,03
13	2,26	2,43	2,56	2,71	23	2,52	2,70	2,86	3,05
14	2,30	2,46	2,60	2,76	25	2,54	2,72	2,88	3,07

Если неравенство $\tau_{\max} < \tau_{\text{табл}}$ соблюдается, то наблюдение не отсеивается, если не соблюдается, то наблюдение исключается.

Процедуру отсева повторяется до тех пор, пока отсеивается значение с максимальным относительным отклонением. Если принято решение о том, что значение отсеивать не следует, то процесс отсева останавливается

Для выборок большего объема ($n > 25$) рекомендуется использовать метод, основанный на критерии Стьюдента.

Алгоритм отсева по критерию Стьюдента

1. Для исходных данных определяется

$$d_{\max} = \max_{i=1, n} d_i .$$

2. Вычисляется

$$\tau_{\max} = \frac{d_{\max}}{S}.$$

3. Вычисляются критические значения τ_{α} для двух уровней значимостей $\alpha=5\%$ и $\alpha=0,1\%$:

$$\tau_{\alpha} = \frac{t_{\alpha, n-2} \sqrt{n-1}}{\sqrt{n-2 + t_{\alpha, n-2}^2}},$$

где $t_{\alpha, n-2}$ – табличное значение распределения Стьюдента.

4. Решение об отсеивании принимается на основании схема, приведенной на рисунке 1.15.

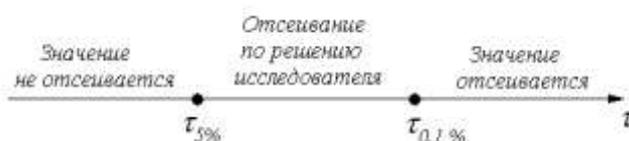


Рисунок 1.15 – Схема принятия решения об отсеивании выбранного значения

Процедуру отсеивания повторяется до тех пор, пока отсеивается значение с максимальным относительным отклонением. Если принято решение о том, что значение отсеивать не следует, то процесс отсеивания останавливается

Замечание: при обработке многофакторных экспериментальных данных отсеивание выполняется для каждого столбца и отсеивается вся строка из матрицы наблюдений.

1.5.3 Алгоритмы проверки гипотезы о виде распределения данных

Если закон распределения неизвестен, то есть основания предположить, что он имеет определенный вид A . При этом возникает необходимость в выдвижении гипотезы: генеральная совокупность распределена по закону A . Проверка гипотезы производится с помощью критериев согласия. Существует множество методик определения вида закона распределения случайной величины. Среди этого множества наиболее популярными являются методики, которые опираются на среднее абсолютное отклонение (САО), критерий Пирсона и критерий Колмогорова-Смирнова

Эмпирические частоты, n_i n_1 n_2 ... n_k

3. Вычислить теоретические значения случайной величины по закону A .
4. Рассчитать наблюдаемое значение критерия согласия:

$$\chi^2_{\text{набл}} = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n'_i)^2}{n_i},$$

где n'_i – теоретические частоты, вычисленные для плотности распределения A .

5. По таблице критических точек распределения Пирсона (χ^2), по заданному значению уровня значимости α и числу степеней свободы $\nu = k - 1$ найти критическую точку $\chi^2_{\text{кр}}(\alpha, \nu)$.
6. Если $\chi^2_{\text{набл}} < \chi^2_{\text{кр}}$, то не оснований отвергать нулевую гипотезу, в противном случае гипотеза отвергается.

Алгоритм проверки гипотезы о наличии распределения A случайной величины по критерию Колмогорова-Смирнова

1. Выдвигается гипотеза H_0 : генеральная совокупность распределена по закону A .
2. Выполнить построение эмпирического распределения случайной величины при разбиении на k классов:

Варианты, x_i	x_1	x_2	x_k
Эмпирические частоты, n_i	n_1	n_2	n_k

3. Вычислить теоретические значения случайной величины по закону A .
4. Вычислить накопленные теоретические F_A и эмпирические F_B накопленные частоты.
5. Рассчитать наблюдаемое значение критерия согласия:

$$D_{\text{набл}} = \frac{\max_{i=1,k} |F_A - F_B|}{n}.$$

6. По таблице критических точек распределения Колмогорова-Смирнова, по заданному значению уровня значимости α и числу степеней свободы $\nu=n$ найти критическую точку $D(\alpha, \nu)$.

7. Если $D_{набл} < D(\alpha, \nu)$, то нет оснований отвергать выдвинутую гипотезу, в противном случае гипотеза отвергается.

Наибольшую сложность в этих алгоритмах представляют пункты 2 и 3.

При построении эмпирического распределения предлагается два вида рекомендаций по выбору количества классов (групп):

1) количество классов определяется по правилу Штюргерсса:

$$k = 1 + 3,32 \cdot \lg n ;$$

2) количество классов определяется по количеству категорий (различных значений случайной величины).

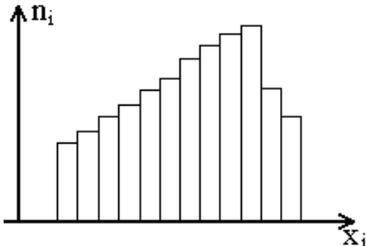
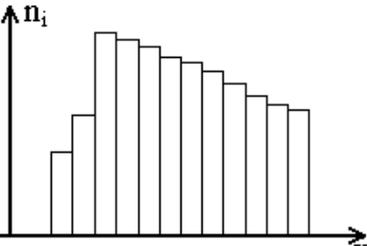
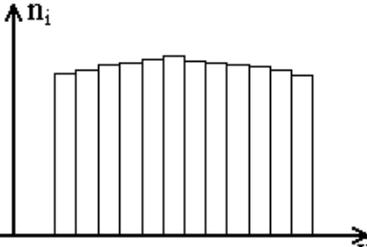
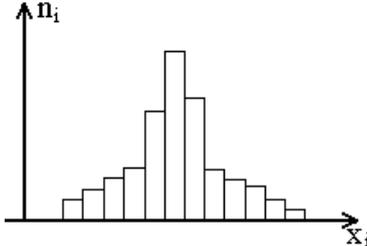
При определении теоретических значений следует руководствоваться рекомендациями по выбору выравнивающих коэффициентов, которые приведены в работах [25-26].

Если в ходе проверки критериев исследователь убедился, что гипотеза о нормальности распределения не может быть принята, то следует преобразовать исходные данные так, чтобы их распределение этой величины подчинялось нормальному распределению.

В самом начале операции преобразования данных оказывают существенную помощь гистограммы частот. Также при оценке нормального распределения предварительно оценивают значение коэффициента вариации. Если его значение превосходит 33 %, то необходимо «ужесточить» требования отсева грубых погрешностей. При построении гистограммы можно наблюдать либо «крутую» левую, либо «крутую» правую ветвь. Для подбора кривой нормального распределения к существующему эмпирическому используют преобразования, приведенные в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Виды преобразований данных к нормальному распределению

Вид гистограммы	Преобразование
 <p data-bbox="220 672 790 712"><i>Левая ветвь сильно растягивается</i></p>	<p data-bbox="845 392 1005 459">а) $x' = \frac{10^a}{x}$;</p> <p data-bbox="845 492 1005 560">б) $x' = \frac{10^a}{\sqrt{x}}$;</p> <p data-bbox="845 593 1181 660">в) $x' = 10^a \cdot \lg \left(\frac{x}{b} \right)$,</p> <p data-bbox="845 672 1404 712">где a и b эмпирические величины.</p>
 <p data-bbox="207 1030 805 1070"><i>Правая ветвь сильно растягивается</i></p>	<p data-bbox="845 739 1037 784">$x' = 10^a \cdot x^b$,</p> <p data-bbox="845 806 1404 907">при $b=1,5$ – сглаживается умеренное правое смещение,</p> <p data-bbox="845 929 1372 1030">при $b=2$ – сглаживается сильное правое смещение.</p>
 <p data-bbox="279 1388 726 1429"><i>Вершина является «тупой»</i></p>	<p data-bbox="845 1097 1005 1142">$x' = 10^a \cdot x$</p>
 <p data-bbox="271 1736 742 1776"><i>Вершина является «острой»</i></p>	<p data-bbox="845 1467 973 1556">$x' = \frac{x}{10^a}$</p>

Замечания:

- 1) чаще всего для каждого конкретного случая подбирается комбинация преобразований и при разработке программного продукта сле-

- дует предусмотреть операции запоминания комбинации выполненных преобразований и их отмены;
- 2) при подведении итогов, например, после построения зависимостей, необходимо выполнить обратные преобразования для получения уравнений для заданных исходных данных;
 - 3) выполнение указанных преобразований не изменяет вид гистограммы;
 - 4) изменение среднего значения и дисперсии исследуемой величины выполняет сдвиг и сжатие кривой плотности нормального распределения, приближая ее к эмпирической гистограмме.

1.5.4 Алгоритм устранения зашумленности показателей

Наличие критериев согласия и указаний по отсеву грубых погрешностей позволяет сформулировать серию алгоритмов для предварительной обработки данных. Представим все алгоритмы в виде блок-схем (см. рисунок 1.16 – рисунок 1.19).

Замечание: каждая из процедур может детализироваться в зависимости от поставленной задачи.



Рисунок 7.16 – Обобщенная блок-схема алгоритма данных

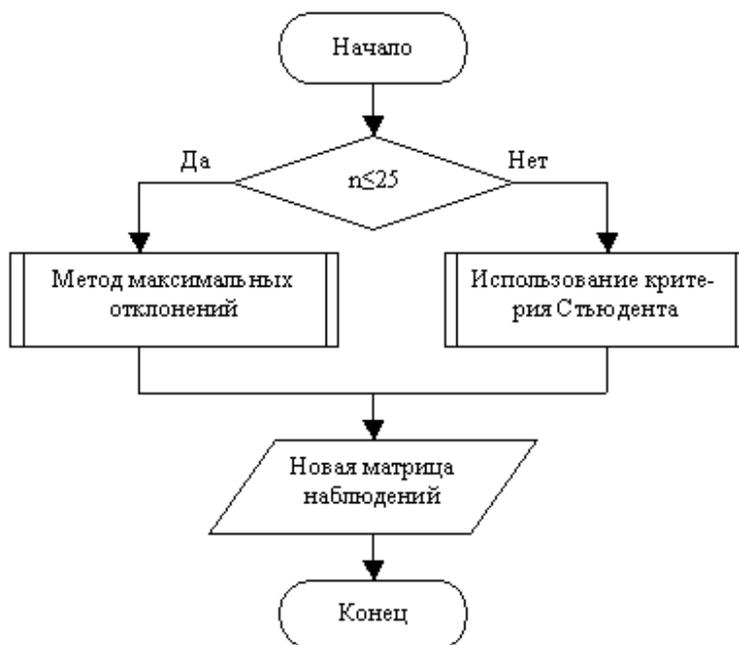


Рисунок 1.17 – Блок-схема процедуры отсева грубых погрешностей

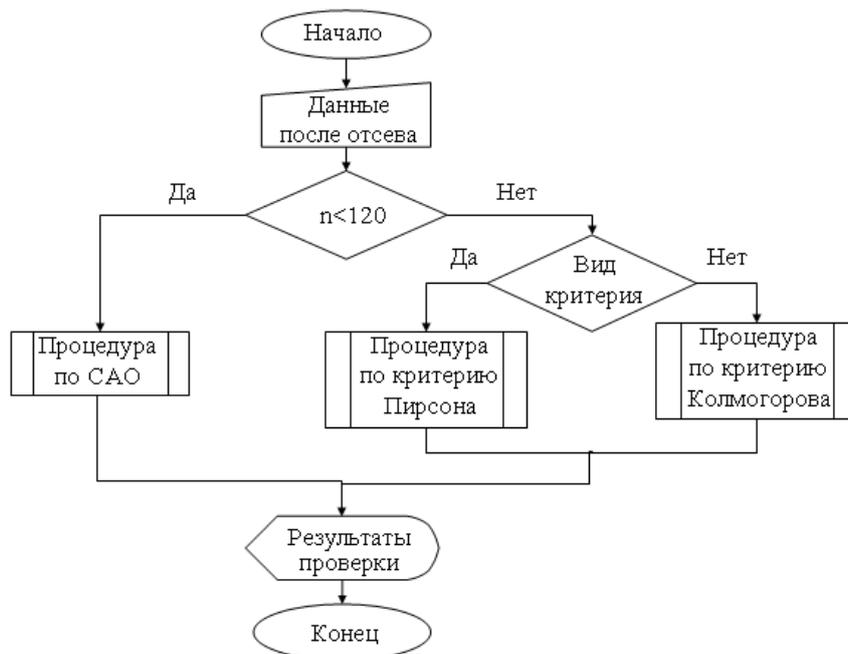


Рисунок 1.18 – Блок-схема процедуры определения вида распределения экспериментальных данных

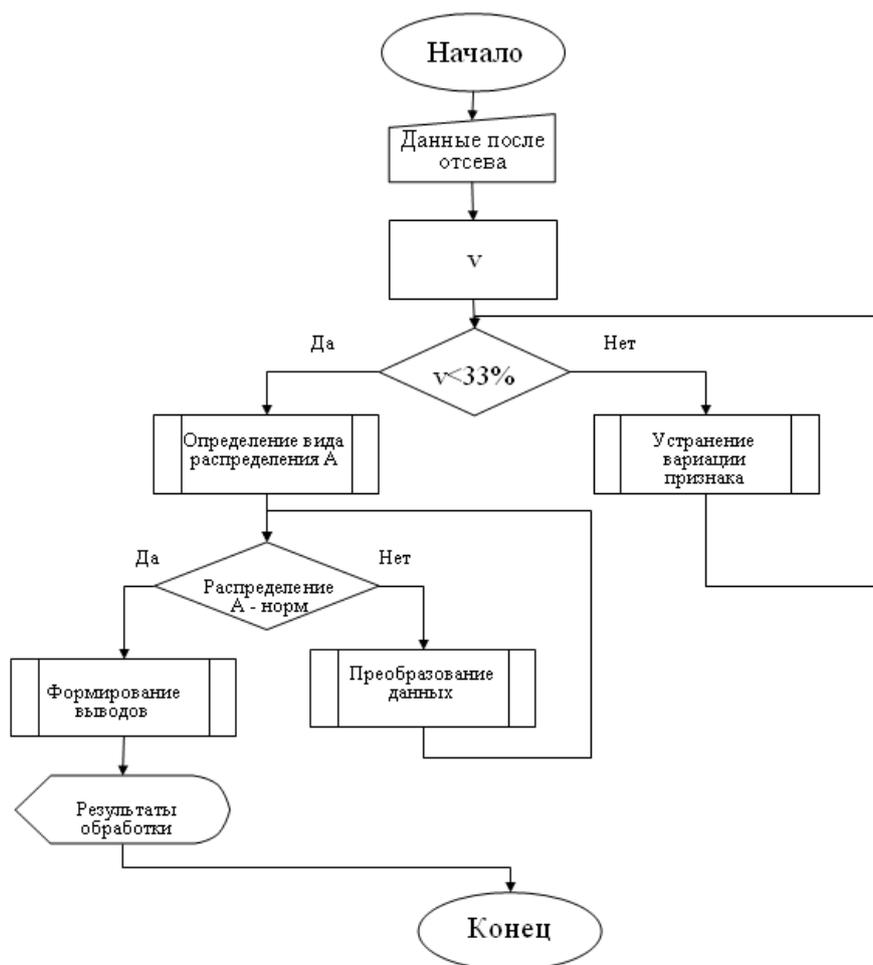


Рисунок 1.19 – Блок-схема модуля предварительной обработки данных

На каждом этапе предварительной обработки данных должны формироваться отчеты о полученных результатах.

Этап отсева грубых погрешностей: значения выборочных характеристик признаков на каждом этапе отсева, список номеров отсеянных строк с указанием наименования столбца, послужившего причиной отсева; новая матрица наблюдений, полученная после удаления строк с грубыми погрешностями.

Этап проверки гипотезы о виде распределения выбранных признаков: значения коэффициентов вариации, диаграмма с гистограммой и теоретической плотности распределения признака, итоговая таблица со значениями критерия согласия и результатами проверки гипотезы о виде распределения, аналитическая форма записи теоретического распределения.

Этап преобразования экспериментальных данных: список преобразований, применяемых к исходным данным для получения нормального распределения, список обратных преобразований для исходных данных, диаграмма с гистограммой и теоретической плотности распределения признака, значения выборочных характеристик для данных после преобразования, новая матрица наблюдений, полученная после выполнения преобразования признаков.

Форма и список предлагаемых отчетов определяется требованиями исследователя и не имеет унифицированного представления.

1.5.2 Программная реализация алгоритмов средствами Statistica

При программной реализации алгоритмов устранения зашумленности данных возможно использование множества средств. В настоящее время наиболее рациональным является сочетание готовых решений с возможным их расширением на основе встроенных макроязыков. К сожалению, в программном продукте Statistica не реализован модуль для отсева зашумленных данных. Поэтому при выполнении этой операции можно воспользоваться двумя способами:

- 1) выполнять расчет всех необходимых величин в интерактивном режиме, записывая все необходимые формулы для переменных;
- 2) создать макрос, с помощью которого эту работу можно автоматизировать полностью или частично.

Ниже приведено множество макросов, которые позволяют выполнить расчет выборочных характеристик и выполнить отсев четырех строк из матрицы наблюдений, которые имеют максимальное отклонение от среднего в каждом столбце¹.

```
'Описание констант  
Const IND_AVG_ARIFM = 2  
Const IND_MEDIAN = 5  
Const IND_RANGE_DEV = 12
```

¹ По работе студентов группы АВ-06-1 Гуркина М. и Максимова К.

```

Const IND_AVG_SQR = 14
Const IND_LINE_DEV = 17
Const IND_DEVIATION = 18
Const IND_DEVIATION_SHIFT = 27
Const IND_LOW_QUART = 10
Const IND_UPPER_QUART = 11
Const IND_QUART_DEV = 19
Const IND_MOMENT3 = 20
Const IND_MOMENT4 = 21
Const IND_F_OSCILATION = 22
Const IND_F_COMP_LINE_DEV = 23
Const IND_F_VARIATION=24
Const IND_F_QUART_VAR=25
Const IND_SEP_CASE = 1
Const IND_SEP_FACTOR = 2
'Константы имен рабочих листов в проекте
Const TITLE_SEP_RES = "Результаты отсева"
Const TITLE_DATA = "Данные"
Const TITLE_CHARACTER = "Выборочные характеристики"
Const TITLE_DATA_MOD = "Данные после отсева"
Const TITLE_CHARACTER_MOD = "Выборочные характеристики после отсева"
'Описание переменных для объектов – рабочий лист
Dim DataSheet As Spreadsheet
Dim CharactSheet As Spreadsheet
Dim DataSheetMod As Spreadsheet
'Описание типа для значения рассчитанных значений ТАУ по каждому фактору
Type TTauMax
    Tau As Double
    IndCase As Integer
End Type
'Описание типа для результирующего списка отсеянных факторов
Type TCaseStatus
    Sep As Boolean
    VarInd As Integer
End Type
'Основная процедура
Sub Main
    Set DataSheet = ActiveWorkbook.Item(TITLE_DATA).Object
    Set CharactSheet = ActiveWorkbook.Item(TITLE_CHARACTER).Object
    Call CalcCharacts
    Set DataSheetMod = ActiveWorkbook.Item(TITLE_DATA_MOD).Object
    If (DataSheet.Cases.Count > DataSheetMod.Cases.Count) Then
        DataSheetMod.AddCases(DataSheetMod.Cases.Count,
            DataSheet.Cases.Count - DataSheetMod.Cases.Count)
    End If
    DataSheet.SelectAll
    DataSheet.Copy
    DataSheetMod.GoTo(1,1)
    DataSheetMod.Paste
    Call Separation
    Set CharactSheet = ActiveWorkbook.Item(TITLE_CHARACTER_MOD).Object
    Set DataSheet = DataSheetMod
    Call CalcCharacts
End Sub
'Процедура расчета среднего линейного отклонения
Sub CalcAvgLineDev()
    Dim AvgLineDev As Areas
    Set AvgLineDev = CharactSheet.Case(IND_LINE_DEV).Variables
    Dim AvgArifm As Areas

```

```

Set AvgArifm = CharactSheet.Case(IND_AVG_ARIFM).Variables
Dim VarCases As Areas
Dim DevSum As Single
For VarInd = 1 To AvgLineDev.Count
    Set VarCases = DataSheet.Variable(VarInd).Cases
    DevSum = 0
    For CaseInd = 1 To VarCases.Count
        DevSum = DevSum + Abs(CSng(AvgArifm(VarInd)) -
            CSng(VarCases(CaseInd)))
    Next
    AvgLineDev(VarInd).Value = DevSum / VarCases.Count
Next
End Sub
'Процедура рсчета средних
Sub CalcDeviation()
    Debug.Clear
    Dim AvgArifm As Areas
    Set AvgArifm = CharactSheet.Case(IND_AVG_ARIFM).Variables
    Dim VarCases As Areas
    Dim SqrDevSum As Double
    Dim Deviation As Areas
    Set Deviation = CharactSheet.Case(IND_DEVIATION).Variables
    For VarInd = 1 To Deviation.Count
        Set VarCases = DataSheet.Variable(VarInd).Cases
        SqrDevSum = 0
        For CaseInd = 1 To VarCases.Count
            SqrDevSum = SqrDevSum + (Cdbl(AvgArifm(VarInd)) -
                Cdbl(VarCases(CaseInd)))^2
        Next
        Deviation(VarInd) = Cdbl(SqrDevSum / VarCases.Count)
    Next
End Sub
'Процедура расчета стандартного отклонения
Sub CalcQuartDev()
    Dim QuartDev As Areas
    Set QuartDev = CharactSheet.Case(IND_QUART_DEV).Variables
    Dim LowQuart As Areas
    Set LowQuart = CharactSheet.Case(IND_LOW_QUART).Variables
    Dim UpperQuart As Areas
    Set UpperQuart = CharactSheet.Case(IND_UPPER_QUART).Variables
    For VarInd = 1 To LowQuart.Count
        QuartDev(VarInd) = ((Cdbl(UpperQuart(VarInd)) -
            Cdbl(LowQuart(VarInd)))) / 2
    Next
End Sub
'Процедура расчета моментов третьего и четвертого порядка
Sub CalcMoment34
    Dim Moment3 As Areas
    Set Moment3 = CharactSheet.Case(IND_MOMENT3).Variables
    Dim Moment4 As Areas
    Set Moment4 = CharactSheet.Case(IND_MOMENT4).Variables
    Dim AvgArifm As Areas
    Set AvgArifm = CharactSheet.Case(IND_AVG_ARIFM).Variables
    Dim VarCases As Areas
    Dim DevSum3 As Double
    Dim DevSum4 As Double
    For VarInd = 1 To Moment3.Count
        Set VarCases = DataSheet.Variable(VarInd).Cases
        DevSum3 = 0

```

```

    DevSum4 = 0
    For CaseInd = 1 To VarCases.Count
        DevSum3 = DevSum3 + (AvgArifm(VarInd) - VarCases(CaseInd))^3
        DevSum4 = DevSum4 + (AvgArifm(VarInd) - VarCases(CaseInd))^4
    Next
Moment3(VarInd) = (DevSum3) / Moment3.Count
Moment4(VarInd) = (DevSum4) / Moment4.Count
Next
End Sub
'Процедура расчета относительных показателей
Sub Factors
    Dim FOscillation As Areas
    Set FOscillation = CharactSheet.Case(IND_F_OSCILATION).Variables
    Dim FCmpLineDev As Areas
    Set FCmpLineDev = CharactSheet.Case(IND_F_COMP_LINE_DEV).Variables
    Dim FVariation As Areas
    Set FVariation = CharactSheet.Case(IND_F_VARIATION).Variables
    Dim FQuartDev As Areas
    Set FQuartDev = CharactSheet.Case(IND_F_QUART_VAR).Variables
    Dim AvgArifm As Areas
    Set AvgArifm = CharactSheet.Case(IND_AVG_ARIFM).Variables
    Dim Median As Areas
    Set Median = CharactSheet.Case(IND_MEDIAN).Variables
    Dim AvgSqr As Areas
    Set AvgSqr = CharactSheet.Case(IND_AVG_SQR).Variables
    Dim Deviation As Areas
    Set Deviation = CharactSheet.Case(IND_LINE_DEV).Variables
    Dim LowQuart As Areas
    Set LowQuart = CharactSheet.Case(IND_LOW_QUART).Variables
    Dim UpperQuart As Areas
    Set UpperQuart = CharactSheet.Case(IND_UPPER_QUART).Variables
    For VarInd = 1 To FOscillation.Count
        FOscillation(VarInd)=(UpperQuart(VarInd)-
        LowQuart(VarInd))/AvgArifm(VarInd)*100
        FCmpLineDev(VarInd)=Deviation(VarInd)/AvgArifm(VarInd)*100
        FVariation(VarInd)=AvgSqr(VarInd)/AvgArifm(VarInd)*100
        FQuartDev(VarInd)=((Cdbl(UpperQuart(VarInd)) -
        Cdbl(LowQuart(VarInd)))) / (2*Median(VarInd))
    Next
End Sub
'Вывод выборочных характеристик и обобщающих показателей
Sub CalcCharacts
    Dim Analys As Analysis
    Set Analys = Analysis (scBasicStatistics, DataSheet)
    Analys.Dialog.Statistics = scBasDescriptives
    Analys.Run
    With Analys.Dialog
        .Variables = "1-4"
        .ValidN=True
        .Mean = True
        .Median = True
        .Mode = True
        .GeometricMean = True
        .HarmonicMean = True
        .ConfLimitsForMeans = False
        .StandardDeviation = True
        .MinimumMaximum=True
        .Variance = True
    End With
End Sub

```

```

.Skewness = True
.LowerUpperQuartiles = True
.Kurtosis = True
.Range = True
End With
' Сохранение ссылки на строку, в которую нужно записать характеристики
Dim pCharactSheet As Spreadsheet
Set pCharactSheet = CharactSheet
Set CharactSheet = Analys.Dialog.Summary(1)
CharactSheet.TransposeData
With CharactSheet
    .CaseNameWidth=2.3
    .CaseName(1) = "Число замеров"
    .CaseName(2) = "Среднее арифметическое"
    .CaseName(3) = "Среднее геометрическое"
    .CaseName(4) = "Среднее гармоническое"
    .CaseName(5) = "Медиана"
    .CaseName(6) = "Мода"
    .CaseName(7) = "Частота моды"
    .CaseName(8) = "Минимальное значение"
    .CaseName(9) = "Максимальное значение"
    .CaseName(10) = "Нижний квартиль"
    .CaseName(11) = "Верхний квартиль"
    .CaseName(12) = "Размах варьирования"
    .CaseName(13) = "Смещенная дисперсия"
    .CaseName(14) = "Среднеквадратическое отклонение"
    .CaseName(15) = "Ассиметрия"
    .CaseName(16) = "Эксцесс"
    .AddCases(.Cases.Count, 1)
    .CaseName(.Cases.Count) = "Среднее линейное отклонение"
    .AddCases(.Cases.Count, 1)
    .CaseName(.Cases.Count) = "Несмещённая дисперсия"
    .AddCases(.Cases.Count, 1)
    .CaseName(.Cases.Count) = "Квартильное отклонение"
    .AddCases(.Cases.Count, 1)
    .CaseName(.Cases.Count) = "3 центральный момент"
.AddCases(.Cases.Count, 1)
    .CaseName(.Cases.Count) = "4 центральный момент"
    .AddCases(.Cases.Count, 1)
    .CaseName(.Cases.Count) = "Коэффициент осцилляции"
    .AddCases(.Cases.Count, 1)
    .CaseName(.Cases.Count) = "Коэффициент отн. Линейного
отклонения"
    .AddCases(.Cases.Count, 1)
    .CaseName(.Cases.Count) = "Коэффициент вариации"
    .AddCases(.Cases.Count, 1)
    .CaseName(.Cases.Count) = "Коэффициент квартильной вариации"
    For i = 1 To .Variables.Count
        .Variable(i).ColumnType = scDouble
        .Variable(i).NumberFormat = "##.###"
    Next
End With
Call CalcAvgLineDev
Call CalcDeviation
Call CalcQuartDev
Call CalcMoment34
Call Factors
' Дополнение листа с характеристиками строками, если нужно

```

```

If CharactSheet.Cases.Count > pCharactSheet.Cases.Count Then
    pCharactSheet.AddCases(pCharactSheet.Cases.Count, Charact
    Sheet.Cases.Count - pCharactSheet.Cases.Count)
End If
' Копирование содержимого листа, созданного с помощью Analysis, в лист с характеристиками
CharactSheet.SelectAll
CharactSheet.Copy
pCharactSheet.GoTo(1,1)
pCharactSheet.Paste
For i = 1 To CharactSheet.Cases.Count
    pCharactSheet.CaseName(i) = CharactSheet.CaseName(i)
Next
Set CharactSheet = pCharactSheet
End Sub
' Процедура отсева
Sub Separation
    Dim TauMax() As TTauMax
    Dim CountCase As Integer
    Dim CountVars As Integer
    CountCase = DataSheetMod.Cases.Count
    CountVars = DataSheetMod.Variables.Count
    Dim GlobalCaseStatus() As TCaseStatus
    ReDim GlobalCaseStatus(1 To CountCase) As TCaseStatus
    For i = 1 To UBound(GlobalCaseStatus)
        GlobalCaseStatus(i).Sep = False
        GlobalCaseStatus(i).VarInd = -1
    Next
    ReDim TauMax(1 To CountVars) As TTauMax
    Dim Analys As Analysis
    Set Analys = Analysis (scBasicStatistics, DataSheetMod)
    Analys.Dialog.Statistics = scBasDescriptives
    Analys.Run
    With Analys.Dialog
        .Variables = "1-" + Str(CountVars)
        .Mean = True
        .StandardDeviation = True
        .Variance = False
        .ValidN = False
        .MinimumMaximum = False
    End With
    ' Расчёт эмпирических max
    Dim AvgArifm As Areas
    Set AvgArifm = Analys.Dialog.Summary(1).Variables(1).Cases ' ср. арифм.
    Dim StdDev As Areas
    Set StdDev = Analys.Dialog.Summary(1).Variables(2).Cases ' см. откл.
    Dim Dev As Double
    Dim MaxDev As Double
    Dim IndMax As Integer
    Dim VarCases As Areas
    For VarInd = 1 To CountVars
        MaxDev = 0
        IndMax = 1
        Set VarCases = DataSheetMod.Variables(VarInd).Cases
        For CaseInd = 1 To CountCase
            Dev = Abs(AvgArifm(VarInd).Value - Var-
            Cases(CaseInd).Value)
            If Dev > MaxDev Then
                MaxDev = Dev
                IndMax = CaseInd
            End If
        Next CaseInd
    Next VarInd
End Sub

```

```

        End If
    Next
    TauMax(VarInd).Tau = MaxDev / StdDev(VarInd)
    TauMax(VarInd).IndCase = IndMax
Next
' Omces
Dim LocalCaseStatus() As TCaseStatus
LocalCaseStatus(i).Sep = true - нужен отсев i-ого наблюдения
ReDim LocalCaseStatus(1 To CountCase) As TCaseStatus
For i = 1 To UBound(LocalCaseStatus)
    LocalCaseStatus(i).Sep = False
    LocalCaseStatus(i).VarInd = -1
Next
Dim NeedSep As Boolean ' нужен ли отсев на данном шаге
NeedSep = False
If CountCase < 25 Then
    Dim TblTau As Double
    TblTau = -VStudent(0.001, CountCase)
    For VarInd = 1 To CountVars
        If CountCase <= CountVars + 1 Then Exit For
        If TauMax(VarInd).Tau >= TblTau Then
            LocalCaseStatus(TauMax(VarInd).IndCase).Sep = True
            LocalCaseStatus(TauMax(VarInd).IndCase).VarInd = VarInd
            CountCase = CountCase - 1
            NeedSep = True
        End If
    Next
Else
    Dim TblTau1 As Double
    Dim TblTau2 As Double
    Dim t1 As Double
    Dim t2 As Double
    t1 = -VStudent(0.05, CountCase - 2)
    t2 = -VStudent(0.001, CountCase - 2)
    TblTau1 = t1 * (((CountCase - 1) / (CountCase - 2 + t1 ^ 2)) ^ (1/2))
    TblTau2 = t2 * (((CountCase - 1) / (CountCase - 2 + t2 ^ 2)) ^ (1/2))
    For VarInd = 1 To CountVars
        If CountCase <= CountVars + 1 Then Exit For
        If (TauMax(VarInd).Tau >= TblTau2) Or _
            ((TauMax(VarInd).Tau < TblTau2) And (TauMax(VarInd).Tau >=
                TblTau1) And (CountCase > CountVars + 1)) Then
            LocalCaseStatus(TauMax(VarInd).IndCase).Sep = True
            LocalCaseStatus(TauMax(VarInd).IndCase).VarInd = VarInd
            CountCase = CountCase - 1
            NeedSep = True
        End If
    Next
End If
Analys.Close
Dim Shift As Integer
Shift = 0
For i = 1 To UBound(LocalCaseStatus)
    If LocalCaseStatus(i).Sep Then
        DataSheetMod.DeleteCases(i - Shift, i - Shift)
        Shift = Shift + 1
    End If
Next
Call FixChages(LocalCaseStatus, GlobalCaseStatus)
' Фиксирование результаты отсева

```

```

Dim SepResSheet As Spreadsheet
Set SepResSheet = ActiveWorkbook.Item(TITLE_SEP_RES).Object
If SepResSheet.Cases.Count > 1 Then _
    SepResSheet.DeleteCases(2, SepResSheet.Cases.Count)
Dim FirstIns As Boolean
For i = 1 To UBound(GlobalCaseStatus)
    If GlobalCaseStatus(i).Sep Then
        SepResSheet.AddCases(SepResSheet.Cases.Count, 1)
        SepResSheet.Cells(SepResSheet.Cases.Count, 1).Value = i
        SepResSheet.Cells(SepResSheet.Cases.Count, 2).Value =
            GlobalCaseStatus(i).VarInd
    End If
Next
If SepResSheet.Cases.Count <> 1 Then SepResSheet.DeleteCases(1,1)
End Sub
'Функция преобразования матрицы наблюдений
Function ConvertCaseInd(ByVal CaseInd, ByRef CaseStatus() As TCaseStatus) As Integer
    Dim CaseCtr As Integer
    CaseCtr = 0
    Dim RealCaseInd As Integer
    RealCaseInd = 1
    For i = 1 To UBound(CaseStatus)
        If Not CaseStatus(i).Sep Then
            CaseCtr = CaseCtr + 1
            If CaseCtr = CaseInd Then
                RealCaseInd = i
                Exit For
            End If
        End If
    Next
    ConvertCaseInd = RealCaseInd
End Function
'Процедура фиксирования отсеянных данных
Sub FixChages(ByRef LocStat() As TCaseStatus, ByRef GlobStat() As TCaseStatus)
    Dim RealCaseInd As Integer ' индекс наблюдения в исходной таблице с данными
    For i = 1 To UBound(LocStat)
        If LocStat(i).Sep Then
            RealCaseInd = ConvertCaseInd(i, GlobStat)
            GlobStat(RealCaseInd).Sep = True
            GlobStat(RealCaseInd).VarInd = LocStat(i).VarInd
        End If
    Next
End Sub

```

1.6 Разработка методов расчета свойств конечного доменного шлага на основе данных аглодоменного комплекса

Одной из проблем металлургического производства является получение данных химического анализа продуктов плавки. Для управления технологией аглодоменного производства и оценки проб чугуна необходима информация о химическом составе шлага и сведения об его свойствах.

Процесс шлакообразования зависит от многих факторов и оказывает существенное влияние на результаты работы доменной печи и качество чугуна, что связано главным образом с характером теплообмена и тем, насколько полно прошли процессы восстановления. Шлак в жидком виде имеет плотность $2,5 \text{ т/м}^3$ и относительно более высокую вязкость в сравнении с чугуном. Плавление и стекание шлака происходит медленнее чугуна, что является причиной загромождения межкускового пространства, особенно в распаре и заплечиках.

В настоящее время представляется целесообразным комплексный подход к исследованию такой сложной многокомпонентной системы, как доменные шлаки. Необходимость всестороннего их исследования продиктована стремлением производителя получить как можно более качественный продукт и при этом оптимально использовать побочные продукты, неизбежно получаемые в процессе производства. Возникающие при решении этой задачи сложности обусловлены невозможностью проанализировать его химические и физико-химические свойства в жидком состоянии. Исследования химического состава производятся с твердыми шлаками и эти данные связываются с экспериментально полученной вязкостью жидких шлаков, что не может не сказаться на истинности результатов, так как строение шлаков в жидком и твердом состояниях различно, а прямая связь между строением и свойствами любого материала (не только шлака) не подлежит сомнению. Вышеизложенное несоответствие вызвало в свое время возникновение сразу нескольких теорий о строении металлургических шлаков. Таким образом, знание структуры шлака в жидкой фазе могло бы существенно помочь в решении некоторых проблем, стоящих перед металлургами и в частности, позволило бы получать данные для расчета некоторых важнейших свойств доменных шлаков, таких как вязкость, по-

верхностное натяжение, электропроводность и др. в зависимости от химического состава.

1.6.1 Теории строения и модели структуры расплавленных шлаков

Обзор масштабных исследований ведущих ученых с целью уточнения структуры жидких шлаков проведен в работе [27]. Рассматриваются как основные две теории строения расплавленных шлаков – молекулярная и ионная [28]. Молекулярная теория базируется на следующих положениях:

- частицами, образующими расплавленные шлаки, являются молекулы оксидов и соединений из оксидов;
- концентрации указанных молекул определяются условиями равновесия реакций образования–диссоциации соответствующих соединений;
- в химических процессах между металлом и шлаком участвуют только свободные, то есть не входящие в соединения, оксиды;
- константа равновесия как функция температуры выражается непосредственно через весовые или мольные концентрации свободных оксидов.

Согласно ионной теории, частицы, образующие расплавленный шлак, представляют собой не нейтральные молекулы, а ионы, и процессы, проходящие между металлом и шлаком, имеют характер электрохимического взаимодействия. Ионная теория получила значительное развитие благодаря работам [29–31].

В работе [32] сделан вывод, что жидкие металлургические шлаки, содержащие кремнезем (а также и глинозем) представляют своеобразные растворы; свободные оксиды в них так же, как и в шлаках, находящихся в твердом состоянии, отсутствуют, наряду с этим шлаки содержат сложные многоатомные кремнеалюмоокислородные анионы между комплексными ионами. Между ними и ионами кислорода устанавливается подвижное равновесие, концентрация того или иного аниона в котором определяется

температурой, отношением числа атомов кислорода к числу атомов кремния во всем расплаве в целом и природой присутствующих катионов. Такой взгляд на природу шлака позволил сделать вывод, что большая прочность связи атомов, в которых, значительные размеры и легкость взаимных переходов, а также сильное электростатическое взаимодействие простейших из них с катионами, обуславливают относительно высокую вязкость шлаков, а существование относительно легко подвижных ионов железа, марганца, кальция, магния и кислорода обеспечивает их высокую электропроводность.

Обширный экспериментальный материал по доменным шлакам приведен в работе [33]. Были составлены диаграммы вязкости для систем как натуральных, так и синтетических и полусинтетических доменных шлаков, приготовленных на основе натурального шлака Магнитогорского металлургического комбината (ММК).

После анализа ионной и молекулярной теорий была разработана теория строения шлаков с учетом сосуществования ионной и ковалентной связей. Эта теория учитывает как термическую, так и электрическую диссоциации соединений и позволяет объяснять физические и химические свойства шлаковых систем на основе диаграмм состояний, электропроводности, активности компонентов шлака, распределения элементов между шлаком и металлом и др.

В работах [34, 35] была выдвинута теория о полимерной модели сначала для металлических затем и для силикатных расплавов. В рамках этой модели было получено уравнение, позволяющее определять вязкость двойных силикатных расплавов по степени их полимеризации. Результаты расчета имели хорошую сходимость с экспериментальными данными [36, 37].

Свое дальнейшее развитие полимерная модель получила применительно к силикатным расплавам в работе В.К. Новикова [38]. Существовавшие на тот момент полимерные модели бинарных силикатных расплавов (Мэссона, Есина, Гэскелла) позволяли получить уравнения для расчета их основных структурных характеристик. Однако их существенным недостатком является применимость этих моделей в ограниченном интервале составов, трудоемкость вычислений, сложность учета всех возможных форм комплексных анионов. В.К. Новиков поставил перед собой задачу развить вышеуказанные модели с тем, чтобы получить уравнения, позволяющие сравнительно просто рассчитывать структурные характеристики бинарных силикатных расплавов во всем интервале их составов с учетом наличия кольцевых ионов. Ему удалось рассчитать активности компонентов, теплоты смешения, распределение силикатных анионов и атомов кремния по видам силикатных анионов, оценить тепловой эффект реакции полимеризации и изменение энтропии. Постепенно усложняя задачу, В.К. Новикову удалось перейти к расчету характеристик для многокомпонентных силикатных расплавов вида $Me'O - Me''O - SiO_2$. Результаты, полученные им для систем $FeO - CaO - SiO_2$ ($CaO=CaO+MgO$), $FeO - MnO - SiO_2$, имеют удовлетворительную сходимость, что видно из рисунка 1.20 (для системы $FeO - MnO - SiO_2$).

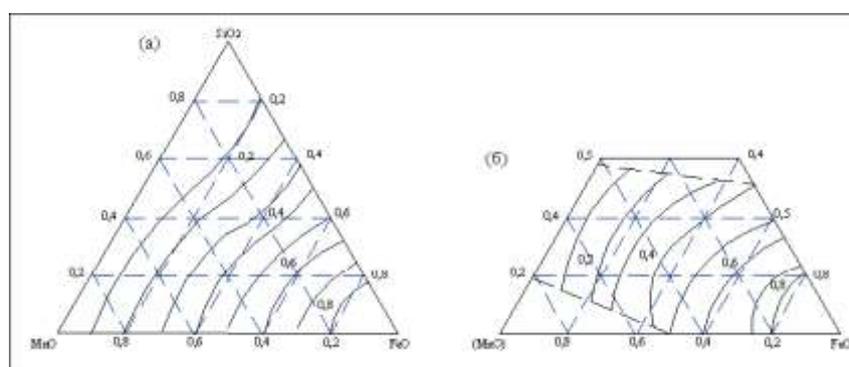


Рисунок 1.20 – Расчетные (а) и экспериментальные (б) линии изоактивностей FeO в системе $FeO - MnO - SiO_2$ при $1550^{\circ}C$

В работе [39] получены математические зависимости термодинамических свойств рассматриваемой системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ от ее состава и температуры в предположении, что избыточная интегральная молярная свободная энергия G^E расплава формируется аддитивно из вкладов парных взаимодействий компонентов. Так, для любой системы из трех компонентов:

$$G^E = -8,4x_1^2x_2 - 285x_1x_2 + 255,4x_1x_2^2 - 127x_1x_3 - 25x_2x_3.$$

Для системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ выведено уравнение, позволяющее получить для любого компонента i зависимость его парциальной молярной энергии G_i^E от состава расплава. Достигнута удовлетворительная согласованность расчетных данных с экспериментальными при $T=1873$ К.

Автор физико-химической модели структуры шлаковых расплавов Э.В. Приходько [40] считает, что необходимо учитывать межатомное взаимодействие в оксидных системах с учетом направленного характера химической связи и сопутствующим ему эффектом ковалентности, гибридизации и анизотропии электронного распределения. В качестве первого приближения для учета этих эффектов при анализе взаимосвязи состава, структуры и свойств шлаковых расплавов, он предлагает использовать полумпирический метод расчета z и эффективных ионных радиусов (Ru^z) в зависимости от межатомных расстояний (d) с помощью уравнений системы неполяризованных ионных радиусов:

$$\lg Ru^z = \lg Ru^0 - z \lg \alpha,$$

где Ru^0 и $\lg \alpha$ – табулированные для атомов каждого элемента константы.

В случае взаимодействия ионов A и B на заданном d значения z и Ru^z для каждого из реагентов определяются путем решения системы уравнений:

$$Ru_A^{zA} + Ru_B^{zB} = d,$$

$$\lg Ru_A^{ZA} = \lg Ru_A^0 - \left(z_{\min A} + \frac{\Delta e}{2} \right) \operatorname{tg} \alpha_A,$$

$$\lg Ru_B^{ZB} = \lg Ru_B^0 - \left(z_{\min B} + \frac{\Delta e}{2} \right) \operatorname{tg} \alpha_B.$$

Эффективные заряды в таком случае включают сферическую (z_{\min}) и направленную $\Delta e/2$ компоненты, т. е. $z_A = z_{\min A} + \Delta e/2$ и $z_A + z_B = \Delta e$.

Анализируя эти уравнения можно заметить, что z и Ru^z в соединениях изменяются не дискретно, а сообразно межатомным расстояниям. Э.В. Приходько предлагает отойти от постулирования двухзарядового состояния анионов кислорода и перейти к новому масштабу значений z . Это позволит выявить связь между рассчитываемыми из рассмотренных выше уравнений параметрами и важнейшей характеристикой парного взаимодействия – энергией связи. Им рассчитана эта зависимость для ряда оксидов (рисунок 1.21).

Модель структуры оксидных расплавов, разработанная Э.В. Приходько, базирующаяся на трактовке элементарного парного взаимодействия, основана на допущении, что в расплавах, как и в кристаллических веществах, между характеристиками взаимодействия в первой и второй координационных сферах устанавливаются определенные соотношения, индивидуальные для каждой группы изоструктурных материалов. Состав многокомпонентного шлакового расплава приводится к виду $Me_\rho O$, например



где ρ – показатель стехиометрии, определяемый как отношение чисел ионов A и B в 100 г расплава.

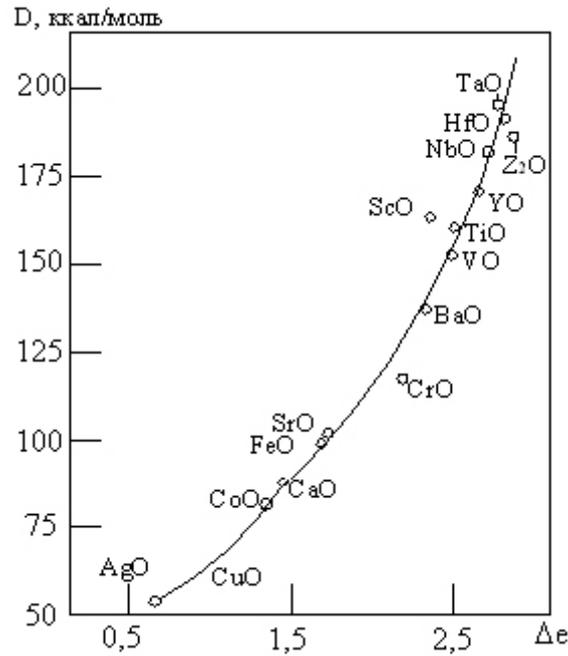


Рисунок 1.21 – Изменение энергии связей D в зависимости от параметра $\Delta\epsilon$

Установлено, что вязкость η и электропроводность χ наиболее тесно связаны с показателями стехиометрии ρ . С увеличением значения ρ повышается концентрация катионов в структуре расплава при снижении жесткости сочленения между полиэдрами анионного каркаса и прочности связей Si – O, что ведет к уменьшению вязкости и увеличению электропроводности. Поверхностное натяжение σ , смачивающая способность и температура кристаллизации расплавов наиболее тесно связаны с $\Delta\epsilon$. Отмечается различное влияние отдельных параметров (кроме ρ) на уровень вязкости в зависимости от температуры.

Для решения технологических задач в работах [41–45] были предложены эмпирические уравнения, включающие два основных модельных критерия $\Delta\epsilon$ и ρ :

$$\ln \eta_{1300} = 10,33 - 15,13\rho - 0,138\Delta\epsilon,$$

$$\ln \eta_{1400} = 7,7 - 11,23\rho - 0,043\Delta\epsilon,$$

$$\ln \eta_{1500} = 6,55 - 9,97\rho - 0,047\Delta\epsilon,$$

$$\sigma_{1500} = 526 - 67\rho + 39,7\Delta e,$$

$$\ln \chi_{1500} = 8,52\rho - 0,195\Delta e - 7,152,$$

$$T_{\text{кк}} = 1008 + 714,4\rho - 95,1\Delta e,$$

где η_i – вязкость шлакового расплава при температуре i ; σ_i – поверхностное натяжение шлакового расплава при температуре i ; χ_i – электропроводность шлакового расплава при температуре i ; $T_{\text{кк}}$ – температура конца кристаллизации.

Погрешность для расчетных данных по сравнению с экспериментальными данными составляет для η – ± 20 %, для σ – ± 2 %, для $T_{\text{кк}}$ – 2,5 %. Украинскими учеными была создана обширная база данных «Металлургия», в которой в качестве методологической базы была использована вышеописанная методика, в качестве информационной – банк данных в который входили данные о свойствах синтетических и промышленных шлаков доменного и сталеплавильного производства.

1.6.2 Анализ состава шлака доменного комплекса ОАО «ММК»

Различают первичный, промежуточный и конечный доменный шлак. Первичный шлак отличается непостоянством химического состава, которое зависит от конфигурации поверхности зоны первичного шлакообразования. Химический состав первичных шлаков колеблется в пределах: 30 – 40 % SiO_2 ; 11 – 20 % Al_2O_3 ; 27 – 35 % CaO ; 1,5 – 6 % MgO ; 5 – 8 % MnO ; 3 – 18 % FeO и 0,1 – 0,7% S. Промежуточный шлак, который образуется в нижней части заплечиков и верхней части горна, имеет химический состав, близкий к составу конечного шлака по содержанию SiO_2 (35 – 38%) и CaO (39 – 45%), но до перехода в шлак составляющих золы кокса и восстановления FeO , MnO и P_2O_5 на горизонте воздушных фурм и ниже, его состав еще достаточно далек от состава конечного шлака: 5–6,5% Al_2O_3 ; 2–2,5% MgO ; 4–6% MnO ; 0,05–0,25 P_2O_5 ; 3–7% FeO и 1–1,5% S. Состав конечного шлака зависит от вида выплавляемого чугуна (передельный, литейный,

ферросилиций и т.д.). Для наиболее распространенного передельного чугуна характерны следующие интервалы колебаний химического состава конечного шлака: 32–40% SiO_2 , 6–14% Al_2O_3 , 3–45% CaO , 6–15% MgO , 0,1–1,5% MnO , ~0,3% FeO , 1–2% TiO_2 . При химическом анализе конечного шлака как основные выделяют следующие соединения: SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MnO , FeO , MgO , TiO_2 , K_2O , Na_2O .

Свойства шлака определяются его химическим составом и минералогическим строением исходных шихтовых материалов. Состав компонентов шлака изменяется для данной печи с течением времени. На рисунке 1.22 для первой доменной печи ОАО «ММК» показано изменение состава шлака для ряда последовательных плавов. Среднее отклонение составляет около 5%.

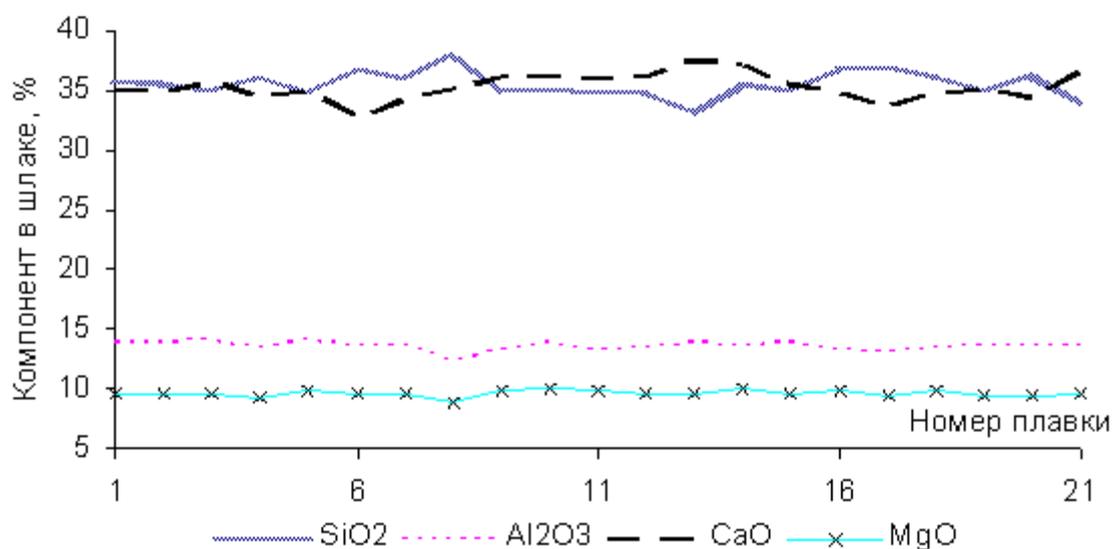
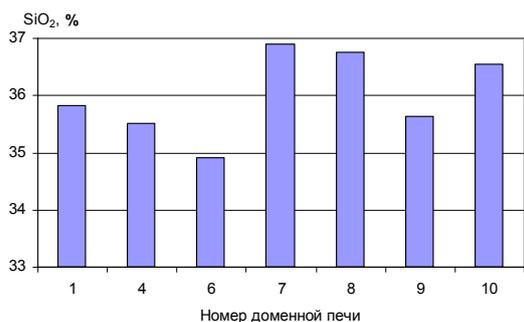
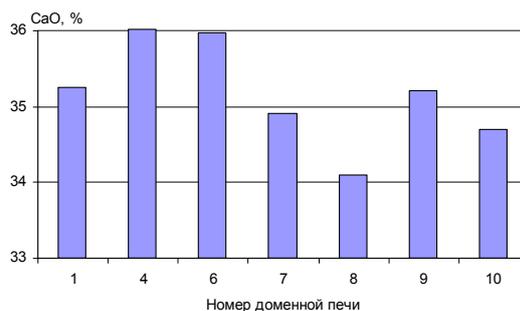


Рисунок 1.22 – Зависимость состава шлака в ряде последовательных плавов для 1 доменной печи ОАО «ММК»

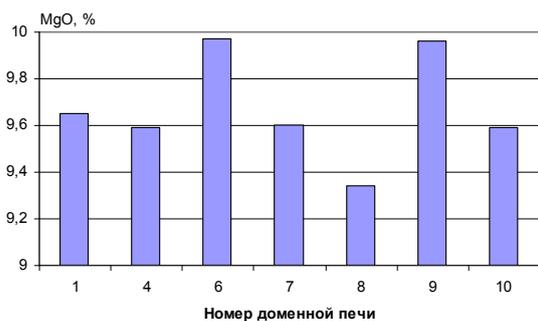
Однако даже при одном исходном сырье получается шлак с разным составом, а значит и различными свойствами. На рисунке 1.23 приведено содержание основных компонентов в шлаке для семи одновременно работающих доменных печей ОАО «ММК». Отклонение от среднего состава шлака доходит 3%.



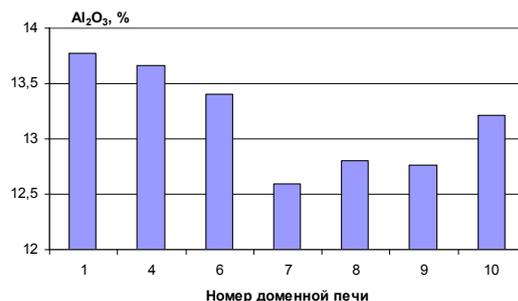
a



б



в



г

Рисунок 1.23 – Содержания основных компонентов в шлаке для разных доменных печей на 1.01.2010 г: а – SiO₂; б – CaO; в – MgO; г – Al₂O₃

Таким образом, несмотря на множество существующих теорий, описывающих экспериментальные данные, нет единой концепции взглядов на строение металлургических шлаков. Логично предположить, что решение проблемы расчета свойств доменного шлака лежит в еще более детальном изучении строения даже не самого шлака, а его составляющих.

Однако если до сих пор доподлинно не изучено общее строение шлака при температурах, близких к температуре доменного процесса, то тем более невозможно исследование строения компонентов жидкого металлургического шлака в реальных условиях. Компьютерное моделирование представляется в данном случае оптимальным способом решения этой задачи и нужно лишь верно выбрать метод, которым оно будет производиться, исходя из поставленной задачи и технических ресурсов.

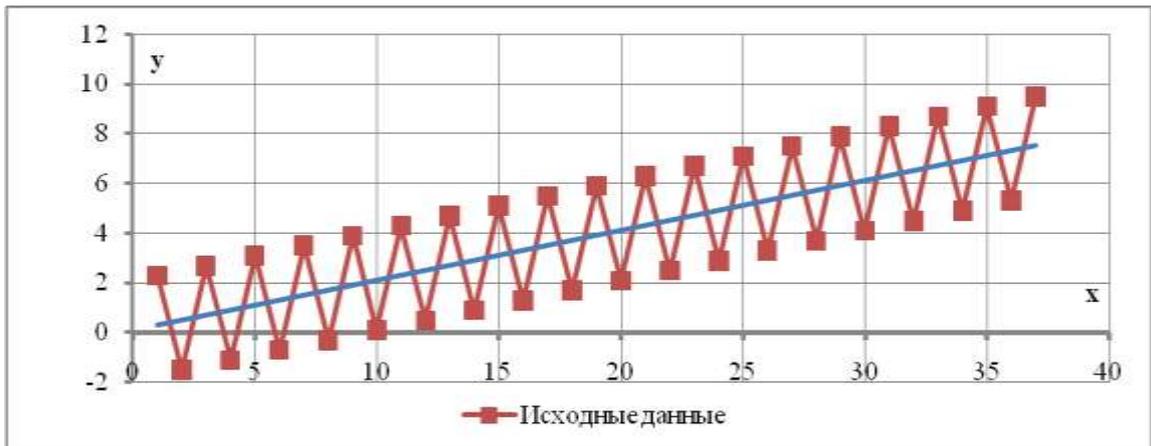
1.7 Разработка алгоритмов оценки влияния колеблемости показателей работы аглодоменного комплекса на показатели работы сталеплавильного передела и качество непрерывнолитой заготовки

1.7.1 Методика изучения и показатели колеблемости исходных данных

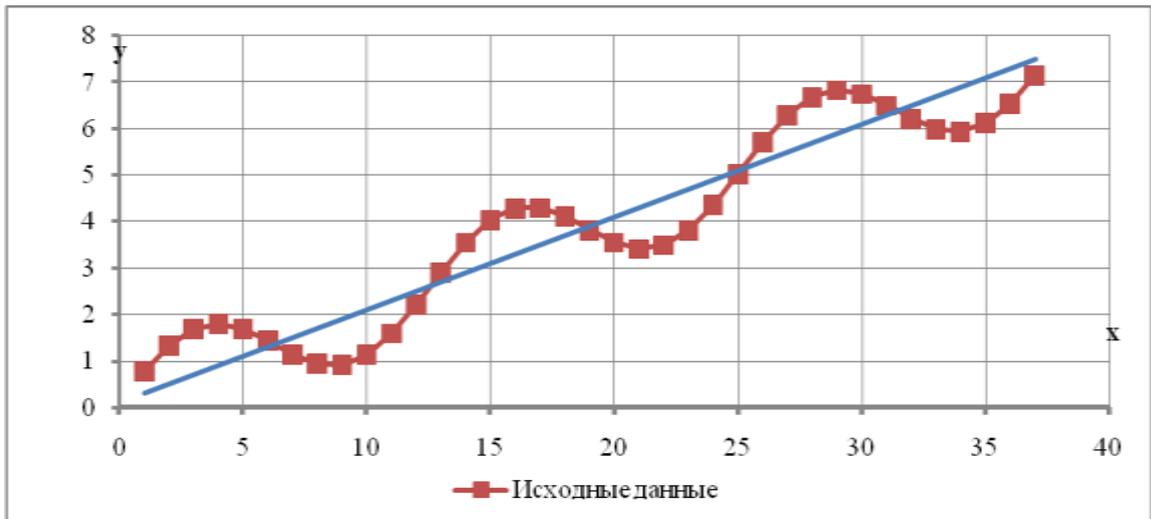
Если при изучении и измерении тенденции динамики колебания уровней играли лишь роль помех, «информационного шума», от которого следовало по возможности абстрагироваться, то в дальнейшем сама колеблемость становится предметом статистического исследования. Значение изучения колебаний уровней динамического ряда очевидно: колебания урожайности, продуктивности скота, производства мяса экономически нежелательны, так как потребность в продукции агрокомплекса постоянна. Эти колебания следует уменьшать, применяя прогрессивную технологию и другие меры. Напротив, сезонные колебания объемов производства зимней и летней обуви, одежды, мороженого, зонтиков, коньков – необходимы и закономерны, так как спрос на эти товары тоже колеблется по сезонам и равномерное производство требует лишних затрат на хранение запасов. Регулирование рыночной экономики, как со стороны государства, так и производителей в значительной мере состоит в регулировании колебаний экономических процессов.

Типы колебаний статистических показателей весьма разнообразны, но все же можно выделить три основных: пилообразную или маятниковую колеблемость, циклическую долгопериодическую и случайно распределенную во времени колеблемость. Типовые графики колебаний приведены на рисунке [1.24](#).

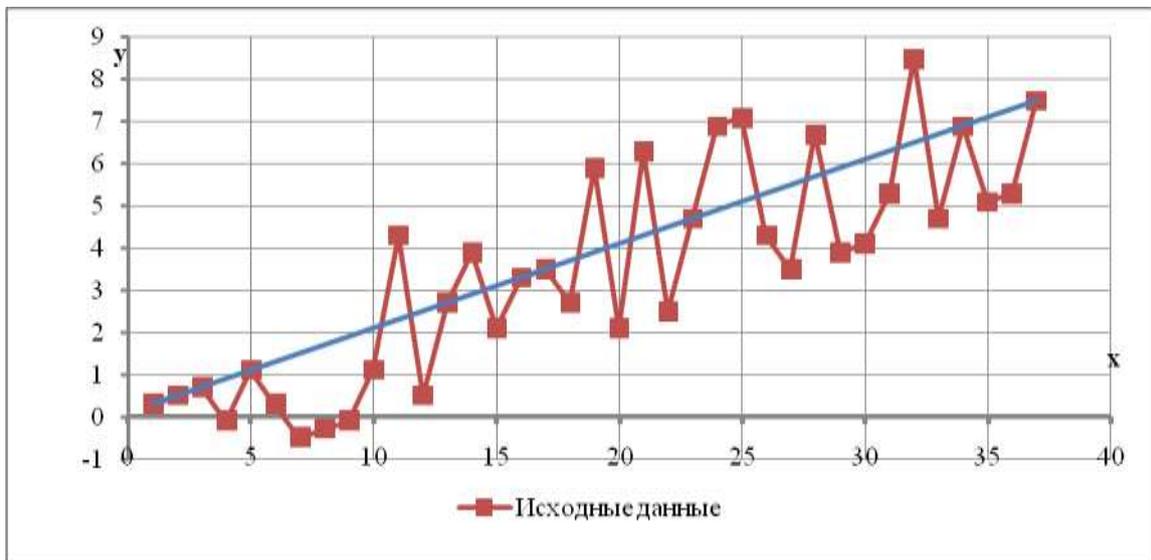
Пилообразная или маятниковая колеблемость состоит в попеременных отклонениях уровней от тренда в одну и в другую сторону.



а



б



в

Рисунок 1.24 – Диаграммы колеблемости исходных данных: а – пилообразная (маятниковая); б – долгопериодическая; в – случайно-распределенная

Для определения типа колебаний применяются графическое изображение, метод «поворотных точек» М. Кендэла, вычисление коэффициентов автокорреляции отклонений от тренда.

1.7.2 Показатели колеблемости исходных данных

Основными показателями, характеризующими силу колеблемости уровней, выступают показатели, характеризующие вариацию значений признака в пространственной совокупности. Однако вариация в пространстве и колеблемость во времени принципиально различны. Прежде всего, различны их основные причины. Во-первых, вариация значений признака у одновременно существующих единиц возникает из-за различий в условиях существования единиц совокупности. Второе коренное отличие состоит в том, что значения варьирующего признака в пространственной совокупности можно считать в основном не зависимыми друг от друга, напротив, уровни динамического ряда, как правило, являются зависимыми: это показатели развивающегося процесса, каждая стадия которого связана с предыдущими состояниями. В-третьих, вариация в пространственной совокупности измеряется отклонениями индивидуальных значений признака от среднего значения, а колеблемость уровней динамического ряда измеряется не их отличиями от среднего уровня (эти отличия включают и тренд, и колебания), а отклонениями уровней от тренда.

На основе качественного содержания понятия колеблемости строится и система ее показателей. Показателями силы колебаний уровней являются: амплитуда отклонений уровней отдельных периодов или моментов от тренда (по модулю), среднее абсолютное отклонение уровней от тренда (по модулю), среднее квадратическое отклонение уровней от тренда. Относительные меры колеблемости: относительное линейное отклонение от тренда и коэффициент колеблемости – аналог коэффициента вариации.

Особенностью методики вычисления средних отклонений от тренда является необходимость учета потерь степеней свободы колебаний на величину, равную числу параметров уравнения тренда. Например, прямая линия имеет два параметра, и, как известно из геометрии, через любые две точки можно провести прямую линию. Значит, имея лишь два уровня, мы проведем линию тренда точно через эти два уровня, и никаких отклонений уровней от тренда не окажется, хотя на самом деле и эти два уровня включали колебания, не были свободны от действия факторов колеблемости. Парабола второго порядка пройдет точно через любые три точки и т.п.

Учитывая потерю степеней свободы, основные абсолютные показатели колеблемости вычисляются:

– как среднее линейное отклонение

$$a(t) = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n - p} \quad (1.72)$$

– среднее квадратичное отклонение

$$s_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}, \quad (1.73)$$

где y_i – фактический уровень; \hat{y} – выравненный уровень, тренд; n – число уровней; p – число параметров тренда.

Относительные показатели колеблемости вычисляются делением абсолютных показателей на средний уровень за весь изучаемый период. Например, коэффициент колеблемости

$$v_{\text{кв}} = \frac{s_{\text{кв}}}{\bar{y}}. \quad (1.74)$$

Для суждения о размере вариации признака в статистике используются абсолютные и относительные показатели. К абсолютным показателям вариации относятся: размах колебаний; среднее линейное отклонение; среднее квадратическое отклонение; дисперсия; квартальное отклонение.

Формулы для расчета абсолютных и относительных показателей работы аглодоменного производства не являются уникальными и в отчете не приводятся.

1.7.3 Особенности оценки колеблемости во временных зависимостях

Временной ряд – это совокупность значений какого-либо показателя за несколько последовательных моментов или периодов времени. Каждый уровень временного ряда формируется под воздействием большого числа факторов, которые можно подразделить на три группы:

- факторы, формирующие тенденцию ряда;
- факторы, формирующие циклические колебания ряда;
- случайные факторы.

Основными этапами моделирования одномерного временного ряда принято считать:

- 1) графическое отображение временного ряда и определение гипотеза о его структуре;
- 2) оценка автокорреляционной функции временного ряда;
- 3) построение аддитивной или мультипликативной модели временного ряда и оценка выбранной модели;
- 4) оценка структурной стабильности временного ряда.

При различных сочетаниях в изучаемом явлении или процессе этих факторов зависимость уровней ряда от времени может принимать различные формы. *Во-первых*, большинство временных рядов экономических показателей имеют тенденцию, характеризующую совокупное долговременное воздействие множества факторов на динамику изучаемого показателя. Очевидно, что эти факторы, взятые в отдельности, могут оказывать разнонаправленное воздействие на исследуемый показатель. Однако в совокупности они формируют его возрастающую или убывающую тенденцию.

На рисунке 1.25 оказан гипотетический временной ряд, содержащий только возрастающую тенденцию.

Во-вторых, изучаемый показатель может быть подвержен циклическим колебаниям. Эти колебания могут носить сезонный характер, поскольку экономическая деятельность ряда отраслей экономики зависит от времени года (например, цены на сельскохозяйственную продукцию в летний период выше, чем в зимний; уровень безработицы в курортных городах в зимний период выше по сравнению с летним). При наличии больших массивов данных за длительные промежутки времени можно выявить циклические колебания, связанные с общей динамикой конъюнктуры рынка. На рисунке 1.26 представлен гипотетический временной ряд, содержащий только сезонную компоненту. Некоторые временные ряды не содержат тенденции и циклической компоненты, а каждый следующий их уровень образуется как сумма среднего уровня ряда и некоторой (положительной или отрицательной) случайной компоненты. Пример ряда, содержащего только случайную компоненту, приведен на рисунке 1.27

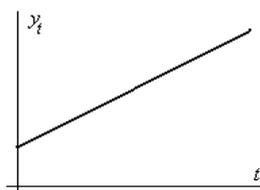


Рисунок 1.25– Временной ряд, содержащий только тенденцию

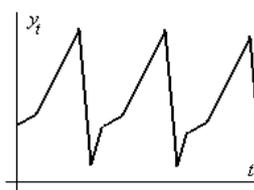


Рисунок 1.26 Временной ряд, содержащий только циклическую компоненту

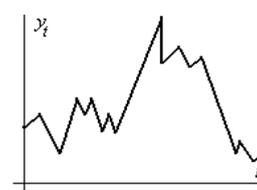


Рисунок 1.27 Временной ряд, содержащий только случайную компоненту

Очевидно, что реальные данные не следуют целиком и полностью из каких-либо описанных выше моделей. Чаще всего они содержат все три компоненты. Каждый их уровень формируется под воздействием тенденции, сезонных колебаний и случайной компоненты.

В большинстве случаев фактический уровень временного ряда можно представить как сумму или произведение трендовой, циклической и случайной компонент. Модель, в которой временной ряд представлен как сумма перечисленных компонент, называется аддитивной моделью временного ряда. Модель, в которой временной ряд представлен как произведение перечисленных компонент, называется мультипликативной моделью временного ряда. Основная задача эконометрического исследования отдельного временного ряда – выявление и придание количественного выражения каждой из перечисленных выше компонент с тем, чтобы использовать полученную информацию для прогнозирования будущих значений ряда или при построении моделей взаимосвязи двух или более временных рядов.

При наличии во временном ряде тенденции и циклических колебаний значения каждого последующего уровня ряда зависят от предыдущих. Корреляционную зависимость между последовательными уровнями временного ряда называют автокорреляцией уровней ряда.

Количественно ее можно измерить с помощью линейного коэффициента корреляции между уровнями исходного временного ряда и уровнями этого ряда, сдвинутыми на несколько шагов во времени.

Одна из рабочих формул для расчета коэффициента корреляции имеет вид:

$$r_1 = \frac{\sum_{t=2}^n (y_t - \bar{y}_1) \cdot (y_{t-1} - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum_{t=2}^n (y_t - \bar{y}_1)^2 \cdot \sum_{t=2}^n (y_{t-1} - \bar{y}_2)^2}},$$

где

$$\bar{y}_1 = \frac{\sum_{t=2}^n y_t}{n-1}, \quad \bar{y}_2 = \frac{\sum_{t=2}^n y_{t-1}}{n-1}.$$

Эту величину называют коэффициентом автокорреляции уровней ряда первого порядка, так как он измеряет зависимость между соседними уровнями ряда t и $t-1$, т.е. при лаге 1.

Число периодов, по которым рассчитывается коэффициент автокорреляции, называют лагом. С увеличением лага число пар значений, по которым рассчитывается коэффициент автокорреляции, уменьшается. Некоторые авторы считают целесообразным для обеспечения статистической достоверности коэффициентов автокорреляции использовать правило – максимальный лаг должен быть не больше .

Отметим два важных свойства коэффициента автокорреляции. *Во-первых*, он строится по аналогии с линейным коэффициентом корреляции и таким образом характеризует тесноту только линейной связи текущего и предыдущего уровней ряда. Поэтому по коэффициенту автокорреляции можно судить о наличии линейной (или близкой к линейной) тенденции. Для некоторых временных рядов, имеющих сильную нелинейную тенденцию (например, параболу второго порядка или экспоненту), коэффициент автокорреляции уровней исходного ряда может приближаться к нулю.

Во-вторых, по знаку коэффициента автокорреляции нельзя делать вывод о возрастающей или убывающей тенденции в уровнях ряда. Большинство временных рядов экономических данных содержит положительную автокорреляцию уровней, однако при этом могут иметь убывающую тенденцию.

Последовательность коэффициентов автокорреляции уровней первого, второго и т. д. порядков называют автокорреляционной функцией временного ряда. График зависимости ее значений от величины лага (порядка коэффициента автокорреляции) называется коррелограммой.

Анализ автокорреляционной функции и коррелограммы позволяет определить лаг, при котором автокорреляция наиболее высокая, а, следо-

вательно, и лаг, при котором связь между текущим и предыдущими уровнями ряда наиболее тесная, то есть при помощи анализа автокорреляционной функции и коррелограммы можно выявить структуру ряда.

Если наиболее высоким оказался коэффициент автокорреляции первого порядка, исследуемый ряд содержит только тенденцию. Если наиболее высоким оказался коэффициент автокорреляции порядка k , ряд содержит циклические колебания с периодичностью в k моментов времени. Если ни один из коэффициентов автокорреляции не является значимым, можно сделать одно из двух предположений относительно структуры этого ряда: либо ряд не содержит тенденции и циклических колебаний, либо ряд содержит сильную нелинейную тенденцию, для выявления которой нужно провести дополнительный анализ. Поэтому коэффициент автокорреляции уровней и автокорреляционную функцию целесообразно использовать для выявления во временном ряде наличия или отсутствия трендовой компоненты (T) и циклической (сезонной) компоненты (S).

1.7.4 Моделирование сезонных колебаний временного ряда

Существует несколько подходов к анализу структуры временных рядов, содержащих сезонные или циклические колебания.

Простейший подход – расчет значений сезонной компоненты методом скользящей средней и построение аддитивной или мультипликативной модели временного ряда. Общий вид аддитивной модели следующий:

$$Y = T + S + E.$$

Эта модель предполагает, что каждый уровень временного ряда может быть представлен как сумма трендовой (T), сезонной (S) и случайной (E) компонент. Общий вид мультипликативной модели выглядит так:

$$y = T \cdot S \cdot E.$$

Эта модель предполагает, что каждый уровень временного ряда может быть представлен как произведение трендовой (T), сезонной (S) и слу-

чайной (E) компонент. Выбор одной из двух моделей осуществляется на основе анализа структуры сезонных колебаний. Если амплитуда колебаний приблизительно постоянна, строят аддитивную модель временного ряда, в которой значения сезонной компоненты предполагаются постоянными для различных циклов. Если амплитуда сезонных колебаний возрастает или уменьшается, строят мультипликативную модель временного ряда, которая ставит уровни ряда в зависимость от значений сезонной компоненты.

Построение аддитивной и мультипликативной моделей сводится к расчету значений T , S и E для каждого уровня ряда. Процесс построения модели определен следующим алгоритмом.

1. Выравнивание исходного ряда методом скользящей средней.
2. Расчет значений сезонной компоненты S .
3. Устранение сезонной компоненты из исходных уровней ряда и получение выровненных данных ($T + E$) в аддитивной или ($T \cdot E$) в мультипликативной модели.
4. Аналитическое выравнивание уровней ($T + E$) или ($T \cdot E$) и расчет значений T с использованием полученного уравнения тренда.
5. Расчет полученных по модели значений ($T + S$) или ($T \cdot S$).
6. Расчет абсолютных и/или относительных ошибок. Если полученные значения ошибок не содержат автокорреляции, ими можно заменить исходные уровни ряда и в дальнейшем использовать временной ряд ошибок E для анализа взаимосвязи исходного ряда и других временных рядов.

1.7.5 Алгоритм оценки колеблемости показателей работы аглодоменного производства

Ранее описана структура исходных данных для характеристики работы аглодоменного производства. Учитывая, что указанный процесс обладает свойством цикличности, было принято решение об исследовании ка-

ждого параметра по алгоритму, приведенном на рисунке 1.28 читая, что всего p исследуемых величин.

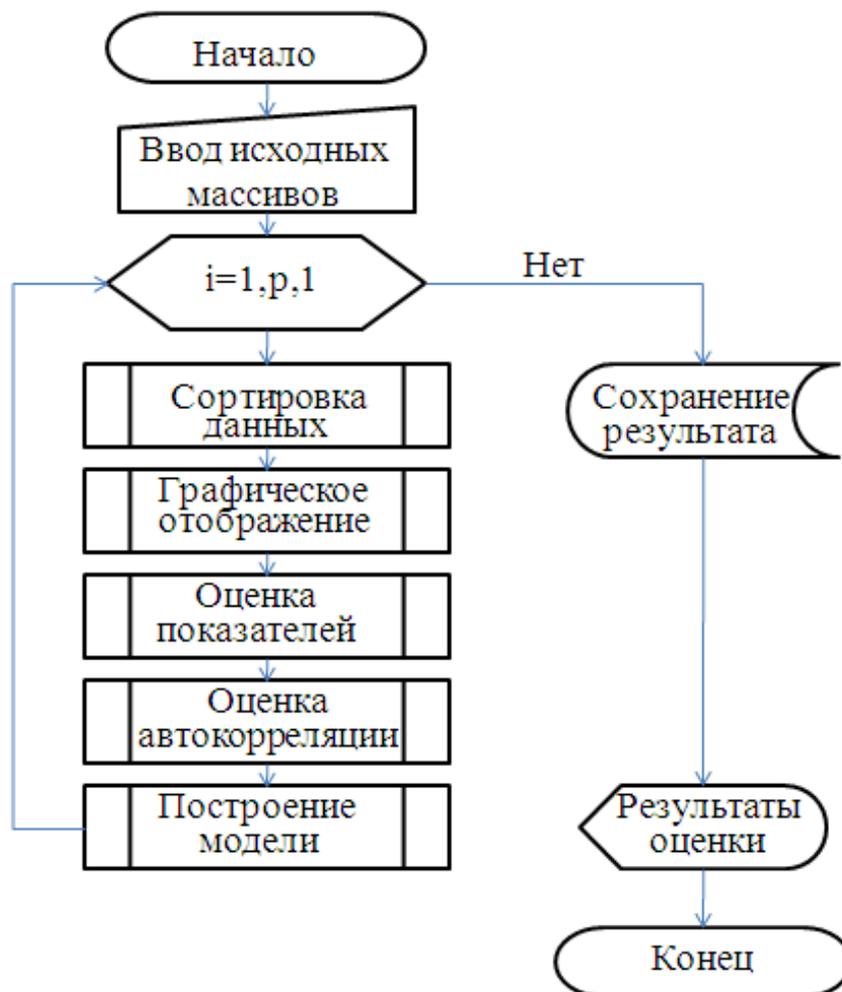


Рисунок 1.28 - Блок-схема алгоритма оценки колеблемости исходных данных

Данная блок-схема содержит блоки предназначенные:

- «Сортировка данных» – для упорядочивания исходных массивов по дате и времени, полученных показателей и может быть реализован на основе наиболее известных алгоритмов сортировки;
- «Графическое отображение» – для визуализации исходных данных на основе точечной диаграммы;
- «Оценка показателей» – для расчета абсолютных и относительных величин;

- «Оценка автокорреляции» – для расчета и оценки коэффициентов корреляции до порядка $n/2$ и определения размера цикла;
- «Построение модели» – для построения аддитивной или мультипликативной модели для временного ряда показателя.

Для реализации всех указанных блоков существует возможность использования стандартных пакетов: электронных таблиц, статистического или математического программного обеспечения, а так же разработки специализированного программного обеспечения.

Наиболее интересными результатами оценки колеблемости показателей работы аглодоменного производства можно считать совпадение цикличности между характеристиками других переделов – сталеплавильного, разливки стали и прокатного производства. Подобная оценка может быть выполнена после сплошного непрерывного наблюдения и формирования многомерного массива показателей по всем переделам.

1.8 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования оценки и прогнозирования качества непрерывно-литой заготовки нейросетевыми методами

Задача оценки качества непрерывно-литой заготовки относится к задачам распознавания образов. Распознавание образов является одним из самых востребованных направлений современной информатики и имеет множество применений.

Образ, класс – классификационная группировка в системе классификации, объединяющая (выделяющая) определенную группу объектов по некоторому признаку.

Проблема носит комплексный иерархический характер и включает ряд основных этапов: восприятие поля зрения, сегментация, нормализация выделенных объектов, распознавание. Такой важный обязательный этап

как понимание (интерпретация) изображений включается частично в этап сегментации и окончательно решается на этапе распознавания.

Основным элементом любой задачи распознавания изображений является ответ на вопрос: относятся ли данные (входные) изображения к классу изображений, который представляет данный эталон? Казалось бы, ответ можно получить, сравнивая непосредственно изображение с эталонами (или их признаки). Однако возникает ряд трудностей и проблем, специфических, в особенности, при создании систем технического зрения (СТЗ):

- 1) изображения предъявляются на сложном фоне.
- 2) изображения эталона и входные изображения отличаются положением в поле зрения.
- 3) входные изображения не совпадают с эталонами за счет случайных помех.
- 4) отличия входных и эталонных изображений возникает за счет изменения освещенности, подсветки, локальных помех.
- 5) эталоны и изображения могут отличать геометрические преобразования, включая такие сложные как аффинные и проективные.

В качестве основы методов моделирования и прогнозирования качества непрерывно-литой заготовки принят автоматизированный анализ визуально-проявляющихся дефектов на ее поверхности. Для создания автоматизированной системы, обеспечивающей получение содержательного анализа и достоверного прогноза, были решены следующие задачи [46–49]:

- 1) разработка архитектуры нейронной сети;
- 2) разработка алгоритма обучения сети;
- 3) разработка алгоритма работы нейросетевого классификатора;
- 4) обеспечение инвариантности разрабатываемого классификатора к аффинным преобразованиям анализируемого изображения.

1.8.1 Сегментация данных

Перед распознаванием проводится предварительная обработка изображений. Полученные в ходе предварительной обработки изображения представляют собой очищенные от шума границы сосудов. Для проведения дальнейшего анализа необходимо разделить эти изображения на секции. В каждой секции будет проводиться поиск патологии, и ее классификация.

Для этого изображение (формата 512×512) делится на сегменты размером 64×64. Каждый такой сегмент будет независимо от других участвовать в дальнейшем анализе. Для того чтобы избежать потери важной информации, каждый следующий сегмент накладывается на предыдущие таким образом, что перекрывает половину стороны предыдущих сегментов.

При такой сегментации удается избежать потери таких данных, как дефект на стыке двух сегментов.

1.8.2 Метод моментов для выделения инвариантных к аффинным преобразованиям признаков

Моментные инварианты представляют собой множество нелинейных функций, инвариантных к сдвигу, повороту и масштабированию, определенных на геометрических моментах каждого фрагмента исходного изображения [48, 50].

Геометрические моменты порядка $(p + q)$ для функции яркости изображения $f(x, y)$ определяются по формуле:

$$M_{pq} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy,$$

где $p, q = 0, 1, 2, \dots, \infty$; x, y – координаты пикселя.

Так как на изображении функция яркости задана дискретно, интегралы в формулах упрощаются до сумм. Для сохранения устойчивости геометрических моментов к размеру изображения следует отобразить изобра-

жение размером $M \times N$ точек в диапазон $x \in [-1;+1]$, $y \in [-1;+1]$. После такого преобразования координатами x, y будут не целые значения, определяющие точку на изображении, а действительные числа. Таким образом, из формулы (1) получаем формулу для вычисления геометрического момента преобразованного изображения:

$$m_{pq} = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 x^p y^q f(x, y),$$

где $p, q = 0, 1, 2, \dots, \infty$; x, y – координаты пикселя; $f(x, y)$ – значение функции яркости изображения.

Исходя из этих формул, можно определить координаты «центра тяжести» изображения:

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}; \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}},$$

где $p, q = 0, 1, 2, \dots, \infty$; m_{pq} – геометрические моменты и, соответственно, центральные моменты порядка $(p + q)$:

$$\mu_{pq} = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y),$$

где $f(x, y)$ – значение функции яркости изображения; \bar{x}, \bar{y} – координаты пикселя.

Очевидно, центральный момент инвариантен к сдвигу, так как при сдвиге изображения, центр тяжести будет смещаться вместе с ним, а, следовательно, мы будем получать одинаковые значения признака. Однако необходимо, чтобы выделенные признаки были также инвариантны к повороту и масштабированию. Для этого нормализуем центральный момент следующим образом:

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^\gamma}, \quad \gamma = \frac{p + q}{2} - 1,$$

где $p, q = 0, 1, 2, \dots, \infty$; μ_{pq} – центральные моменты.

На основе этих моментов, комбинируя их, можно составлять неограниченное количество нелинейных функций, инвариантных к трем аффинным преобразованиям – сдвигу, повороту и масштабированию. Главным условием, накладываемым на множество функций, составленных из моментов и подающихся на вход сети-классификатора, является их взаимная некоррелированность.

Для определения достаточного количества признаков для разделения данных на описанные классы был разработан алгоритм, основанный на функционировании самоорганизующейся карты Кохонена. Алгоритм работы с этой сетью был модифицирован следующим образом (рисунок 1.29):

- 1) инициализация начального набора функций – инвариантных признаков;
- 2) расчет соответствующего набора признаков для обучающей выборки;
- 3) инициализация карты, то есть первоначальное задание векторов веса для узлов;
- 4) цикл (по всем изображениям обучающей выборки)
 - a) выбор следующего наблюдения (вектора из множества входных данных);
 - b) нахождение для него лучшей единицы соответствия (*BMU*) – узла на карте, вектор веса которого меньше всего отличается от наблюдения (в метрике, задаваемой аналитиком, чаще всего, евклидовой);
 - c) определение количества соседей *BMU* и обучение – изменение векторов веса *BMU* и его соседей с целью их приближения к наблюдению.
- 5) определение ошибки карты;
- 6) если удалось разделить пространство на интересующие классы, то конец, иначе:

- a) в набор функций – инвариантных признаков – добавляется новая функция, задающая инвариантный признак, и некоррелированная с другими функциями, содержащимися в наборе;
 - b) для обучающей выборки рассчитываются значения добавленного признака;
- 7) если вычислительная сложность расчета признаков, больше допустимой сложности, то
- a) конец;
 - b) иначе процесс продолжается с шага 3.

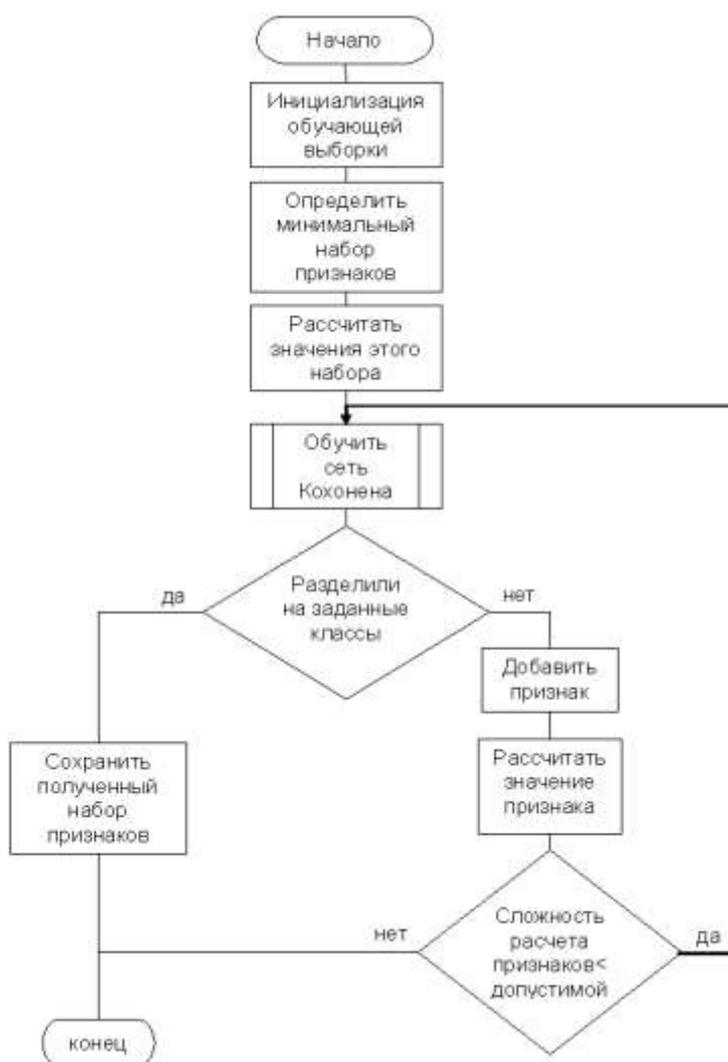


Рисунок 1.29 – Блок-схема алгоритма формирования необходимого и достаточного набора признаков

После того, как работа описанного алгоритма была завершена, эвристическим способом было установлено, что для удовлетворительной работы достаточно семи инвариантных признаков.

Эти признаки представляют собой нелинейные функции нормализованных центральных моментов, и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \eta_{20} + \eta_{02}, \\
 M_2 &= (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2, \\
 M_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} + \eta_{03})^2, \\
 M_4 &= (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2, \\
 M_5 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2 + \\
 &+ (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})^2 - 3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2, \\
 M_6 &= (\eta_{20} - \eta_{02})(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 + \\
 &+ 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}), \\
 M_7 &= (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2 - \\
 &- (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})^2 - 3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2.
 \end{aligned}$$

Инвариантность этих функций обоснована в [1.8.3].

На основе информации о необходимом и достаточном наборе инвариантных признаков можно было приступить к разработке классификатора.

1.8.3 Классификатор на основе нейронной сети

В литературе для решения задач классификации моментных признаков, как правило, используются многослойные нейронные сети с полными последовательными связями [51]. По причине того, что инвариантные признаки вычисляются методом моментов и этих моментов семь, для построения классификатора была выбрана многослойная нейронная сеть с полными последовательными связями с семью входами и десятью выходами, общий вид которой представлен на рисунке 1.30.

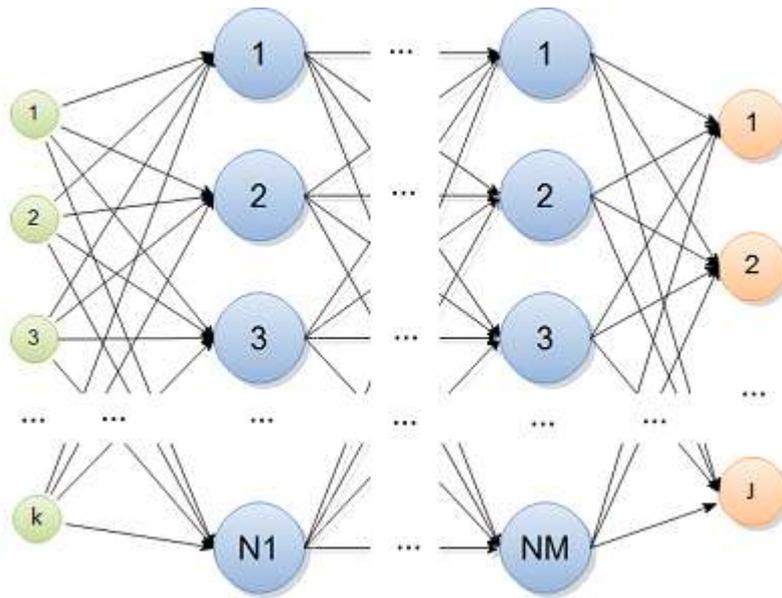


Рисунок 1.30 – Общий вид многослойной нейронной сети с полными последовательными связями, имеющей k входных нейронов, j выходных, M скрытых слоев по N_i нейронов в каждом.

Количество скрытых слоев определяется в процессе обучения сети. Самообучение сети производится методом обратного распространения ошибки и статистическим методом [46].

Алгоритм модификации структуры сети на основе метода коррекции ошибки

Эвристический алгоритм модификации структуры нейронной сети на основе коррекции ошибок в общем виде записывается так:

- 1) инициализируем минимально возможную сеть и инициализируем ее случайными весами;
- 2) производим обучение нейронной сети любым алгоритмом;
- 3) если ошибка фиксируется в окрестностях одного значения на нескольких шагах обучения, то
 - a) если ошибка менее допустимой погрешности – обучение завершено;
 - b) иначе, вычисляем суммарную ошибку для каждого слоя на основе алгоритма обратного распространения;

- с) если есть слой, ошибка которого отличается на порядок от ошибок других слоев, в него добавляется нейрон;
- д) если такого слоя нет, то между слоями с максимальной ошибкой вставляется новый слой, в котором количество нейронов равно среднему числу между количеством нейронов в слоях-соседях.

Комбинированный алгоритм обучения искусственной нейронной сети

Для обучения нейронной сети используется комбинированный подход. Итерации алгоритма обратного распространения ошибки заменяются на итерации статистического метода обучения в случае, если первый алгоритм зашел в локальный оптимум. Если и при этом ошибка не уменьшается, то применяется алгоритм модификации структуры нейронной сети на основе ошибки. Для каждого слоя определяется (методом обратного распространения) степень ошибки на нем, и в этот слой добавляется новый нейрон, после чего процесс обучения возобновляется. В случае, когда два находящихся рядом слоя имеют одинаковую степень ошибки, между ними вставляется дополнительный слой. Таким образом, обеспечивается выход сети из локального оптимума, хотя это и увеличивает время и затраты ресурсов на обучение.

Обучение сети продолжается до тех пор, пока ошибка сети не опустится ниже уровня в 5%.

1.8.4 Проектирование и разработка программного обеспечения

По разработанным алгоритмам предлагается создать модули для программного обеспечения, которые будут реализовать нейросетевую систему распознавания дефектов.

Программное обеспечение представляет собой набор модулей, которые выполняют ту или иную подзадачу.

Восемь модулей реализуют основную логику программы:

- 1) *binarisation* – модуль, реализующий бинаризацию изображения;

- 2) *gauss* – модуль, реализующий гауссово преобразование;
- 3) *geneticBase* – модуль поддержки генетических алгоритмов;
- 4) *geneticUse* – модуль оптимизации контрастности и яркости с помощью генетического алгоритма;
- 5) *segmentation* – модуль, реализующий сегментацию изображения;
- 6) *momentMethod* – модуль расчета инвариантных признаков изображения с использованием метода центральных, геометрических и нормальных моментов;
- 7) *neuroNetBase* – модуль, описывающий послойно-полносвязную нейронную сеть;
- 8) *neuroNetUsing* – модуль, обеспечивающий процесс обучения и функционирования нейронной сети.

Модули 1 – 5 используются для предварительной обработки изображения, а модули 6 – 8 для распознавания и классификации дефектов.

При помощи модуля *MomentMethod* из обработанного ранее изображения извлекается набор инвариантных признаков, который подается на вход нейронной сети, реализованной в модуле *NeuroNetBase*.

В модуле *NeuroNetBase* реализована работа сети с сигмоидной функцией активации.

В модуле *NeuroNetUsing* реализованы алгоритмы обучения нейронной сети, которые использовались при реструктуризации сети и вычислении весов нейронов. Также в нем реализован механизм быстрого вызова сети для анализа данных «на лету». Включение данного модуля в систему повышает модульность и независимость нейронной сети от конкретной задачи и обеспечивает возможность адаптации системы к другим задачам.

По результатам обучения, формируется файл *NeuroNet.dat*, который в последствии при работе программы загружается модулем *NeuroNetBase* и используется для решения задачи классификации.

Остальные модули, описанные в программе, реализуют логику загрузки данных, логику работы пользовательского интерфейса, обработку ошибок, отображения длительных операций, сохранения изображений в отдельный файл.

Для реализации работы нейронной сети, её обучения и использование были описан ряд структур данных и типов.

Нейронная сеть описана двумерным массивом из записей. Для того чтобы задать, таким образом, сеть, были описаны типы, представленные ниже.

```
TActiveFunction = function (X:Extended):Extended; //тип, функция активации;
TVector = array of Extended; // вектор из чисел с плавающей точкой;
TSinapses = TVector; //выходной синапс сети;

TNeuron = record //структура, описывающая один нейрон
  AksonValue : Extended; //значение аксона
  Summ : Extended; //сумма на нейроне
  ActivationFunc : TActiveFunction; //функция активации
  Limit : Extended; //пороговое значение
  Sinapses : TSinapses; //выходные синапсы
  SummError : Extended; //ошибка на нейроне
end;
TLayer = array of TNeuron; //слой, одномерный массив из нейронов
TNeuroData = array of TLayer; //сеть, массив из слоев
```

В модуле *NeuroNetBase* логика работы многослойной нейронной сети с полными последовательными связями реализуется средствами описания класса *TNeuroNet*. Описание данного класса приведено ниже.

```
TNeuroNet = class
private
  FLayerCount: integer; //количество слоев
  FNeuronCountByLayer : array of integer; //количество нейронов в каждом слое
  FNeuroData : TNeuroData; //нейронная сеть (массив из структур)
  FSource : TVector; //входной вектор
  function GetLayers(index: integer): TLayer;
  procedure SetLayerCount(const Value: integer);
  procedure Realloc;
  function GetSources(index: integer): Extended;
  procedure SetSources(index: integer; const Value: Extended);
  function GetResults(index: integer): Extended;
public
  constructor LoadFromFileText(FileName:AnsiString);
  constructor LoadFromFileBinary(FileName:AnsiString);
  procedure SaveToFileText(FileName:AnsiString);
  procedure SaveToFileBinary(FileName:AnsiString);
  procedure SetSourceVector(Vec:TVector);
  procedure Evaluate;
  function TrainTeacher(Src, Valid:TVector):Extended;
```

```

procedure TrainTeacherExpoNet(Src,Valid:TVector; CreateNeurons:Boolean=false);
function StatisticTrain(Src,Valid:TVector):Extended;
property LayerCount : integer read FLayerCount;
property Layers[index:integer] : TLayer read GetLayers;
property Sources[index:integer] : Extended read GetSources write SetSources;
property Results[index:integer] : Extended read GetResults;
end;

```

В данном классе описано два конструктора, которые инициализируют сеть как из текстового файла, так и из бинарного, это *LoadFromFileText* и *LoadFromFileBinary*. Сеть может создаваться только на основе файла (возможно пустого), во избежание возможных потерь данных в ходе обучения и эксплуатации.

Методы *SaveToFileText* и *SaveToFileBinary*, реализуют сохранение сети в текстовый и в бинарный файл соответственно.

Процедура *SetSourceVector* устанавливает переданный ей вектор в качестве значений аксонов входного слоя, подаваемых на сеть.

В метод *Evaluate* реализует непосредственно один цикл распространения сигнала по сети. Так же по окончании вычисления результатов работы, метод вычисляет степень уверенности сети в правильности принятого решения.

В классе реализована возможность доступа к отдельным слоям сети, а, следовательно, и нейронам. Доступ к ним разрешен только для чтения, что осуществляется за счет применения «свойств» (*property*) классов. Кроме описанного выше свойства *Layers*, предоставляющего доступ к слоям сети, класс дает интерфейс для чтения результатов работы сети (значений аксонов выходного слоя, свойство *Results*), чтения информации о количестве слоев – *LayerCount*, а также чтения и безопасной записи значений аксонов входного слоя – свойство *Sources*.

Обучение нейронной сети ведется комбинированным алгоритмом обучения, (процедура *Train*, модуль *NeuroNetUsing*) состоит из последовательного обучения тремя алгоритмами: алгоритмом обратного распространения ошибки, статистическим алгоритмом и алгоритмом модификации

сети. Для удобной реализации и последующей оптимизации обучения, в классе *TNeuroNet* описаны методы *TrainTeacher*, *StatisticTrain*, *TrainTeacherExpoNet*, в которых реализованы соответственно перечисленные ранее алгоритмы.

1.8.5 Оценка полученных результатов

Таким образом, в результате проделанной работы:

- 1) разработан эвристический алгоритм выделения признаков визуальных объектов, инвариантных к аффинным преобразованиям;
- 2) определена достаточная для классификации совокупность инвариантных признаков;
- 3) определена структура искусственной нейронной сети для решения задачи классификации;
- 4) выбран алгоритм обучения искусственной нейронной сети для решения задачи классификации дефектов;
- 5) разработаны алгоритмы имитационного моделирования и прогнозирования качества непрерывно-литой заготовки на основе нейросетевой мета-эвристики.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок

В отчете [52] в §4.3.4 – §4.3.6 разработана математическая модель теплового состояния заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ. В данном разделе рассматриваются алгоритмы и численные методы, с помощью которых создается компьютерная программа. Проверяется адекватность созданной математической модели и проводится оценка эффективности полученных результатов с современным научно-техническим уровнем.

2.1.1 Систематизация и оценка полученных результатов

2.1.1.1 Численная реализация квазиравновесной модели затвердевания слитка

Вследствие нелинейности уравнения теплопроводности точное аналитическое решение краевой задачи невозможно. В связи с этим воспользуемся методом конечных разностей для получения приближенного решения с помощью ЭВМ.

Запишем уравнение теплопроводности в дифференциальном виде, введя обозначения для дифференциальных операторов:

$$L_x(T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2.1)$$

$$L_y(T) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (2.2)$$

Получим

$$\rho C_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = L_x(T) + L_y(T). \quad (2.3)$$

Наложим на расчетную область регулярную сетку с координатами узлов (x_i, y_j) :

$$x_i = (i-1) \cdot \Delta x \quad (i = 1, 2, \dots, N_1; \Delta x = \frac{a}{N_1-1}),$$

$$y_j = (j-1) \cdot \Delta y \quad (j = 1, 2, \dots, N_2; \Delta y = \frac{b}{N_2-1}),$$

где $\Delta x, \Delta y$ – шаги между узлами сетки вдоль осей x и y ; N_1, N_2 – число узлов сетки по оси x и y соответственно (рисунок 2.1).

Непрерывное течение процесса во времени разделим условно на дискретные интервалы величиной $\Delta \tau$. Тогда время на k -м слое сетки составит

$$\tau^k = (k-1) \cdot \Delta \tau \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Значение температуры в узле (x_i, y_j) в момент времени τ^k обозначим при помощи индексов $T(x_i, y_j, \tau^k) = T_{i,j}^k$.

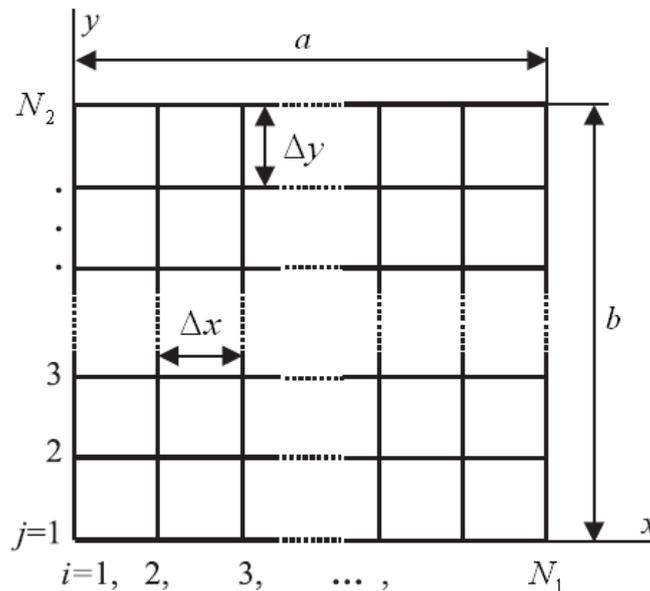


Рисунок 2.1 – Расчетная область с наложенной на нее сеткой

Дифференциальные операторы L_x и L_y аппроксимируем соответственно разностными операторами Λ_x и Λ_y как предложено в работе [53]:

$$\Lambda_x(T) \approx \frac{\lambda_{i,j}}{\Delta x^2} \left(\rho_{i-1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i+1,j}^k + \frac{\lambda_{i-1,j} - \lambda_{i+1,j}}{4\lambda_{i,j}} (\rho_{i-1,j}^k - T_{i+1,j}^k) \right),$$

$$\Lambda_y(T) \approx \frac{\lambda_{i,j}}{\Delta y^2} \left(\rho_{i,j-1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j+1}^k + \frac{\lambda_{i,j-1} - \lambda_{i,j+1}}{4\lambda_{i,j}} (\rho_{i,j-1}^k - T_{i,j+1}^k) \right).$$

Производную $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ в узле (x_i, y_j) в момент времени τ^k аппроксимируем с помощью формулы правосторонней разности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \approx \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau}.$$

Применим явную схему аппроксимации. В итоге получаем из уравнения (2.3) конечно-разностное соотношение:

$$\rho_{i,j}^k \mathbf{C}_{\text{эф}}^k \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau^k} = \Lambda_x(T^k) + \Lambda_y(T^k). \quad (2.4)$$

Выразим из соотношения (2.32) значение $T_{i,j}^{k+1}$:

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{\Delta \tau^k}{\rho_{i,j}^k \mathbf{C}_{\text{эф}}^k} (\Lambda_x(T^k) + \Lambda_y(T^k)). \quad (2.5)$$

Заметим, что $\left(\frac{\lambda}{\rho \mathbf{C}_{\text{эф}}}\right)_{i,j}^k$ представляет из себя коэффициент теплопроводности $a_{i,j}^k = \left(\frac{\lambda}{\rho \mathbf{C}_{\text{эф}}}\right)_{i,j}^k$, поэтому перепишем соотношение (2.5) как

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{a_{i,j}^k \Delta \tau^k}{\lambda_{i,j}^k} (\Lambda_x(T^k) + \Lambda_y(T^k)), \quad (2.6)$$

или в развернутом виде

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + Fo_x^k \left(\rho_{i-1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i+1,j}^k + \frac{\lambda_{i-1,j}^k - \lambda_{i+1,j}^k}{4\lambda_{i,j}^k} (\rho_{i-1,j}^k - T_{i+1,j}^k) \right) +$$

$$+ Fo_y^k \left(T_{i,j-1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j+1}^k + \frac{\lambda_{i,j-1}^k - \lambda_{i,j+1}^k}{4\lambda_{i,j}^k} (T_{i,j-1}^k - T_{i,j+1}^k) \right), \quad (2.7)$$

где $Fo_x^k = \frac{a_{i,j}^k \Delta \tau^k}{\Delta x^2}$, $Fo_y^k = \frac{a_{i,j}^k \Delta \tau^k}{\Delta y^2}$ – числа Фурье, характеризующие безразмерное время процесса.

Соотношение (2.7) позволяет определить температуру во всех узлах сеточной области, кроме пограничных, на $(k+1)$ -м временном слое по значениям температуры в соседних узлах на k -м временном слое (рисунке 2.2). Для пограничных узлов сетки температура рассчитывается в соответствии с крайевыми условиями.

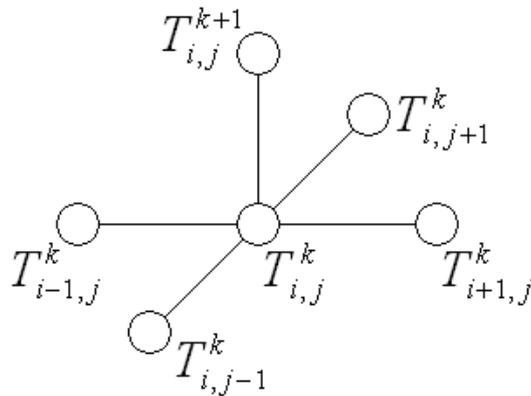


Рисунок. 2.2 – Сеточный шаблон явной разностной схемы

При расчетах временной шаг $\Delta \tau^k$ подбирают таким образом, чтобы выполнялось условие устойчивости счета для явной разностной схемы [54]:

$$\Delta \tau^k \leq \min(\Delta \tau_x, \Delta \tau_y), \quad (2.8)$$

где $\Delta \tau_x = \Delta x^2 / 4a_{\max}^k$, $\Delta \tau_y = \Delta y^2 / 4a_{\max}^k$, a_{\max}^k – максимальное значение коэффициента температуропроводности в узлах сеточной области на k -м временном слое.

Условие (2.8) показывает, что для обеспечения минимальной погрешности аппроксимации уравнения теплопроводности сгущение про-

странственной сетки в 2, 3, 4 раза должно вызывать соответствующее сгущение временной сетки в 4, 9, 16 раз.

Явная схема проста и позволила в короткий срок составить и отладить программу расчета на компьютере. Однако в ходе работы такая программа показала низкую эффективность в связи с тем, что жесткое условие устойчивости этой схемы накладывает ограничения на величину шага по времени, что приводит к неоправданному увеличению объема вычислений.

В связи с этим была применена неявная схема аппроксимации.

Для реализации расщепления наряду со значениями искомой функции $T_{i,j}^k$ и $T_{i,j}^{k+1}$, соответствующим моментам времени τ^k и τ^{k+1} , рассмотрим некоторые промежуточные ее значения $\bar{T}_{i,j}$ на фиктивном полуцелом временном слое $(k + \frac{1}{2})$. Для вычисления функции $T_{i,j}^{k+1}$ построим следующую разностную схему:

$$\rho_{i,j}^k \mathbf{C}_{\text{эф}}^k \bar{T}_{i,j} - \frac{\bar{T}_{i,j} - T_{i,j}^k}{0,5\Delta\tau^k} = \Lambda_x(\bar{T}) + \Lambda_y(T^k), \quad (2.9)$$

$$\rho_{i,j}^k \mathbf{C}_{\text{эф}}^k T_{i,j}^{k+1} - \frac{T_{i,j}^{k+1} - \bar{T}_{i,j}}{0,5\Delta\tau^k} = \Lambda_x(\bar{T}) + \Lambda_y(T^{k+1}). \quad (2.10)$$

Здесь переход от k -го временного слоя к $(k+1)$ осуществляется в два этапа. Сначала вычисляются промежуточные значения искомой функции $\bar{T}_{i,j}$, а затем определяются $T_{i,j}^{k+1}$. При этом уравнение (2.9) неявно по x и явно по y , а уравнение (2.10), наоборот, явно по x и неявно по y .

Описанная схема расщепления называется продольно-поперечной прогонкой [52]. Уравнения (2.9) и (2.10) можно переписать, поместив искомые значения в левую, а известные в правую часть

$$\bar{T}_{i,j} - \frac{0,5\Delta\tau^k}{\rho_{i,j}^k \mathbf{C}_{\text{эф}}^k} \Lambda_x(\bar{T}) = T_{i,j}^k + \frac{0,5\Delta\tau^k}{\rho_{i,j}^k \mathbf{C}_{\text{эф}}^k} \Lambda_y(T^k), \quad (2.11)$$

$$T_{i,j}^{k+1} - \frac{0,5\Delta\tau^k}{\rho_{i,j}^k C_{\text{эф}}^k} \Lambda_y(T^{k+1}) = \bar{T}_{i,j} + \frac{0,5\Delta\tau^k}{\rho_{i,j}^k C_{\text{эф}}^k} \Lambda_x(\bar{T}). \quad (2.12)$$

Заменив $\left(\frac{\lambda}{\rho C_{\text{эф}}}\right)_{i,j}^k$ на эффективный коэффициент температуропроводности $a_{i,j}^k$, перепишем соотношения (2.11) и (2.12) в развернутом виде:

$$\bar{T}_{i,j} - \frac{\Delta\tau^k a_{i,j}^k}{2\Delta x^2} \left(\bar{T}_{i-1,j} - 2\bar{T}_{i,j} + \bar{T}_{i+1,j} + \frac{\lambda_{i-1,j}^k - \lambda_{i+1,j}^k}{4\lambda_{i,j}^k} (\bar{T}_{i-1,j} - \bar{T}_{i+1,j}) \right) = \bar{F}_{i,j}, \quad (2.13)$$

$$T_{i,j}^{k+1} - \frac{\Delta\tau^k a_{i,j}^k}{2\Delta y^2} \left(T_{i,j-1}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i,j+1}^{k+1} + \frac{\lambda_{i,j-1}^k - \lambda_{i,j+1}^k}{4\lambda_{i,j}^k} (T_{i,j-1}^{k+1} - T_{i,j+1}^{k+1}) \right) = F_{i,j}^k, \quad (2.14)$$

где

$$\bar{F}_{i,j} = T_{i,j}^k + \frac{\Delta\tau^k a_{i,j}^k}{2\Delta y^2} \left(T_{i,j-1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j+1}^k + \frac{\lambda_{i,j-1}^k - \lambda_{i,j+1}^k}{4\lambda_{i,j}^k} (T_{i,j-1}^k - T_{i,j+1}^k) \right); \quad (2.15)$$

$$F_{i,j}^k = \bar{T}_{i,j} + \frac{\Delta\tau^k a_{i,j}^k}{2\Delta x^2} \left(\bar{T}_{i-1,j} - 2\bar{T}_{i,j} + \bar{T}_{i+1,j} + \frac{\lambda_{i-1,j}^k - \lambda_{i+1,j}^k}{4\lambda_{i,j}^k} (\bar{T}_{i-1,j} - \bar{T}_{i+1,j}) \right). \quad (2.16)$$

В результате для всех внутренних точек соотношения (2.17), (2.18) образуют две системы линейных алгебраических уравнений:

$$\bar{A}_{i,j} \bar{T}_{i-1,j} + \bar{B}_{i,j} \bar{T}_{i,j} + \bar{C}_{i,j} \bar{T}_{i+1,j} = \bar{F}_{i,j}, \quad (2.17)$$

$$A_{i,j}^k T_{i,j-1}^{k+1} + B_{i,j}^k T_{i,j}^{k+1} + C_{i,j}^k T_{i,j+1}^{k+1} = F_{i,j}^k, \quad (2.18)$$

где $\bar{A}_{i,j} = -\frac{\Delta\tau^k a_{i,j}^k}{2\Delta x^2} \left(1 + \frac{\lambda_{i-1,j}^k - \lambda_{i+1,j}^k}{4\lambda_{i,j}^k} \right)$; $\bar{B}_{i,j} = 1 + \frac{\Delta\tau^k a_{i,j}^k}{\Delta x^2}$;

$$\bar{C}_{i,j} = -\frac{\Delta\tau^k a_{i,j}^k}{2\Delta x^2} \left(1 - \frac{\lambda_{i-1,j}^k - \lambda_{i+1,j}^k}{4\lambda_{i,j}^k} \right); \quad A_{i,j}^k = -\frac{\Delta\tau^k a_{i,j}^k}{2\Delta y^2} \left(1 + \frac{\lambda_{i,j-1}^k - \lambda_{i,j+1}^k}{4\lambda_{i,j}^k} \right);$$

$$B_{i,j}^k = 1 + \frac{\Delta\tau^k a_{i,j}^k}{\Delta y^2}; \quad C_{i,j}^k = -\frac{\Delta\tau^k a_{i,j}^k}{2\Delta y^2} \left(1 - \frac{\lambda_{i,j-1}^k - \lambda_{i,j+1}^k}{4\lambda_{i,j}^k} \right).$$

Если известны значения $T_{i,j}^k$, то можно вычислить $\bar{F}_{i,j}$. Зафиксировав $j=1$, с помощью метода прогонки решаем задачу (2.17) и определяем все $\bar{T}_{i,1}$. Далее для $j=2$ находим все $\bar{T}_{i,2}$ и т.д. до тех пор, пока не вычислим $\bar{T}_{i,j}$ во всех узлах сетки. После решения задачи (2.17) можно последовательно таким же образом решить задачу (2.18).

2.1.2 Численный расчет средней температуры боковой грани

При расчете усадки слитка требуется знание средней температуры затвердевшей части боковой грани, которая в общем случае рассчитывается по формуле (2.24). Применение конечно-разностного метода позволяет рассчитать среднеинтегральную температуру как среднее значение температур во всех узлах сетки, которые принадлежат затвердевшей части боковой грани

$$\bar{T} \approx \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{i,j},$$

где n – число узлов сетки вдоль боковой грани; m – число слоев сетки, составляющих твердую корку (рисунке 2.3).

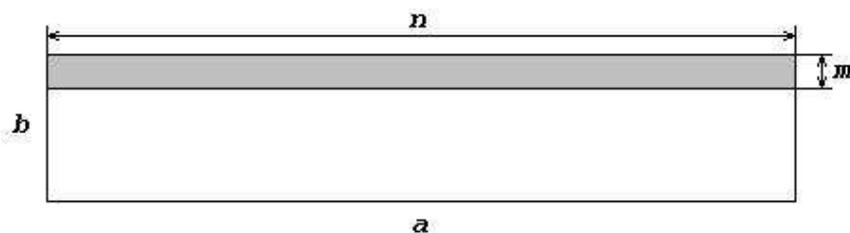


Рисунок. 2.3 – Расчет средней температуры боковой грани

2.1.2 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей

По данной математической модели на языке программирования C++ была создана программа «*Моделирование теплового состояния слэба в кристаллизаторе МНЛЗ*». Созданный программный продукт позволяет варьировать многие технологические параметры процесса непрерывной разливки и исследовать, как влияют выбранные значения на распределение

температуры и процесс усадки заготовки. В созданной программе были реализованы следующие основные модули:

- Model (основной модуль программы, хранит всю информацию о модели и выполняет расчеты);
- MainWindow (модуль главного окна программы, реализует графический интерфейс пользователя);
- GraphPlot (отвечает за построение графиков);
- SpectrogramPlot (занимается построением спектрограмм);
- Approximation (реализует метод наименьших квадратов для аппроксимации данных полиномом 2 степени);
- SteelGrade (марочник сталей, позволяет задать теплофизические и химические свойства марок сталей);
- ModelParameters (служит для задания параметров заготовки, литья, расчета).

Схема функционирования модулей показана на рисунке 2.4.

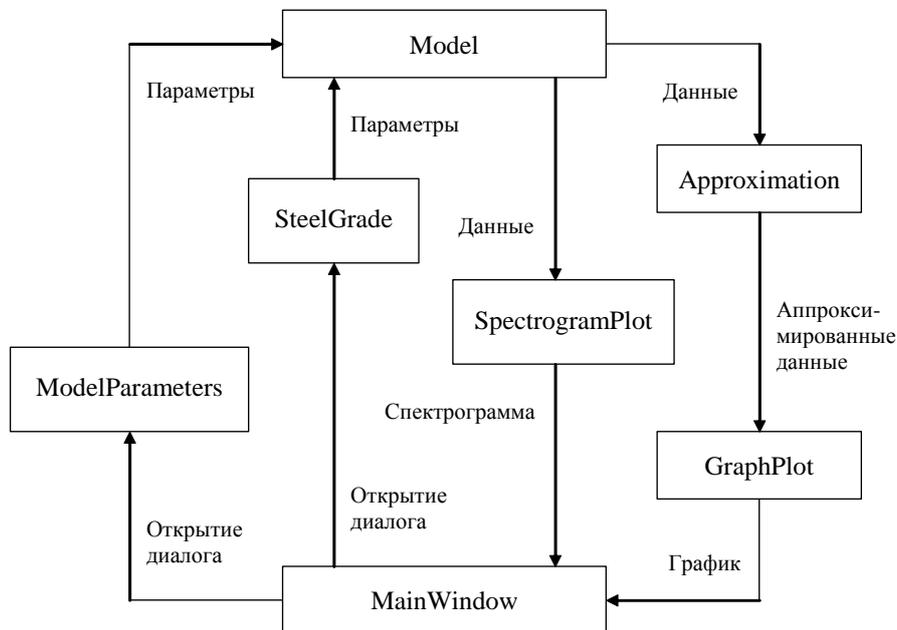


Рисунок. 2.4 – Схема функционирования основных модулей программы

В результате численного решения задачи теплопроводности определяется поле температур в поперечном сечении слитка, то есть температуры

в каждом из расчетных узлов сетки. Определяется расположение границ двухфазной зоны, рассчитывается средняя температура затвердевших частей боковых граней в различные моменты времени, соответствующие перемещению контрольного сечения слитка вдоль продольной оси кристаллизатора.

Исходными данными для моделирования процессов затвердевания и усадки непрерывнолитой заготовки являются:

- ширина a и толщина b заготовки, мм;
- высота кристаллизатора h , мм;
- химический состав стали (процентное содержание C, Si, Mn, \dots);
- температуры ликвидуса и солидуса ($T_{лик}, T_{сол}$), °C;
- плотность стали ρ , кг/м³;
- удельная теплота кристаллизации L , кДж/кг;
- скорость вытяжки v , м/мин;
- начальная температура расплава T_0 , °C;
- коэффициенты теплопроводности жидкой и твердой фазы ($\lambda_{ж}, \lambda_{тв}$), Вт/(м·К);
- удельная теплоемкость стали c , Дж/(кг·К).

Результаты теплофизических расчетов позволяют получить следующие параметры:

- поле температур в поперечном сечении слитка при выходе из кристаллизатора;
- температура любой точки слитка во все моменты времени его пребывания в кристаллизаторе;
- толщина твердой корочки в каждом сечении заготовки;
- ширина жидкой лунки в каждом сечении заготовки;
- ширина двухфазной области в каждом сечении заготовки;

- средняя температура затвердевших частей боковых граней во время движения слитка в полости кристаллизатора;
- величина усадки слитка по широкой и узкой грани на всех горизонтах кристаллизатора.

Вывод полученных в ходе расчетов результатов может осуществляться следующими способами:

- цветовые диаграммы распределения температуры с выделением области двухфазной зоны в поперечном и продольном сечениях заготовки;
- графики распределения исследуемых параметров (температуры, толщины твердой корочки и усадки слитка) в продольном и поперечном направлениях;
- таблицы – дублируют информацию, представленную на графиках.

Программный продукт позволяет варьировать многие технологические параметры процесса непрерывной разливки и исследовать, как влияют выбранные значения на распределение температуры и процесс усадки заготовки.

2.1.3 Сопоставление созданной математической модели с известными данными

В работе [55] приведены результаты моделирования на компьютере с использованием программы «Кристаллизатор» фирмы «Уралмаш – МО». На рисунке 2.5 приведено изменение толщины корки, и температуры середины широкой грани сляба для четырех различных сталей, теплофизические свойства которых приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Теплофизические свойства стали

Марка стали	Температура солидуса, °С	Температура ликвидуса, °С	Скрытая теп- лота плавле- ния, кДж/кг	Плотность жид- кой стали, кг/м
Ст. 3	1469	1509	268	7060
14ГС	1468	1508	268	7205
Трансформаторная	1434	1500	268	7200
9ХФ	1315	1457	268	7205

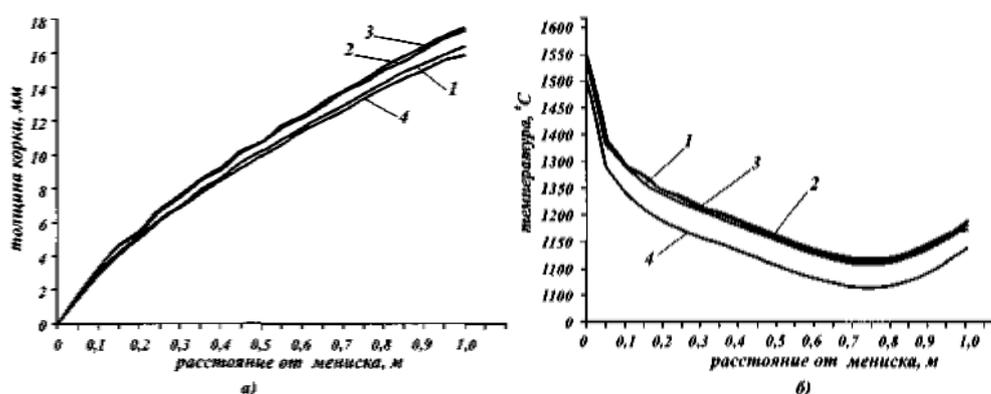


Рисунок. 2.5 – Изменение толщины корки (а) и температуры (б) середины широкой грани сляба толщиной 250 мм при литье сталей разного марочного сортамента с температурой перегрева 40°С со скоростью литья 1,2 м/мин: 1 – трансформаторная сталь; 2 – Ст 3; 3 – сталь 14ГС; 4 – сталь 9ХФ [54]

На рисунках 2.6 и 2.7 приведены результаты расчетов при тех же параметрах для стали Ст3 с помощью созданной программы «Моделирование усадки сляба в кристаллизаторе МНЛЗ». Данные отличаются не более чем на 5%, и это дает право считать созданную модель адекватной для расчета тепловых явлений в затвердевающей заготовке в кристаллизаторе.

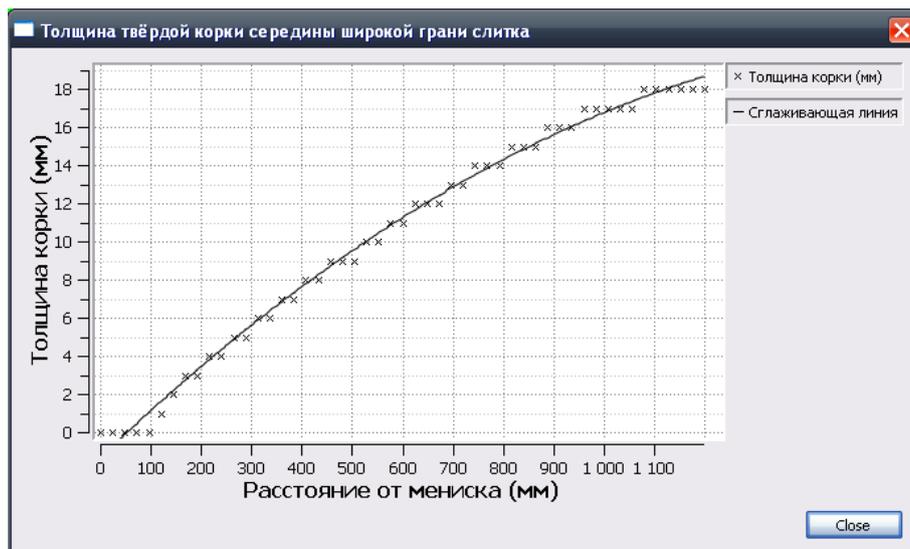


Рисунок. 2.6 – Расчетное изменение толщины корки широкой грани сляба при литье стали Ст 3 с температурой перегрева 40°C со скоростью литья $1,2 \text{ м/мин}$

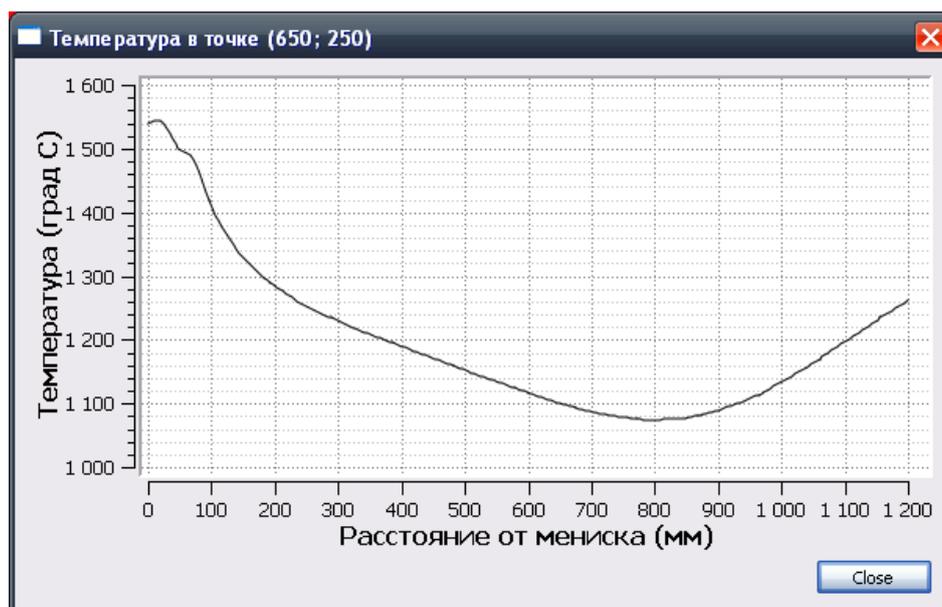


Рисунок. 2.7 – Расчетное изменение температуры середины широкой грани сляба при литье стали Ст 3 с температурой перегрева 40°C со скоростью литья $1,2 \text{ м/мин}$

Следует отметить, что в нижней части кристаллизатора имеет место разогрев поверхности непрерывнолитой заготовки. Это может быть обусловлено неплотным прилеганием сформировавшейся корки слитка к поверхности стенок. Такое явление отмечают и авторы [55], констатирующие

интенсивное понижение температуры на участке 0 – 0,2 м от мениска, относительную стабилизацию температуры на участке 0,2 – 0,8 м и ее повышение на участке от 0,8 м до конца кристаллизатора на 60 – 100°C. При этом температура на поверхности слитка составляет 1150 – 1210°C, что хорошо коррелируется с результатами расчетов фирмы «Уралмаш – МО».

2.1.4 Результаты моделирования

Проведено численное исследование для сляба из стали марки 09Г2С ($T_{\text{сол}}=1491^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{лик}}=1509^{\circ}\text{C}$), $v=0,7$ м/мин, высоте кристаллизатора $H=1200$ мм, $T_0=1540^{\circ}\text{C}$, ширина и толщина заготовки 1300 мм и 250 мм соответственно.

Для рассмотренных технологических условий на рисунке 2.8 показано, как меняется толщина твердой корочки по высоте кристаллизатора на узкой и широкой стенках слитка. Полученная зависимость толщины корочки h_k от времени аппроксимируется уравнением регрессии

$$h_k = 3,457\sqrt{\tau} - 11,581, \text{ мм}, R^2=0,997,$$

то есть хорошо подчиняется закону квадратного корня. Используя это уравнение, можно определить, что корочка начинает формироваться на расстоянии примерно 200 мм от лунки. Значение расчетной толщины твердой корки слитка на выходе из кристаллизатора хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными на кристаллизаторах МНЛЗ № 2 и №4 ОАО «ММК».

Проведено моделирование теплового состояния слитка в его поперечном сечении на выходе из кристаллизатора (рисунок 2.9, а) и в продольном разрезе слитка в середине широкой и узкой граней (рисунки 2.9, б, в).

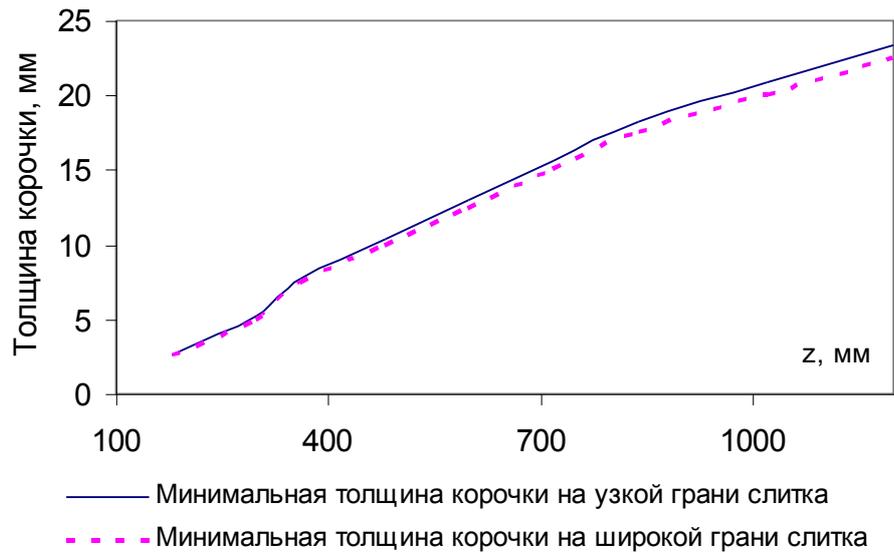


Рисунок. 2.8 – Изменение толщины твердой корочки при формировании слитка в кристаллизаторе

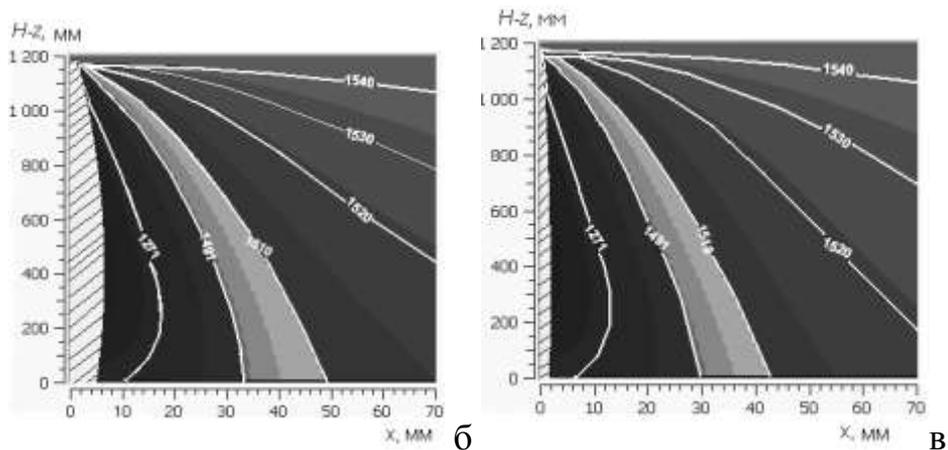
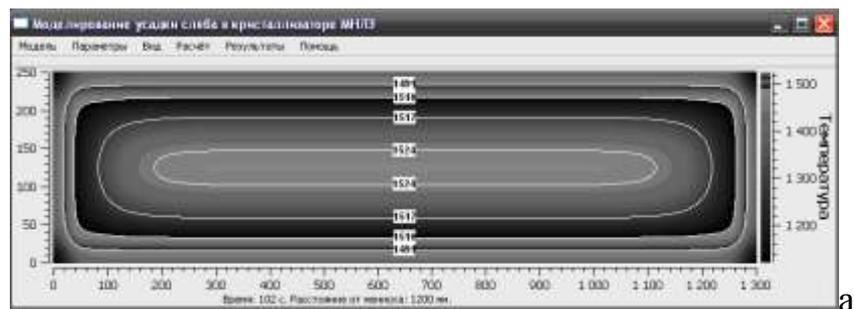


Рисунок 2.9 – Результаты моделирования температурного поля: а – в поперечном разрезе слитка на выходе из кристаллизатора ($\tau = 102,9$ с); б – в продольном разрезе слитка вдоль середины узкой грани; в – в продольном разрезе слитка вдоль середины широкой грани

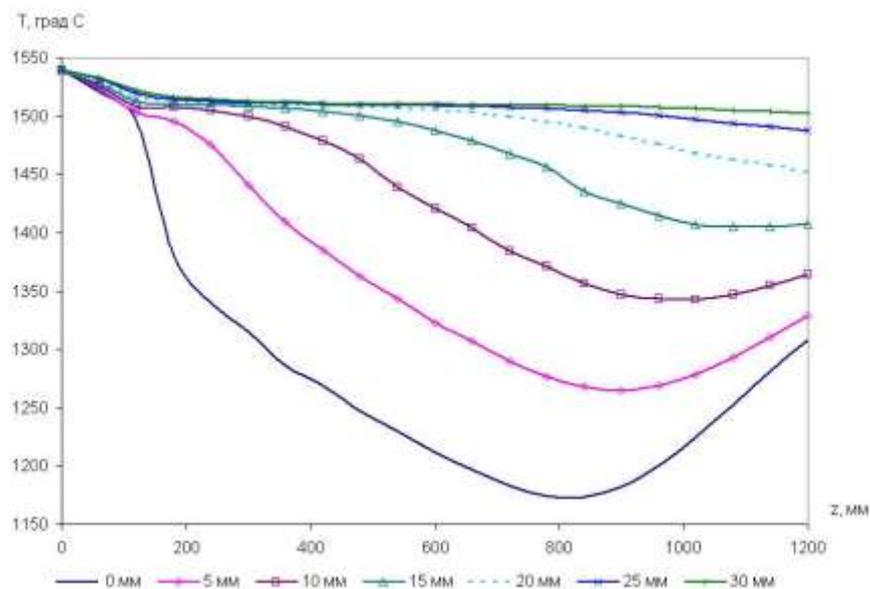


Рисунок 2.10 – Распределение температуры затвердевающего сляба на середине его широкой грани по высоте кристаллизатора на разных расстояниях от поверхности слитка

Следует отметить, что в нижней части кристаллизатора имеет место разогрев сформировавшейся корочки непрерывно-литой заготовки (рисунок 2.10). Это может быть обусловлено снижением теплового потока из-за неплотного прилегания сформировавшейся корки слитка к поверхности стенок. Такое явление отмечают и авторы [55], констатирующие интенсивное понижение температуры поверхности слитка на участке 0 – 0,2 м от мениска, относительную стабилизацию температуры на участке 0,2 – 0,8 м и ее повышение на участке от 0,8 м до конца кристаллизатора на 60 – 100°C.

2.1.5 Рекомендации по использованию результатов проведенных НИР в технологии непрерывной разливки стали

Разработана математическая модель и компьютерная программа, позволяющая анализировать затвердевание слитка прямоугольного сечения в слябовой МНЛЗ при заданных технологических параметрах разливки.

Результаты работы могут быть использованы организациями, занимающимися проектированием и разработкой технологических режимов непрерывной разливки стали и модернизацией конструкций слябовых кристаллизаторов МНЛЗ.

2.1.6 Рекомендации по использованию результатов НИР при создании научно-образовательных курсов

Созданная компьютерная программа и результаты данного исследования могут быть использованы в учебно-образовательной деятельности студентов по направлениям 230100 – «Информатика и вычислительная техника» и 150100 – «Металлургия», а также аспирантов по специальностям 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

2.2 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования электровихревых течений в токонесущих расплавах металлургических агрегатов

2.2.1 Систематизация и оценка полученных результатов

В отчете [52] в п. 4.2.8 разработана математическая модель конвективного электровихревого (ЭВТ) расплава в осесимметричной ванне ДППТ. В данном разделе рассматриваются алгоритмы и численные методы, с помощью которых создается компьютерная программа. Проверяется адекватность созданной математической модели и проводится оценка эффективности полученных результатов с современным научно-техническим уровнем.

2.2.1.1 Численная и компьютерная реализации математической модели

При численном исследовании стационарных задач конвективного течения и теплообмена довольно широко применяется псевдостационарный метод. Решение стационарной задачи рассматривается как предел, к которому стремится решение соответствующей нестационарной задачи при $\tau \rightarrow \infty$. Сам процесс перехода в стационарный режим интереса не представляет.

Благодаря такому подходу, разностные схемы, используемые для решения нестационарной (ω, ψ) – системы, можно применять для решения стационарных задач, рассматривая при этом τ как итерационный параметр. При этом вычислительный алгоритм решения существенно упрощается.

2.2.1.2 Численное решение уравнения для функции тока

Займемся вначале приближенным решением уравнения для функции тока.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = -\omega r \quad (2.19)$$

На область ванны наложим регулярную по пространственным переменным разностную сетку с координатами узлов

$$r_i = i\Delta r, \quad z_j = j\Delta z, \quad \tau^k = \tau^{k-1} + \Delta \tau,$$

где $j=0, 1, 2, \dots, N_z, i=0, 1, 2, \dots, I_{\text{бок}}(j), k=0, 1, 2, \dots, \tau_k / \Delta \tau, \tau_k$ — конечное время для нестационарной задачи.

Функции ψ и ω заменим на их сеточные аналоги $\psi_{i,j}^k$ и $\omega_{i,j}^k$. Будем использовать разностную схему, основанную на симметричной аппроксимации частных производных:

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} \approx \frac{\psi_{i+1,j}^k - \psi_{i-1,j}^k}{2\Delta r}; \quad \frac{\partial \psi}{\partial z} \approx \frac{\psi_{i,j+1}^k - \psi_{i,j-1}^k}{2\Delta z}.$$

Для решения уравнения (2.19) использовался итерационный метод Зейделя в сочетании с последовательной верхней релаксацией. Как показано в работах [56, 57], его важное преимущество для решения подобных задач состоит в том, что для своей программной реализации он требует минимального объема машинной памяти.

Для прямоугольной сетки ($\Delta r \neq \Delta z$) разностная схема имеет следующий вид:

$$\psi_{i,j}^{s+1} = (1 - \gamma_0)\psi_{i,j}^s + \frac{\gamma_0}{2(m+1)} \left[m\psi_{i,j+1}^s + m\psi_{i,j-1}^{s+1} + \psi_{i+1,j}^s \left(1 - \frac{1}{2i}\right) + \psi_{i-1,j}^{s+1} \left(1 + \frac{1}{2i}\right) + \omega_{i,j}^{k+1} r_i \Delta r^2 \right], \quad (2.20)$$

где $m = (\Delta r / \Delta z)^2$, s – номер итерации, γ_0 – релаксационный параметр.

Итерационный процесс прекращается при выполнении условия

$$\frac{\max_{i,j} |\psi_{i,j}^{s+1} - \psi_{i,j}^s|}{\max_{i,j} |\psi_{i,j}^{s+1}|} \leq \varepsilon_\Psi, \quad (2.21)$$

где ε_Ψ – заданная относительная точность поиска функции ψ .

Величина релаксационного параметра γ_0 изменяется в интервале $1 < \gamma_0 < 2$. Оптимальную величину γ_0 с точки зрения сходимости можно определить так же, как и при решении уравнения Лапласа.

Если за 250 итераций итерационный процесс не сошелся, то параметр релаксации γ_0 , как предлагается в работе [56], корректируем следующим образом

$$\gamma_0^{(2)} = \frac{2}{3} \left(1 + \gamma_0 \right).$$

При постановке нестационарной задачи, когда точное решение необходимо получить для всего временного интервала, на каждом временном слое уравнение необходимо решать с постоянно заданной точностью ε_Ψ . Величина ε_Ψ задается в соответствии с точностью, с которой вычисляются функция ω и другие функции, например, температура, концентрация.

При постановке стационарной задачи процесс установления режима не представляет интереса, и важно, чтобы заданную точность ε_ψ имело лишь стационарное решение. В этом случае задавать величину точности ε_ψ устанавливалась в соответствии с точностью, достигнутой к данному моменту функцией ω .

2.2.1.3 Численное решение уравнения для завихренности

Теперь рассмотрим приближенное решение уравнения для завихренности

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \nabla^2 \omega + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{1}{r^2} \omega - \frac{2}{r} S_3 H \frac{\partial H}{\partial z} .$$

При построении разностной схемы запишем его в дивергентном виде:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \omega}{\partial z} - v \omega \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \omega)}{\partial r} - u \omega \right) - \frac{2}{r} S_3 H \frac{\partial H}{\partial z} . \quad (2.22)$$

Это позволяет представить его в следующем виде:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = L_z \omega + L_r \omega + f_{r,z} , \quad (2.23)$$

где $f_{r,z} = -\frac{2}{r} S_3 H \frac{\partial H}{\partial z}$ и использованы следующие обозначения операторов:

$$L_z \omega = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \omega}{\partial z} - v \omega \right), \quad L_r \omega = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \omega)}{\partial r} - u \omega \right). \quad (2.24)$$

Существуют определенные проблемы построения разностной схемы, удовлетворяющей принципу максимума при любых шагах пространственной переменной (проблемы монотонности). Трудности, связанные с немонотонным характером симметричной аппроксимации производных, исчезают при переходе к односторонним разностям. Разностные схемы, использующие несимметричную аппроксимацию частных производных, широко используются для численного моделирования задач конвекции

[56–59]. Будем использовать аппроксимации операторов (2.24), как это предложено в работе [56]:

$$L_r \omega \approx \frac{1}{\Delta r^2} \left[\frac{r_{i+1} \omega_{i+1,j}^k - r_i \omega_{i,j}^k}{r_{i+\frac{1}{2}} \left(1 + 0,5 \Delta r \left| u_{i+\frac{1}{2},j} \right| \right)} - \frac{r_i \omega_{i,j}^k - r_{i-1} \omega_{i-1,j}^k}{r_{i-\frac{1}{2}} \left(1 + 0,5 \Delta r \left| u_{i-\frac{1}{2},j} \right| \right)} \right] -$$

$$- \frac{1}{\Delta r} \left[\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^+ \omega_{i,j}^k - u_{i-\frac{1}{2},j}^+ \omega_{i-1,j}^k \right) + \left(u_{i+\frac{1}{2},j}^- \omega_{i+1,j}^k - u_{i-\frac{1}{2},j}^- \omega_{i,j}^k \right) \right], \quad (2.25)$$

$$L_z \omega \approx \frac{1}{\Delta z^2} \left[\frac{\omega_{i,j+1}^k - \omega_{i,j}^k}{\left(1 + 0,5 \Delta z \left| v_{i,j+\frac{1}{2}} \right| \right)} - \frac{\omega_{i,j}^k - \omega_{i,j-1}^k}{\left(1 + 0,5 \Delta z \left| v_{i,j-\frac{1}{2}} \right| \right)} \right] -$$

$$- \frac{1}{\Delta z} \left[\left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^+ \omega_{i,j}^k - v_{i,j-\frac{1}{2}}^+ \omega_{i,j-1}^k \right) + \left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^- \omega_{i,j+1}^k - v_{i,j-\frac{1}{2}}^- \omega_{i,j}^k \right) \right], \quad (2.26)$$

где $u^\pm = \frac{u \pm |u|}{2}$, $v^\pm = \frac{v \pm |v|}{2}$, $r_{i\pm\frac{1}{2}} = \Delta r(i \pm 0,5)$, $r_i = \Delta r i$.

Значения компонент скорости определяются по следующим формулам (рисунке 2.11):

$$u_{i-\frac{1}{2},j} = -\frac{1}{4\Delta z \Delta r(i-0,5)} \left(\Psi_{i-1,j+1} + \Psi_{i,j+1} - \Psi_{i-1,j-1} - \Psi_{i,j-1} \right);$$

$$u_{i+\frac{1}{2},j} = -\frac{1}{4\Delta z \Delta r(i+0,5)} \left(\Psi_{i+1,j+1} + \Psi_{i,j+1} - \Psi_{i+1,j-1} - \Psi_{i,j-1} \right);$$

$$v_{i,j-\frac{1}{2}} = \frac{1}{4\Delta r^2 i} \left(\Psi_{i+1,j-1} + \Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j-1} - \Psi_{i-1,j} \right);$$

$$v_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{4\Delta r^2 i} \left(\Psi_{i+1,j+1} + \Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j+1} - \Psi_{i-1,j} \right). \quad (2.27)$$

С учетом $\frac{\partial H}{\partial z} \approx \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j-1}}{2\Delta z}$, свободный член уравнения

$$f_{i,j} = -\frac{2S_9 H_{i,j}}{r_i} \cdot \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j-1}}{2\Delta z} = -\frac{S_9 H_{i,j}}{i \cdot \Delta r \Delta z} (H_{i,j+1} - H_{i,j-1}). \quad (2.28)$$

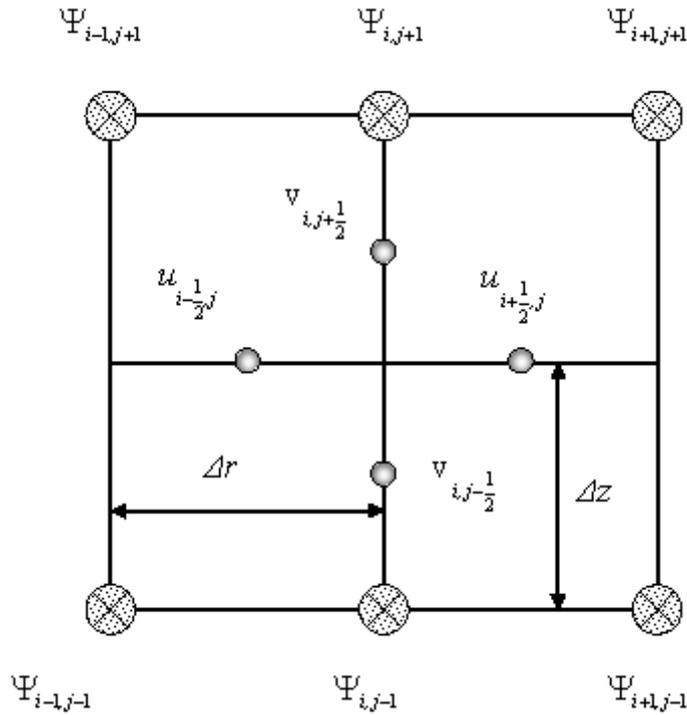


Рисунок 2.11 – К расчету компонент скоростей по формулам (2.27)

Известно, что явные схемы неэкономичны и для расчета одного варианта задачи требуют относительно больших затрат машинного времени, что приводит к использованию неявных схем. Для малых шагов по времени полностью неявная схема имеет низкую точность по сравнению со схемой Кранка-Николсона [59]. Последняя схема является безусловно устойчивой и дает физически реальное решение, независимое от шага по времени. Однако необходимо отметить, что при большом шаге по времени, в решении могут возникать колебания. Устойчивость в математическом смысле гарантирует, что они будут затухать, но это не обеспечивает физически правдоподобного нестационарного решения.

Для вычисления функции $\omega_{i,j}^{k+1}$ используем продольно-поперечную конечно-разностную схему Кранка-Николсона [56, 60]:

$$\omega_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} = \omega_{i,j}^k + 0,5\Delta\tau \left(L_r \omega^{k+\frac{1}{2}} + L_z \omega^k + f_{i,j} \right), \quad (2.29)$$

$$\omega_{i,j}^{k+1} = \omega_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + 0,5\Delta\tau \left(L_r \omega^{k+\frac{1}{2}} + L_z \omega^{k+1} + f_{i,j} \right). \quad (2.30)$$

При решении (2.29) получим СЛАУ в виде трехдиагональной матрицы:

$$A_x \cdot \omega_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} - B_x \cdot \omega_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + C_x \cdot \omega_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} = D_x. \quad (2.31)$$

Ее коэффициенты определяются следующим образом:

$$A_x = \frac{1}{\Delta r} \left(\frac{r_{i-1}}{\Delta r r_{i-\frac{1}{2}} + \text{Re}_{u-}} + u_{i-\frac{1}{2},j}^+ \right) > 0, \quad (2.32)$$

$$B_x = \frac{2}{\Delta\tau} + \frac{1}{\Delta r} \left(\frac{r_i}{\Delta r r_{i+\frac{1}{2}} + \text{Re}_{u+}} + \frac{r_i}{\Delta r r_{i-\frac{1}{2}} + \text{Re}_{u-}} + u_{i+\frac{1}{2},j}^+ - u_{i-\frac{1}{2},j}^- \right), \quad (2.33)$$

$$C_x = \frac{1}{\Delta r} \left(\frac{r_{i+1}}{\Delta r r_{i+\frac{1}{2}} + \text{Re}_{u+}} - u_{i+\frac{1}{2},j}^- \right) > 0, \quad (2.34)$$

$$D_x = -\frac{2}{\Delta\tau} \omega_{i,j}^k - L_z \omega^k + f_{i,j}, \quad (2.35)$$

где

$$\text{Re}_{u+} = 0,5\Delta r \left| u_{i+\frac{1}{2},j} \right|, \quad \text{Re}_{u-} = 0,5\Delta r \left| u_{i-\frac{1}{2},j} \right|. \quad (2.36)$$

При решении уравнения (2.31) получим СЛАУ в виде трехдиагональной матрицы:

$$A_y \cdot \omega_{i,j-1}^{k+1} - B_y \cdot \omega_{i,j}^{k+1} + C_y \cdot \omega_{i,j+1}^{k+1} = D_y. \quad (2.37)$$

Ее коэффициенты определяются следующим образом:

$$A_y = \frac{1}{\Delta z} \left(\frac{1}{\Delta z \left(\frac{1}{2} + \text{Re}_{v_-} \right)} + v_{i,j-\frac{1}{2}}^+ \right) > 0, \quad (2.38)$$

$$B_y = \frac{2}{\Delta \tau} + \frac{1}{\Delta z} \left(\frac{1}{\Delta z \left(\frac{1}{2} + \text{Re}_{v_+} \right)} + \frac{1}{\Delta z \left(\frac{1}{2} + \text{Re}_{v_-} \right)} + v_{i,j+\frac{1}{2}}^+ - v_{i,j-\frac{1}{2}}^- \right), \quad (2.39)$$

$$C_y = \frac{1}{\Delta z} \left(\frac{1}{\Delta z \left(\frac{1}{2} + \text{Re}_{v_+} \right)} + v_{i,j+\frac{1}{2}}^- \right) > 0, \quad (2.40)$$

$$D_y = -\frac{2}{\Delta \tau} \omega_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} - \left(L_r \omega_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + f_{i,j} \right), \quad (2.41)$$

где разностные числа Рейнольдса $\text{Re}_{v_+} = 0,5\Delta z \left| v_{i,j+\frac{1}{2}} \right|$, $\text{Re}_{v_-} = 0,5\Delta z \left| v_{i,j-\frac{1}{2}} \right|$.

Разностные уравнения (2.31) и (2.37) решались методом прогонки.

Разностная схема (2.33) – (2.34) аппроксимирует (ω, Ψ) – систему с погрешностью $o(\tau+h^2)$, она монотонна и обладает свойством консервативности.

2.2.1.4 Граничные условия при численном решении и алгоритм расчета

Скорости жидкости во внутренних точках сетки будем определять с использованием симметричной аппроксимации:

$$u_{i,j}^k \approx -\frac{\psi_{i,j+1}^k - \psi_{i,j-1}^k}{2r_i \Delta z} \quad ; \quad (2.42)$$

$$v_{i,j}^k \approx \frac{\psi_{i+1,j}^k - \psi_{i-1,j}^k}{2r_i \Delta r}. \quad (2.43)$$

На оси симметрии (при $r=0$) имеем

$$u_{0,j}^k = 0; \quad v_{0,j}^k = \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} \right)_{0,j}^k = \frac{2\psi_{1,j}^k}{\Delta r^2}. \quad (2.44)$$

На свободной поверхности ванны (при $j=0$) скорость жидкости

$$v_{i,0}^k = 0; \quad u_{i,0}^k = -\frac{\psi_{i,1}^k - \psi_{i,0}^k}{r_i \Delta z} = -\frac{\psi_{i,1}^k}{r_i \Delta z}. \quad (2.45)$$

Одна из основных трудностей, возникающих при численном решении системы, связана с постановкой граничных условий для функции ω . Действительно, решение этой системы должно удовлетворять заданным граничным условиям для скорости (или для функции Ψ).

При постановке задач конвективного переноса, на границе расчетной области обычно задаются значения функции тока Ψ и ее нормальной производной $\partial\Psi/\partial n$. Например, условию прилипания соответствует

$$\Psi = \partial\Psi/\partial n = 0.$$

Функция завихренности ω определена внутри рассматриваемой области и не известна на ее границах (твердые стенки и границы, где скорости жидкости заданы). Однако для получения численного решения методом сеток формально требуется, чтобы граничные условия для функции ω были известны.

Существует несколько приближенных формул, позволяющих рассчитывать ω на границе. Например, формула Тома [56] для вычисления завихренности на твердых стенках с погрешностью первого порядка по h :

$$\omega_0^k = -\frac{2}{h^2} \psi_1^k + O(h); \quad (2.46)$$

формула Вудсома [57] с погрешностью второго порядка

$$\omega_0^k = -\frac{1}{2} \omega_1^k - \frac{3}{h^2} \psi_1^k + O(h^2) \quad (2.45)$$

и др. [61].

Анализ литературы показал, что наиболее удобным является метод Полежаева В.Н. и Грязнова В.Л. [56, 57]. Он устраняет проблему граничных условий для завихренности, так как значение функции ω на границе вообще не используются. Суть этого способа решения (ω , Ψ) – системы со-

стоит в обеспечении выполнения граничного условия для функции тока на каждом временном (или итерационном) слое. Достигается это соответствующими поправками значений на границе. Функции Ψ и ω на k -ом временном слое считаем известными (первоначально из начальных условий, когда мы знаем поле скоростей, а значит, Ψ и ω).

Общий вычислительный алгоритм для определения $\psi_{i,j}^{k+1}$, ω_{ij}^{k+1} при решении как стационарной, так и нестационарной, задач строится следующим образом (рисунке 2.12).

1. Из разностного уравнения для функции тока определяются значения $\omega_{i,j}^{k+1}$ в приграничных точках разностной сетки (внутренних узлов, отстоящих от границы на расстояние в шаг сетки):

$$\omega_{i,j}^{k+1} = -\frac{\psi_{i+1,j}^k - 2\psi_{i,j}^k + \psi_{i-1,j}^k}{\Delta r^2 r_i} - \frac{\psi_{i,j+1}^k - 2\psi_{i,j}^k + \psi_{i,j-1}^k}{\Delta z^2 r_i} + \frac{\psi_{i+1,j}^k - \psi_{i-1,j}^k}{2r_i^2 \Delta r}. \quad (2.48)$$

2. Принимая найденные таким образом значения $\omega_{i,j}^{k+1}$ за граничные, решаем разностное уравнение для завихренности и вычисляем значения $\omega_{i,j}^{k+1}$ внутри этой уменьшенной области.

3. Решаем разностное уравнение для функции тока (уравнение Пуассона) в предположении, что на основной границе значения $\psi_{i,j}^{k+1}$ заданы, и определяем значения функции тока $\psi_{i,j}^{k+1}$ внутри основной области.

4. Корректируем значения функции тока на границе уменьшенной области таким образом, чтобы выполнялись граничные условия.

4.1. На основной границе, где заданы условия прилипания $\Psi = \partial\Psi/\partial n = 0$, производную $\partial\Psi/\partial n$ будем аппроксимировать выражением третьего порядка точности

$$\left(\frac{\partial\psi}{\partial n}\right)_0 = -\frac{1}{6h}(11\psi_0 - 18\psi_1 + 9\psi_2 - 2\psi_3) + O(h^3), \quad (2.49)$$

в этом случае условие прилипания выполняется при

$$\psi_1 = 0,5\psi_2 - \frac{1}{9}\psi_3; \quad \psi_0 = 0. \quad (2.50)$$



Рисунок 2.12 – Численный алгоритм нахождения $\psi_{i,j}^{k+1}$ и $\omega_{i,j}^{k+1}$ при решении $\omega - \psi$ -системы

4.2. На свободной поверхности жидкости заданы условия $\Psi = \partial^2 \Psi / \partial z^2 = 0$, если записать вторую производную как

$$\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial n^2} \right)_0 = \frac{1}{h^2} (\psi_0 - 2\psi_1 + \psi_2) + O(h^2),$$

то данное условие выполняется при

$$\psi_1 = 0,5\psi_2; \quad \psi_0 = 0. \quad (2.51)$$

4.3. На оси симметрии $\Psi = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = 0$ имеем условие

$$\psi_1 = 0,5\psi_2; \quad \psi_0 = 0.$$

4.4. На границе двух жидкостей зададим компоненты скорости на поверхности лунки, получим

$$\partial \Psi / \partial z = a; \quad \partial \Psi / \partial r = b, \quad \text{где } a = -r \overline{u_n}, \quad b = r \overline{v_n}.$$

При аппроксимации производных формулами второго порядка имеем

$$2b\Delta r = -3\psi_{ij} + 4\psi_{i+1,j} - \psi_{i+2,j},$$

$$2a\Delta z = -3\psi_{i,j} + 4\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j+2}.$$

Так как на границе лунки значение $\Psi_{i,j} = 0$, то

$$2b\Delta r = 4\psi_{i+1,j} - \psi_{i+2,j},$$

$$2a\Delta z = 4\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j+2}.$$

В точках, отстоящих на один шаг от границы поверхности лунки, имеем

$$\psi_{i,j+1} = \frac{\psi_{i,j+2} - 2\Delta z r_i \overline{u_n}}{4}, \quad \psi_{i+1,j} = \frac{\psi_{i+2,j} + 2r_i \Delta r \overline{v_n}}{4}. \quad (2.52)$$

Вычислительный процесс прекращается при достижении стационарного режима. Это происходит при выполнении условия, аналогичного (4.25):

$$\mathcal{E}_\omega = \max_{i,j} |\omega_{i,j}^{k+1} - \omega_{i,j}^k| / \max_{i,j} |\omega_{i,j}^{k+1}| \leq \varepsilon, \quad (2.53)$$

где \mathcal{E}_ω – относительная достигнутая точность завихренности, ε – заданная относительная точность выхода течения на стационарный режим. Численная реализация показала, что разработанный алгоритм вычислительно устойчив, а получаемые решения хорошо сходятся.

Таким образом, создана математическая модель и составлен вычислительный алгоритм для приближенного решения (ψ, ω) – системы, что позволяет решать как стационарные, так и нестационарные задачи ЭВТ в ванне ДППТ.

2.2.2 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей

2.2.2.1 Описание программы «Электровихревое течение-1»

На основе созданных математических моделей по определению магнитного поля и поля скоростей жидкости в ванне с осевым подовым электродом создана компьютерная программа «*Электровихревое течение-1*» в интегрированной среде разработки Visual Basic for Application Ms Excel [52].

Программа для выбранной геометрии ванны и подового электрода при заданном токе дуги позволяет рассчитывать поле потенциалов, распределение плотности тока и напряженности магнитного поля по математической модели, приведенной во 2-й главе. Далее, для рассчитанного магнитного поля программа численно моделирует стационарные (или нестационарные) ЭВТ в ванне расплава. Главная форма и окно решений программы приведены на рисунке 2.13.

С помощью основного меню программы задаются исходные данные и определяются источники движения жидкости. Можно выбрать один из следующих режимов:

- 1) под действием объемных электромагнитных сил (электровихревое течение);
- 2) под действием вязкостных сил при воздействии дуги или плазменной осесимметричной струи;
- 3) при совместном действии ОЭМС и струи плазмы;
- 4) под действием сил вязкости (при торможении расплава).

Последний пункт означает, что, начиная с любого момента времени, программа позволяет убрать действие ОЭМС и струи плазмы и промоделировать нестационарное течение расплава под действием только вязкостных сил.

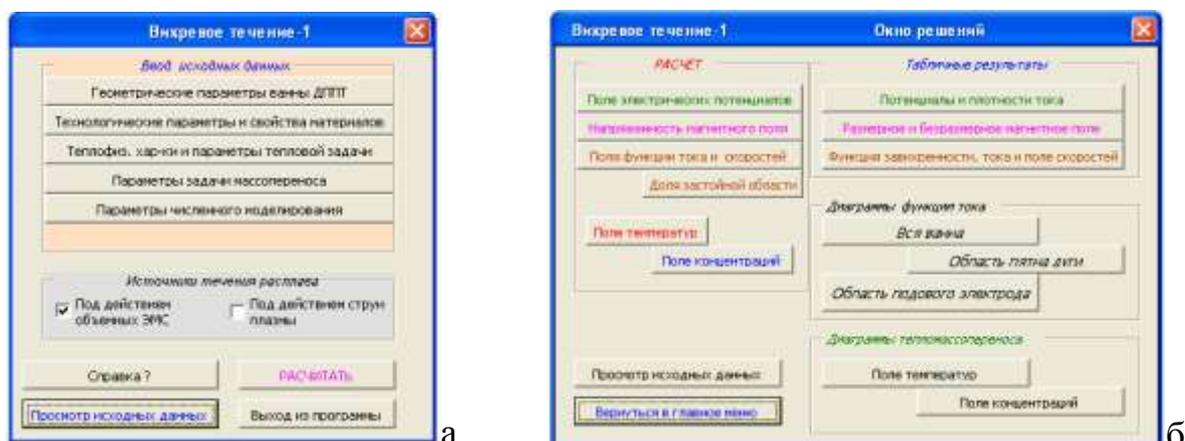
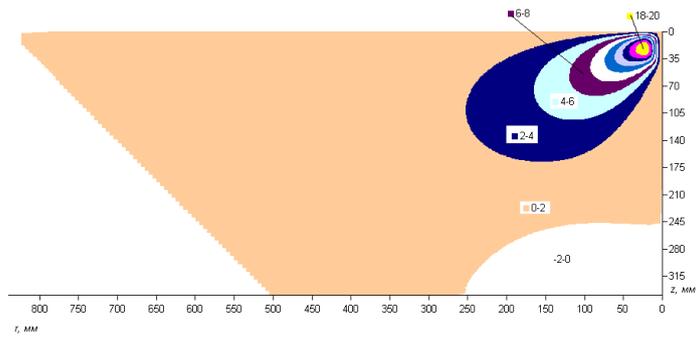


Рисунок 2.13 – Окна главное меню (а) и решений (б) программы «Вихревое течение-1»

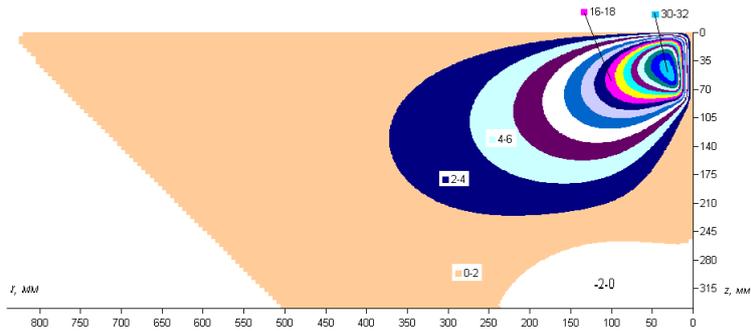
2.2.2.2 Характер нестационарных течений в ванне. Влияние размера подового электрода

Посредством компьютерного моделирования получено распределение функции тока для трехтонной сталеплавильной печи постоянного тока. Для анализа характера течения использовалась функция Ψ , которая имеет понятный физический смысл: касательная к линии тока ($\Psi = const$) определяет направление вектора скорости, а разность $\Psi_2 - \Psi_1$ – расход жидкости, протекающей через сечение между двумя поверхностями $\Psi_2 = const$, $\Psi_1 = const$.

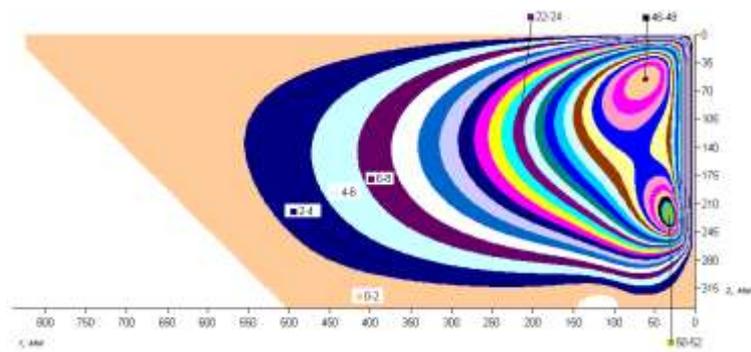
В качестве объекта моделирования была выбрана трехтонная сталеплавильная ДППТ стандартной конфигурации. Рассмотрим характер течения расплава во времени при круглом подовом электроде радиус $X_2 = 100$ мм. При токе дуги 1 кА ($S_d = 6,2 \cdot 10^6$) средняя плотность тока на ПЭ $J_{nэ} = 3,2$ А/см², а радиус пятна дуги $r_n = 8$ мм. На рисунке 2.14 показано распределение функции тока в ванне расплава в различные моменты времени после включения тока. До включения тока расплав был неподвижным.



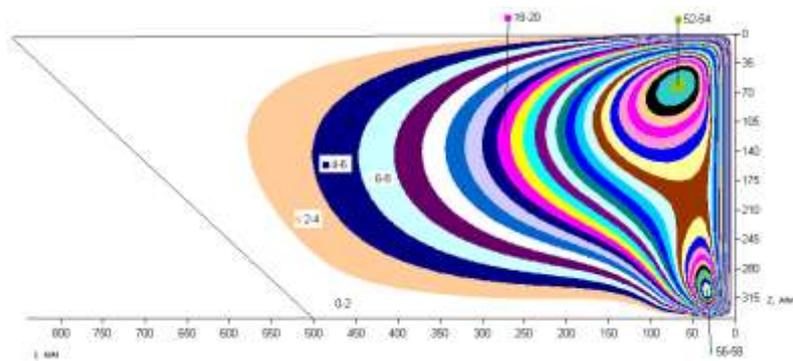
а



б



в



г

Рисунок 2.14 – Распределение функции тока в ванне в различные моменты времени после включения тока: а – 0,5 с; б – 1 с; в – 3 с; г – 4 с ($I_0=1$ кА, $X_1=0$, $X_2=100$ мм, $J_{n3}=3,2$ А/см²)

Первоначально в ванне определяющими являются вязкостные силы, и в ней формируется двухвихревое течение (рисунке 2.14, а). Первый контур циркуляции находится в районе пятна дуги, где частицы жидкости движутся по вытянутым эллипсам. Ось вихря расположена на расстоянии 25 мм от оси ванны и на глубине 20 мм от ее поверхности. Второй контур циркуляции – вблизи подового электрода, жидкость в котором движется в противоположную сторону от основного контура. Скорость движения во втором вихре значительно медленнее, чем в первом. Видно, что ось вихря расположена на расстоянии $z=h_6-25$ мм от края подового электрода. Характер этого течения схематично показан на рисунке 2.15.

С течением времени от первого вихря отделяется третий вихрь, который движется вдоль оси ванны в направлении оси z (рисунок 2.14, б, в). При этом размеры второго вихря уменьшаются до его полного исчезновения (рисунок 2.14, г).

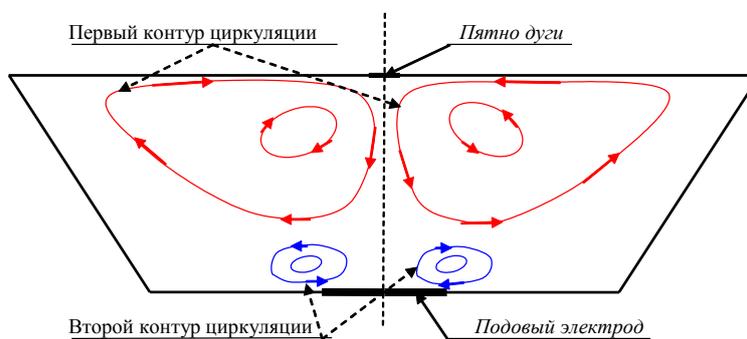


Рисунок 2.15 – Характер ЭВТ в ванне при определяющем действии вязкостных сил

При стационарном течении ($\tau > 5,2$ с) под действием ОЭМС металл в районе пятна дуги движется вниз по оси ванны, далее растекается от нее к периферии, медленно поднимается вдоль стенок на поверхность и направляется к центру, где вновь вовлекается в глубь ванны (рисунок 2.16). Создается впечатление, что в пятне дуги находится струйный источник, через который втекает жидкий металл в ванну. В действительности такого ис-

точника нет, а объемы расплава попадают в зону струи после их предварительного подтягивания электромагнитной силой вдоль поверхности к месту токоподвода и последующего выброса металла вдоль оси ванны.

Максимальные скорости расплава наблюдаются вблизи оси ванны, на ее поверхности в районе пятна дуги и вблизи подового электрода на расстоянии от оси ванны равном примерно половине его радиуса.

Застойные области в ванне расплава располагаются в местах, где значения функции тока ψ лежат в диапазоне от 0 до 3 (см. рисунок 2.16), что соответствует скорости жидкости меньше 0,3 мм/с. Область малоподвижной жидкости располагается вблизи подины ванны (при $r > 1,5X_2$, $z > 0,9h_0$), вдоль боковой стенки ($r > 0,6R_0$) и вблизи свободной ее поверхности (при $r > 0,35R_0$).

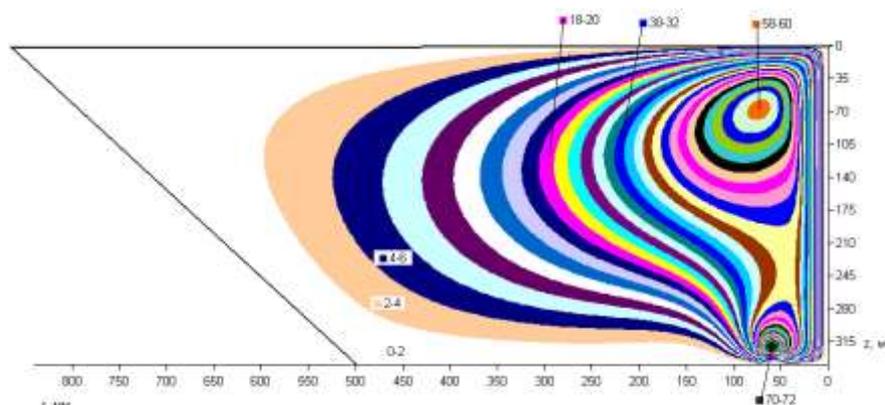


Рисунок 2.16 – Распределение функции тока для установившегося течения жидкой стали в ванне ДППТ (при $I_0=1$ кА, $X_1=0$,

$$X_2=100 \text{ мм}, J_{n3}=3,2 \text{ А/см}^2)$$

Рассмотрим теперь характер течения расплава во времени для подового электрода, представляющего собой тонкое кольцо с внутренним радиусом $X_1=95$ мм и внешним – $X_2=100$ мм. При этом средняя плотность тока при $I_0=1$ кА на ПЭ составила $J_{n3}=32,6$ А/см², это примерно в 10 раз больше, чем в предыдущем примере для круглого электрода, но на порядок меньше, чем в районе пятна дуги ($J_a=500$ А/см²).

Для этого случая на рисунке 2.17 показано распределение функции тока в ванне расплава в различные моменты времени после включения тока. В установившемся режиме течения расплав от пятна дуги, дойдя до подины, движется вдоль ее поверхности до внешнего края подового электрода, где резко поднимается вверх до поверхности ванны и далее к ее оси, замыкая первый контур циркуляции. Движение в периферийных областях ванны определяется вторым контуром циркуляции, который хотя и слабее первого вихря, но не исчезает с течением времени.

Наконец, если взять предельный случай, когда размер ПЭ сравним с размером пятна дуги ($r_n=8$ мм, $X_2=10$ мм, $J_{nз}=315$ А/см²), то в ванне образуются два примерно одинаковых противоположно вращающихся вихря (рисунке 2.18). В середине ванны по ее высоте расплав остается практически неподвижным, при этом он интенсивно циркулирует в районе токоподводов и оси ванны.

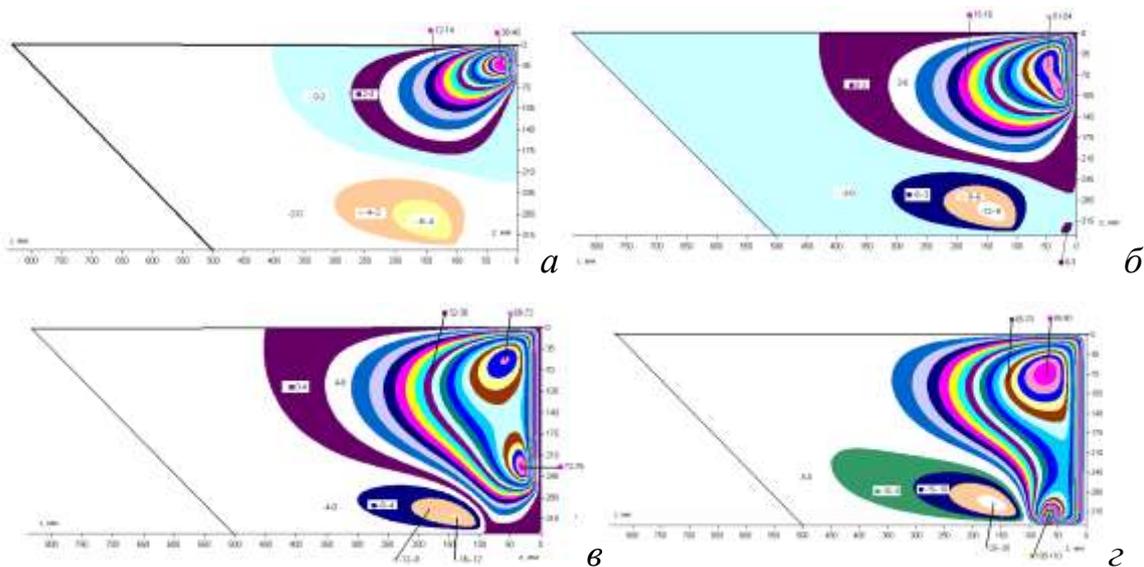


Рисунок 2.17 – Распределение функции тока в ванне в различные моменты времени после включения тока: а – 0,5 с; б – 1 с; в – 2 с; г – 4 с (установившееся течение) ($I_0=1$ кА, $X_1=95$ мм; $X_2=100$ мм, $J_{nз}=32,6$ А/см²)

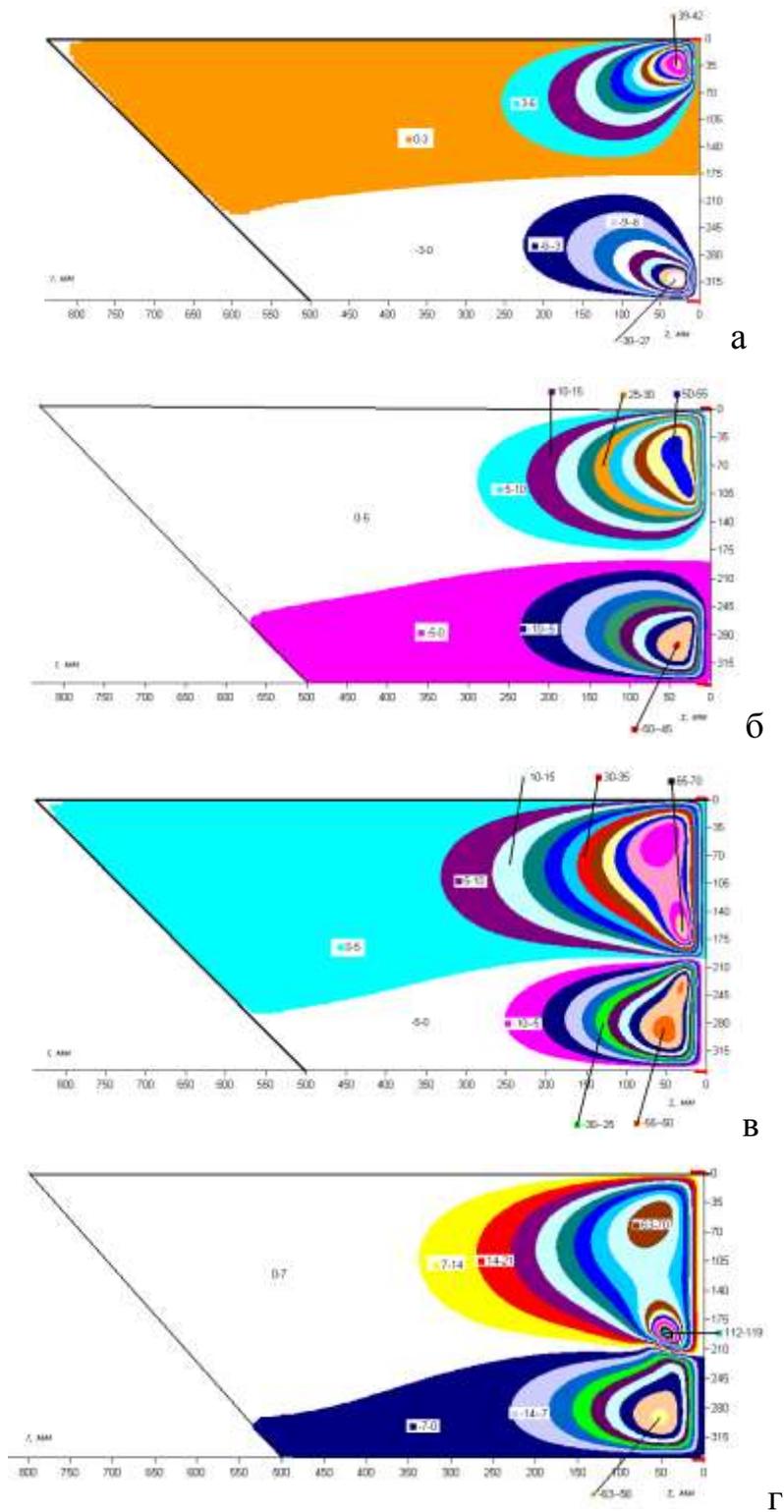


Рисунок 4.12 – Распределение функции тока для установившегося течения расплава: а – 0,5 с; б – 1 с; в – 1,5 с; г – >4 с (установившееся течение) ($I_0=1 \text{ кА}$, $X_1=0$; $X_2=10 \text{ мм}$, $J_{нэ}=315 \text{ А/см}^2$)(размер ПЭ сравним с пятном дуги, $I_0=1 \text{ кА}$)

Таким образом, при растекании тока по ванне ДППТ с одним подовым электродом условно можно считать, что в ней есть два источника ОЭМС. Первый (более мощный) – около пятна привязки дуги, второй – на краю подового электрода. Под действием первого источника ОЭМС образуется основной контур циркуляции. Металл движется вниз по оси ванны, далее растекается от нее к периферии, медленно поднимается вдоль стенок на поверхность и направляется к центру, где вновь вовлекается вглубь ванны. Под действием второго источника ОЭМС может образовываться второй контур циркуляции около подового электрода, жидкость в котором движется в сторону противоположную основному контуру. Вероятность появления второго контура циркуляции возрастает при уменьшении площади контакта ПЭ с расплавом (или увеличении средней плотности тока на ПЭ).

2.2.3 Сопоставление и обобщение результатов

Рассматриваемая модель построена с использованием физических законов сохранения энергии, вещества, заряда. Все ее положения и допущения обоснованы, а использованные численные методы апробированы многими исследователями. В данном параграфе проверим, насколько полученные результаты соответствуют имеющимся теоретическим и экспериментальным результатам других авторов.

В работах [63, 64] проводилось экспериментальное изучение потоков в ванне на модели, имитирующей плазменно-дуговую плавку металлов. В стальной болванке было выточено параболоидное углубление, подобное ванне, образующейся при переплаве в кристаллизатор. Углубление заполнялось жидким галлием (температура плавления $29,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), поверхность которого во избежание окисления металла покрывалась тонким слоем 10% соляной кислоты. Максимальный диаметр ванны был равен 100 мм, ее

глубина на оси составляла 45 мм, медный электрод диаметром 20 мм погружался в расплав на 2 – 4 мм и располагался по центру ванны.

На рисунке 2.19, а приведено экспериментально полученное поле скоростей при силе тока 550 А. Видно, что основной поток направлен вниз по оси ванны; скорость его постепенно уменьшается из-за гидравлического сопротивления массы расплава, и поток, разветвляясь, направляется от оси к периферии вдоль границы ванны вверх, а на поверхности металл движется от периферии к центру, где вновь под действием осевой силы направляется в глубь ванны. В результате при осевом разрезе ванны в ней наблюдается два вихря (рисунке 2.29, б).

Установлено, что скорость ЭВТ линейно зависит от тока, в частности усредненная по объему скорость жидкого галлия [64]

$$w_{Ga} = n_{Ga} I_0 \text{ мм/с, где } n=90 \frac{\text{мм}}{\text{с} \cdot \text{кА}}.$$

Данное значение n_{Ga} выше примерно в 3 раза аналогичного коэффициента n полученного в расчетах (2.44) – (2.45). Объясним это.

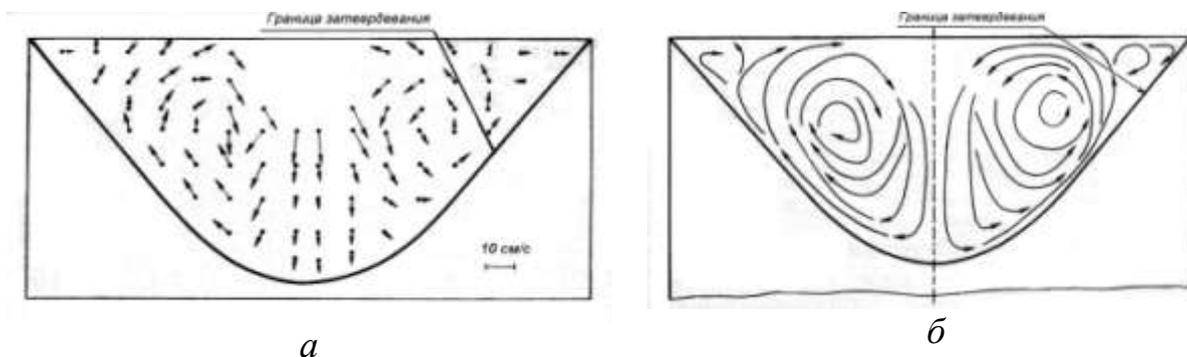


Рисунок 2.19 – Поле скоростей (а) и схема потоков в ванне (б) при силе тока 550 А [63]

Плотности галлия γ_{Ga} и жидкой стали γ примерно совпадают ($\gamma_{Ga} = 6090 - 0,6(t - 29,9)$ кг/м³), вязкость галлия ($\eta_{Ga} = 4,359 \cdot 10^{-4} \exp\left(\frac{4000}{RT}\right)$ Па·с) при температуре его плавления $\eta_{Ga} = 2,13$

10^{-3} Па·с, что в 3 раза меньше, чем у стали [65]. Найдем характерные размеры экспериментальной для галлиевой ванны и ванны ДППТ, используемой при расчетах с помощью формулы [66] $L_{Ga} = \sqrt{50 \cdot 45} \approx 47$ мм
 $L = \sqrt{h_g R_g} = \sqrt{340 \cdot 840} \approx 530$ мм.

При условии подобия $Re=idem$ найдем отношение скоростей в экспериментальной и расчетной ванне

$$\frac{W}{W_{Ga}} = \frac{L_{Ga}}{L} \frac{\eta}{\eta_{Ga}} \frac{\gamma_{Ga}}{\gamma} \approx \frac{1}{3}.$$

В работе [67] приведено аналитическое решение задачи, описывающей ЭВТ в цилиндрическом объеме конечных размеров. На торцах цилиндра расположены электроды, причем радиус первого электрода ($z=0$) $r_0=0,2R$, а радиус второго ($z=h/R$) равен радиусу основания цилиндра. Все остальные поверхности цилиндра неэлектропроводные. О характере течения можно судить по рисунку 2.20: течение имеет вид тороидального вихря, причем вблизи оси симметрии ($r=0$) жидкость движется от меньшего электрода к большему.

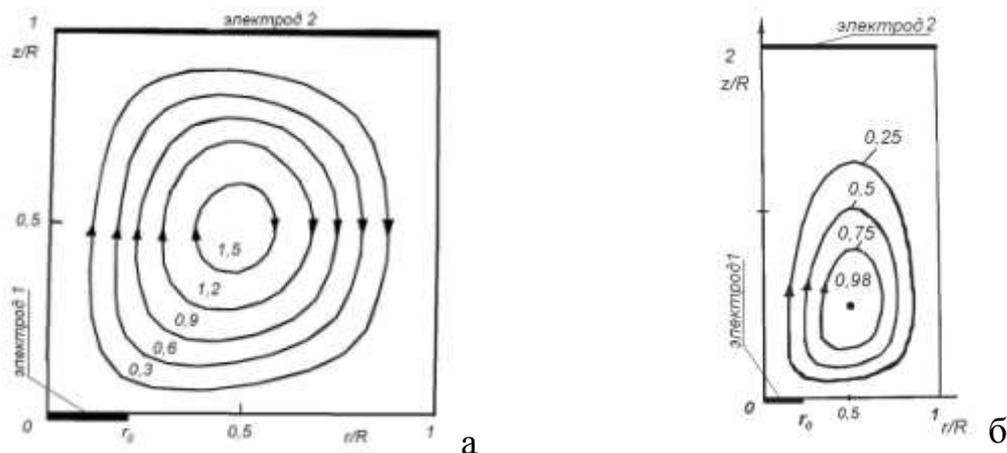


Рисунок 2.20 – Линии тока меридиального течения в цилиндрической емкости при ее радиусе равном высоте $R=h$, $S_3=500$ (а) и при $2R=h$, $S_3=250$ (б) [67]

Сравнивая эти данные с результатами можно сделать вывод об их качественном сходстве: здесь имеются те же направления скорости жидкости и характер течения.

Практика эксплуатации ДСП и ДППТ свидетельствует о том, что в районе пятна дуги (в зависимости от силы тока) скорость движения металла достигает 0,15 - 0,35 м/с [68], что вполне сравнимо с данными, приведенными на рисунках 2.17 – 2.18. Это положительно сказывается на снижении температуры расплава за счет отведения высокой тепловой мощности ($4 - 5 \text{ кВт/см}^2$) из района привязки дуги.

2.2.4 Рекомендации по использованию результатов проведенных НИР

Построена компьютерная модель электровихревого течения металла в ванне дуговой печи постоянного тока. Создан программный продукт «*Электровихревое течение-1*», позволяющий изучать стационарные и нестационарные циркуляционные потоки расплава при различных конструктивных и технологических параметрах работы ДППТ.

На основе компьютерного моделирования был установлен характер циркуляции расплава под влиянием рассмотренных сил. Под действием ОЭМС вблизи оси ванны формируется нисходящий поток, а вблизи боковой стенки – восходящий. Формируется контур циркуляции, центр которого расположен вблизи боковой стенки, в средней зоне между верхней и нижней поверхностями ванны. Для рассматриваемой ванны, имеющей подовый электрод ось которого совпадает с осью ванны, циркуляция, связанная с вращением расплава в горизонтальной плоскости, отсутствует.

Круглые аноды малого размера ограничивают площадь протекания тока, так как эквипотенциальные линии концентрируются вблизи зоны контакта с дугой, затем расходятся и вновь сосредотачиваются вблизи малой поверхности анода. Это приводит к образованию двух зон с высоким уровнем электромагнитных сил, а именно, вблизи анода и пятна дуги. Ре-

зультат такого распределения электромагнитных характеристик определяет формирование полей скоростей.

Конфигурация подового анода оказывает влияние на картину потоков и интенсивность перемешивания. Максимальная скорость жидкого металла наблюдается вблизи оси симметрии в районе пятна дуги и для токов 10 кА составляет 0,25 м/с, а для 50 кА – 1 м/с. Минимальная скорость наблюдается вблизи боковых стенок и дна ванны – 10^{-3} мм/с.

Установлено, что при растекании тока по ванне возникает радиально направленная сжимающая сила (пинч), которая приводит к электровихревому течению расплава. Скорость жидкости всегда направлена в сторону, противоположную градиенту плотности тока и не зависит от направления тока ($W \sim -d|\vec{J}|/dn$).

В дальнейшем по установившемуся полю скоростей будем определять нестационарные поля концентраций и температур. Это позволит определять степень усреднения химического состава и температуры металла в объеме ванны при участии электровихревых течений.

2.2.5 Рекомендации по использованию результатов НИР при создании научно-образовательных курсов

Созданная компьютерная программа и результаты исследования могут быть использованы в учебно-образовательной деятельности студентов по направлениям 230100 – «Информатика и вычислительная техника» и 150100 – «Металлургия», а также аспирантов по специальностям 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

2.3 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования теплопереноса в токонесущих расплавах металлургических агрегатов

2.3.1 Систематизация и оценка полученных результатов

В отчете [52] в п.п. 4.2.9 – 4.2.10 разработаны математические модели теплопереноса и массопереноса при наличии конвективного электро-вихревого (ЭВТ) расплава в осесимметричной ванне ДППТ. В данном разделе рассматриваются алгоритмы и численные методы с помощью которых создается компьютерная программа по созданным математическим моделям. Проверяется адекватность созданных моделей и проводится оценка эффективности полученных результатов с современным научно-техническим уровнем.

Уравнения конвективного массопереноса (2.54)

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial r} + v \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (2.54)$$

аналогично уравнению теплопереноса (7.41)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial r} + v \frac{\partial t}{\partial z} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (2.55)$$

только вместо температуры выступает концентрация, а вместо коэффициента температуропроводности – коэффициент диффузии, поэтому методы решения этих уравнений будут одинаковы.

Запишем уравнение (2.54) в безразмерном виде.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial r} + v \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{1}{Pr} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (2.56)$$

где для искомой функции t и независимых переменных выбраны следующие обозначения и масштабы: за единицу длины принят радиус ванны R_0 , скорости – v/R_0 , времени – R_0^2/ν , температуры – t_0 ; $Pr = \nu/a$.

Для решения уравнения (2.56) запишем его в дивергентном виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\text{Pr}} \cdot \frac{\partial t}{\partial z} - vt \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{\text{Pr}} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} - utr \right) = L_z t + L_r t, \quad (2.57)$$

где использованы следующие обозначения:

$$L_r t = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{\text{Pr}} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} - utr \right), \quad (2.58)$$

$$L_z t = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\text{Pr}} \cdot \frac{\partial t}{\partial z} - vt \right). \quad (2.59)$$

Введем разностную сетку, регулярную по пространственным переменным с координатами узлов:

$$r_i = i \cdot \Delta r, \quad z_j = j \cdot \Delta z, \quad \tau_k = k \cdot \Delta \tau,$$

$$\text{где } j=0, 1, 2 \dots N_z, \quad i=0, 1, 2 \dots I_{\text{бок}}(j), \quad k=0, 1, 2, \dots K, \quad \Delta r = \frac{R_g}{N_R},$$

$$\Delta z = \frac{h_g}{N_z}; \quad N_R, N_z - \text{соответственно число интервалов на рассматри-}$$

ваемой области по осям r, z . Сеточные функции будем обозначать при помощи индексов, так $t(r_i, z_j, \tau_k) = t_{i,j}^k$.

Введем ряд дополнительных обозначений: $I_n = r_n / \Delta r$ — число интервалов в области пятна дуги; $I_{\text{гран}} = N_R - j \Delta z \cdot \text{ctg} \varphi_0 / \Delta r$ — граница скоса ванны; $I_g = d_g / (2 \Delta r)$ — точка на пересечении нижней и боковой границы.

При построении разностной схемы будем использовать консервативную симметричную аппроксимацию второго порядка точности $O((h)^2)$. Для операторов (7.58)–(7.59) имеем [59, стр. 86 и 114]

$$L_r t^k \approx \frac{1}{\text{Pr} r_i \Delta r^2} \left[r_{i+\frac{1}{2}} \frac{t_{i+1,j}^k - t_{i,j}^k}{\text{Pr} \cdot \text{Re}_{u+}} - r_{i-\frac{1}{2}} \frac{t_{i,j}^k - t_{i-1,j}^k}{\text{Pr} \cdot \text{Re}_{u-}} \right] - \frac{1}{r_i \Delta r} \left(r_{i+\frac{1}{2}} u_{i+\frac{1}{2},j} \frac{t_{i+1,j}^k + t_{i,j}^k}{2} - r_{i-\frac{1}{2}} u_{i-\frac{1}{2},j} \frac{t_{i,j}^k + t_{i-1,j}^k}{2} \right), \quad (2.60)$$

$$L_z t^k \approx \frac{1}{\text{Pr} \Delta z^2} \left[\frac{t_{i,j+1}^k - t_{i,j}^k}{\frac{1}{2} + \text{Pr} \cdot \text{Re}_{v_+}} - \frac{t_{i,j}^k - t_{i,j-1}^k}{\frac{1}{2} + \text{Pr} \cdot \text{Re}_{v_-}} \right] - \frac{1}{\Delta z} \left[\left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^+ t^k - v_{i,j-\frac{1}{2}}^+ t^k \right) + \left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^- t^k - v_{i,j-\frac{1}{2}}^- t^k \right) \right], \quad (2.61)$$

где $u^\pm = \frac{u \pm |u|}{2}$, $v^\pm = \frac{v \pm |v|}{2}$, $r_{i \pm \frac{1}{2}} = \Delta r(i \pm 0,5)$; $u_{i+\frac{1}{2},j}$, $u_{i-\frac{1}{2},j}$, $v_{i,j+\frac{1}{2}}$,

$v_{i,j-\frac{1}{2}}$ – величины скоростей определяются по формулам (2.327);

$\text{Re}_{u^\pm} = 0,5 \Delta r \left| u_{i \pm \frac{1}{2},j} \right|$, $\text{Re}_{v^\pm} = 0,5 \Delta z \left| v_{i,j \pm \frac{1}{2}} \right|$ – разностные числа Рейнольдса.

Используем схему расщепления по координатам. На каждом шаге по времени введем промежуточный этап, на котором будем записывать одномерную аппроксимацию по одному из пространственных направлений. Таким образом, двумерная задача «расщепляется» на последовательность одномерных задач по каждой из координат. Погрешности аппроксимаций промежуточных слоев при суммировании уничтожаются.

Для вычисления функции $t_{i,j}^{k+1}$ построим следующую разностную схему (схема Кранка-Николсона) [70]:

$$t_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} = t_{i,j}^k + 0,5 \Delta \tau \left(L_r t^{k+\frac{1}{2}} + L_z t^k \right), \quad (2.62)$$

$$t_{i,j}^{k+1} = t_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + 0,5 \Delta \tau \left(L_r t^{k+\frac{1}{2}} + L_z t^{k+1} \right). \quad (2.63)$$

При решении уравнения (7.62) получим систему АЛУ в виде трехдиагональной матрицы:

$$A_x \cdot t_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} - B_x \cdot t_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + C_x \cdot t_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} = D_x. \quad (2.64)$$

Ее коэффициенты определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 A_x &= \xi_i r_{i-\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\text{Pr} \Delta r_{i-\frac{1}{2}} + \text{Pr} \cdot \text{Re}_{u_{i-\frac{1}{2}}}} \right) > 0, \\
 B_x &= \frac{2}{\Delta \tau} + \xi_i \left[r_{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\text{Pr} \Delta r_{i+\frac{1}{2}} + \text{Pr} \cdot \text{Re}_{u_{i+\frac{1}{2}}}} \right) + r_{i-\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\text{Pr} \Delta r_{i-\frac{1}{2}} + \text{Pr} \cdot \text{Re}_{u_{i-\frac{1}{2}}}} \right) \right], \\
 C_x &= \xi_i r_{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\text{Pr} \Delta r_{i+\frac{1}{2}} + \text{Pr} \cdot \text{Re}_{u_{i+\frac{1}{2}}}} \right) > 0, \\
 D_x &= -t_{i,j}^k \frac{2}{\Delta \tau} - L_z t^k,
 \end{aligned} \tag{2.65}$$

где $\xi_i = \frac{0,5}{r_i \Delta r}$. При решении уравнения (7.63) получим систему АЛУ в

виде трехдиагональной матрицы:

$$A_y \cdot t_{i,j-1}^{k+1} - B_y \cdot t_{i,j}^{k+1} + C_y \cdot t_{i,j+1}^{k+1} = D_y. \tag{2.66}$$

Ее коэффициенты определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 A_y &= \frac{1}{\Delta z} \left(\frac{1}{\text{Pr} \Delta z_{i,j-\frac{1}{2}} + \text{Re}_{v_{i,j-\frac{1}{2}}}} \right) > 0, \\
 B_y &= \frac{2}{\Delta \tau} + \frac{1}{\Delta z} \left(\frac{1}{\text{Pr} \Delta z_{i,j+\frac{1}{2}} + \text{Pr} \cdot \text{Re}_{v_{i,j+\frac{1}{2}}}} + \frac{1}{\text{Pr} \Delta z_{i,j-\frac{1}{2}} + \text{Pr} \cdot \text{Re}_{v_{i,j-\frac{1}{2}}}} \right), \\
 C_y &= \frac{1}{\Delta z} \left(\frac{1}{\text{Pr} \Delta z_{i,j+\frac{1}{2}} + \text{Pr} \cdot \text{Re}_{v_{i,j+\frac{1}{2}}}} \right) > 0, \\
 D_y &= -t_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \frac{2}{\Delta \tau} - L_r t^{k+\frac{1}{2}}.
 \end{aligned} \tag{2.67}$$

Системы алгебраических уравнений (2.64) и (2.66) решались методом прогонки.

Для оценки установления температурного поля использовались: достигнутая относительная точность расчета температур

$$\varepsilon_t = \frac{\max |t_{i,j}^{k+1} - t_{i,j}^k|}{\max t_{i,j}^{k+1}} \quad (2.68)$$

и максимальная скорость изменения температуры

$$\left(\frac{dt}{d\tau} \right)_{\max} \approx \frac{\max |t_{i,j}^{k+1} - t_{i,j}^k|}{\Delta\tau}. \quad (2.69)$$

На свободной поверхности ванны ($i = I_p, \dots, N_R; j=0$) подставляем в (2.40)

выражение $q_{узли} = \frac{K_3 l_\partial (U_a + U_\kappa + b \cdot l_\partial) I_\partial}{2\pi^2 r_i (l_\partial^2 + r_i^2)}$, получим:

$$t_{i,0} = t_{i,1} + \frac{q_{узли} \cdot \Delta z}{\lambda}. \quad (2.70)$$

В области пятна дуги ($i=0, \dots, I_m, j=0$)

$$t_{i,0} = t_{i,1} + \frac{U_a J_n \cdot \Delta z}{\lambda}. \quad (2.71)$$

На боковой поверхности ванны (при $j=0, 1, \dots, M-1, i = I_{gran}(j)$) получим:

$$\lambda \cdot \frac{(t_{i,j} - t_{i,j-1})}{\Delta z} \cdot \cos \varphi_0 + \lambda \cdot \frac{(t_{i,j} - t_{i-1,j})}{\Delta r} \cdot \sin \varphi_0 = -\alpha_\sigma (t_{i,j} - t_{окр}).$$

Выразим граничную температуру:

$$t_{i,j} = \frac{\frac{\cos \varphi_0}{\Delta z} t_{i,j-1} + \frac{\sin \varphi_0}{\Delta r} t_{i-1,j} + \frac{\alpha_\sigma t_{окр}}{\lambda}}{\frac{\cos \varphi_0}{\Delta z} + \frac{\sin \varphi_0}{\Delta r} + \frac{\alpha_\sigma}{\lambda}}. \quad (2.72)$$

На оси ванны ($i=0, j=1, 2, \dots, M-1$)

$$t_{0,j} = t_{1,j}. \quad (2.73)$$

На подине ванны ($j=N_z, i=0, 1, \dots, I_\sigma$)

$$\lambda \frac{t_{i,N_z} - t_{i,N_z-1}}{\Delta z} = -\alpha_{нод} (t_{i,N_z} - t_{окр}).$$

Выразим граничную температуру:

$$t_{i,N_z} = \frac{\lambda t_{i,N_z-1} / \Delta z + \alpha_{nod} t_{окр}}{\lambda / \Delta z + \alpha_{nod}}. \quad (2.74)$$

2.3.2 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей

2.3.2.1 Результаты моделирования теплового состояния в ванне ДППТ

На основе созданной математической модели разработан программный продукт «ЭВТ-2», позволяющий рассчитать нестационарное температурное или концентрационное поле ванны с учетом ЭВТ.

В качестве объекта моделирования была выбрана трехтонная сталеплавильная ДППТ. Расчеты выполнены при $t_0=1500$ °С, полезная электрическая мощность дуги $P=200$ кВт ($I_0=1$ кА), ее длина $l_d=184$ мм, $K_s=0,9$; $Pr=0,12$.

На рисунке 2.18 приведено распределение температур в ванне в различные моменты времени после подачи тепловой мощности дуги.

Принято, что течение расплава стационарное. Видно, что температурное поле формируют ЭВТ. Вблизи оси симметрии нагретый расплав перемещается вниз до подины, далее двигается вдоль линий тока, рассеивая тепловую энергию, полученную от дуги. Высокие температуры наблюдаются в зоне пятна дуги вблизи поверхности ванны и ее оси. Минимальная температура характерна для зон с низкой скоростью расплава: в районе боковой стенки и поверхности ванны вдали от ее оси. С течением времени максимальная скорость изменения температуры (2.69) в ванне снижается (таблице 2.2).

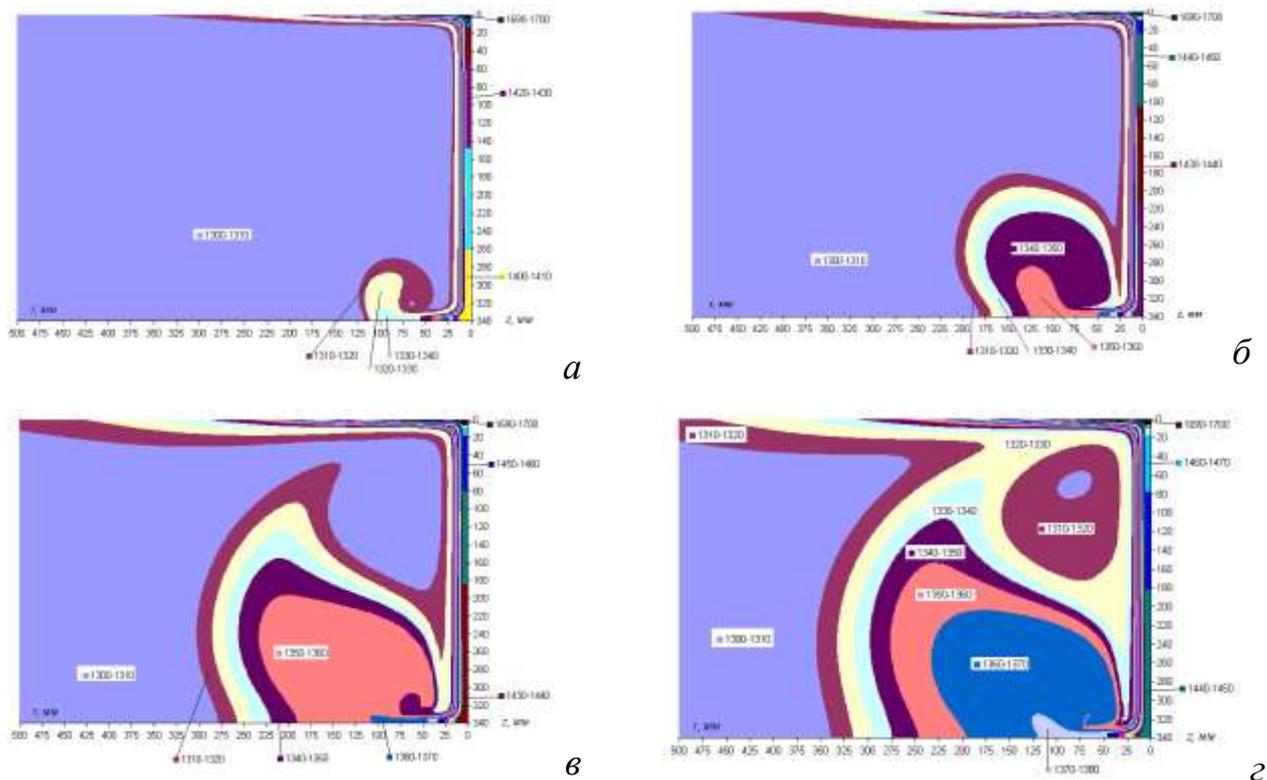


Рисунок 2.18 – Распределение температур в ванне в различные моменты времени: а – 10 с; б – 1 мин; в – 3 мин с; г – 5 мин

Из-за того, что мы не учитываем тепловые потери с поверхности расплава, его средняя температура, определенная по формуле (2.52) будет постепенно расти (рис. 7.9). Для данных условий расчета скорость нагрева расплава практически постоянна и составляет 2 град/мин.

Таблица 2.2

Максимальная скорость изменения температуры в ванне от времени

τ , сек	$\left(\frac{dt}{d\tau}\right)_{max}$, град/мин	τ , сек	$\left(\frac{dt}{d\tau}\right)_{max}$, град/мин
1	6627	60	71,8
2	2163	120	36
10	313	180	21,5
20	181	240	14,7
30	129,6	300	11,8

Повышение тока дуги (при неизменной ее длине) приводит к повышению средней температуры ванны, что связано с увеличением мощности дуги.

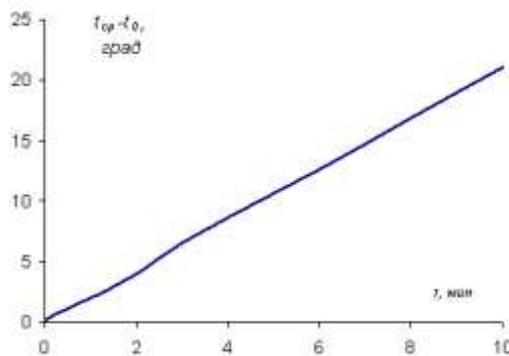


Рисунок 2.22 – Зависимость средней температуры в ванне расплава ДППТ от времени

2.3.2.2 Результаты моделирования процесса десульфурации в ванне ДППТ

Определим изменение концентрации FeS в ванне ДППТ при одношлаковом рафинировании и время проведения процесса десульфурации. По уравнению (7.57) находим конечное содержание примеси. Принимая $\Phi_{\text{ш}}^- = C_0 = 0,01\%$, $g_{\text{шл}} = 10\%$, $L_E = 10$, получаем $\Phi_{\text{к}}^- = 0,005\%$, принимая концентрацию примеси в шлаке $C_{\text{шл}} = (C) = 0,001\%$. Выбираем из таблицы коэффициент молекулярной диффузии серы в стали $D = 3,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

На рисунке 2.23 приведены результаты моделирования распределения концентраций по ванне в различные моменты времени после наведения шлака. Как и в случае распределения температурного поля, массоперенос формируется ЭВТ. Видно, что на поверхности ванны и области вблизи ее оси концентрация примеси довольно низкая. Видно также, что скорость удаления примеси минимальна на периферии ванны.

Средняя по ванне концентрация примеси \bar{C} , определяемая по формуле аналогичной (2.52), однако в отличие от температуры она с течением времени постепенно падает (рисунке 2.24).

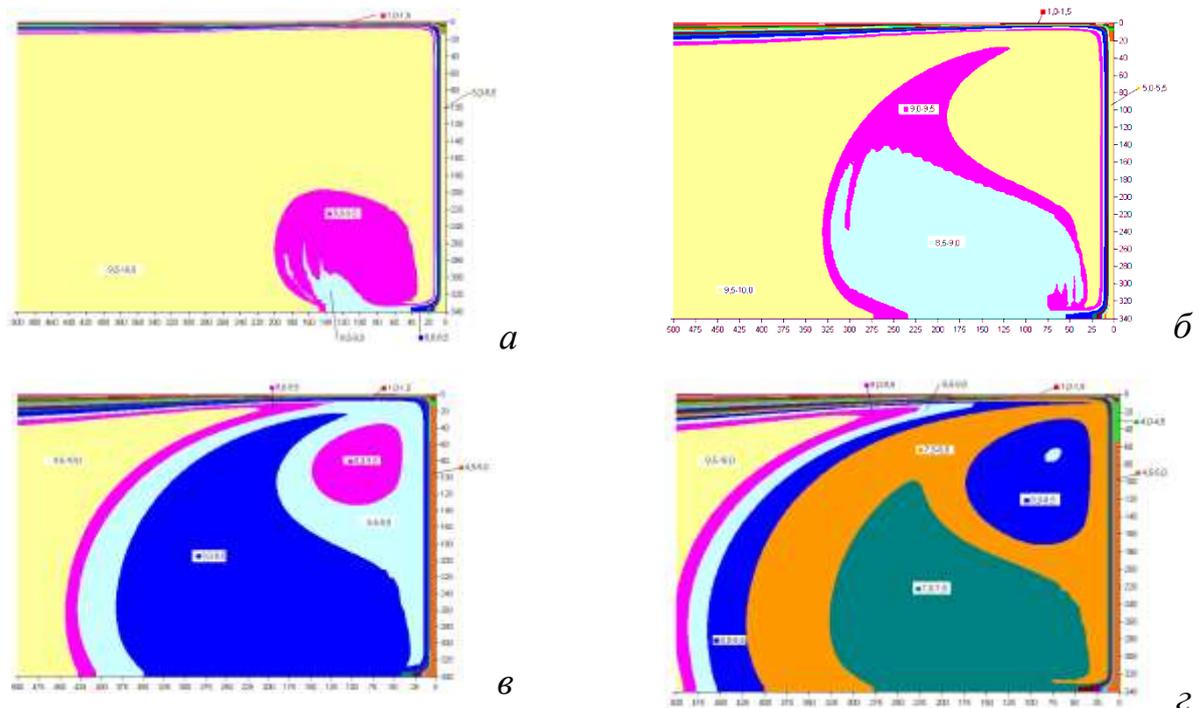


Рисунок 2.23 – Распределение концентраций (в тысячных долях процента) в ванне в различные моменты времени: а – 1 мин; б – 5 мин; в – 15 мин; г – 25 мин

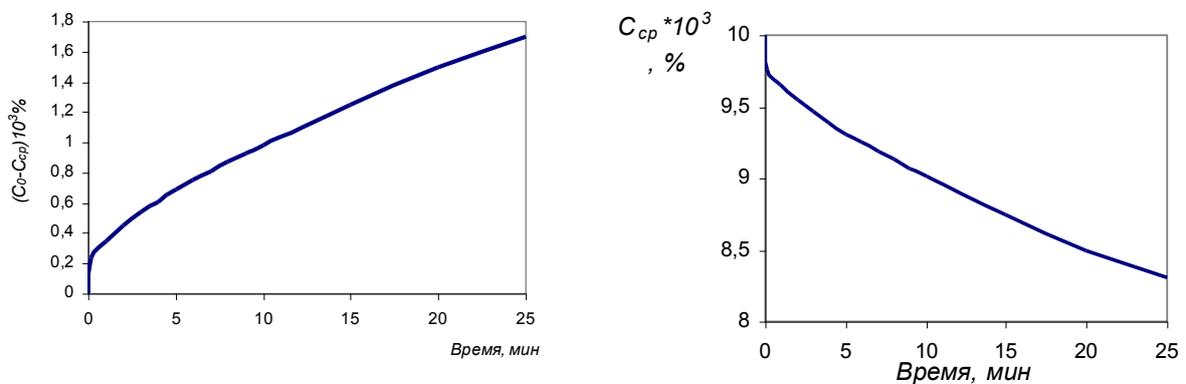


Рисунок 2.24 – Изменение средней концентрации серы в ванне расплава ДППТ от времени

Зная изменение средней концентрации примеси по ванне можно определить:

1. Минимальное время проведения процесса десульфурации τ_s определяем выполнением условия $\bar{C}(\tau_s) \leq \Phi_k^-$. Для рассматриваемых условий

$$\bar{C}(\tau) = [C]_n e^{-0,0067\tau} \quad (2.75)$$

Подставляя исходные данные, получим $\tau_s \approx 100$ мин.

2. Было получено время перемешивания расплава $\tau_{пер} = 66$ мин.

2.3.3 Рекомендации по использованию результатов проведенных НИР

Разработаны алгоритмы и создан программный продукт «ЭВТ-2», позволяющий проанализировать нестационарное температурное и концентрационное поля в ванне расплава с учетом ЭВТ.

Установлено снижение перепада температур между средними температурами поверхности и подины ванны при увеличении ее глубины, что объясняется увеличением интенсивности ЭВТ.

Разработан алгоритм определения параметров перемешивания расплава и определения минимального времени необходимого на проведение процесса рафинирования металла.

2.4 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования теплового состояния расплава в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок

2.4.1 Систематизация и оценка полученных результатов

2.4.1.1 Алгоритм и численная реализация математической модели процесса затвердевания непрерывно-литой заготовки

На первом этапе выполнения работ была определена математическая модель для описания теплового состояния заготовки при нахождении ее на технологической линии. Для программной реализации этой модели необходимо представить ее в конечно-разностном виде.

Уравнение теплопроводности запишем в разностном виде, используя конечно-разностную явную схему в декартовой системе координат [71–73]. Шаблон схемы представлен на рисунке 2.25.

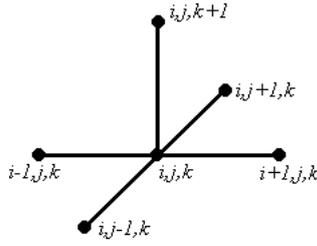


Рисунок 2.25 – Шаблон явной конечно разностной схемы для уравнения теплопроводности

В плоскости поперечного сечения непрерывно-литой заготовки введем сеточную функцию $T(i,j,k)$ со значениями температуры в каждой точке. Требуется при известных значениях сеточной функции на k -м слое найти ее значение на $k+1$ -м слое, где $i = \overline{0, n}$, $j = \overline{0, m}$.

Выполним замену частных производных конечными разностями для двух ближайших слоев по формулам:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau} \quad \text{и} \quad \frac{\partial \lambda}{\partial x} = \frac{\lambda_{i+1,j}^k - \lambda_{i,j}^k}{\Delta x} \quad \text{и} \quad \frac{\partial \lambda}{\partial y} = \frac{\lambda_{i,j+1}^k - \lambda_{i,j}^k}{\Delta y}; \quad (2.75)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial \lambda}{\partial T} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (2.76)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial \lambda}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial \lambda}{\partial T} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (2.77)$$

Тогда после упрощения решение уравнения примет вид

$$T_{i,j}^{k+1} = \Delta \tau \cdot A_{i,j} \times \left[B_{ij} \cdot \left(\frac{T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k}{\Delta x} \right)^2 + \lambda_{i,j}^k \frac{T_{i-1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i+1,j}^k}{\Delta x^2} \right] + \Delta \tau \cdot A_{i,j} \left[B_{ij} \cdot \left(\frac{T_{i,j+1}^k - T_{i,j}^k}{\Delta y} \right)^2 + \lambda_{i,j}^k \frac{T_{i,j-1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j+1}^k}{\Delta y^2} \right] + T_{i,j}^k, \quad (2.78)$$

где $A_{ij} = \left(c_{i,j}^k \rho_{i,j}^k + \frac{L}{c_{i,j}^k} \cdot \frac{1}{1-k} \cdot \frac{1}{\beta C_0} \lambda_A - T_{i,j}^k \frac{2-k}{k-1} \right)^{-1}$ для двухфазной зоны и $A_{ij} = c_{ij}^k \rho_{ij}^k -$

для твердой и жидкой фазы;

$$B_{ij} = 0,09 \cdot sh \left[\frac{0,245 \lambda_{ij}^k - 975}{100} \right] \cdot \left(ch \left[\frac{0,245 \lambda_{ij}^k - 975}{100} \right] \right)^{-2} - \text{значение } \frac{\partial \lambda_{ij}^k}{\partial T} \text{ в}$$

точке (x_i, y_j) с.

Начальное условие запишется в виде

$$T_{i,j}^0 = f(x_i, y_j, 0). \quad (2.79)$$

Граничные условия примут вид:

$$D_{0j} \cdot \lambda_{0j}^{k+1} + C_{0j} - 1 \bar{T}_{0j}^{k+1} = C_{0j} \cdot U_{0j}^{k+1} + D_{0j} \cdot \lambda_{0j}^{k+1} - T_{1j}^{k+1}; \quad (2.80)$$

$$D_{nj} \cdot \lambda_{nj}^{k+1} + C_{nj} - 1 \bar{T}_{nj}^{k+1} = C_{nj} \cdot U_{nj}^{k+1} + D_{nj} \cdot \lambda_{nj}^{k+1} - T_{n-1,j}^{k+1}; \quad (2.81)$$

$$D_{i0} \cdot \lambda_{i0}^{k+1} + C_{i0} - 1 \bar{T}_{i0}^{k+1} = C_{i0} \cdot U_{i0}^{k+1} + D_{i0} \cdot \lambda_{i0}^{k+1} - T_{i1}^{k+1}; \quad (2.82)$$

$$D_{i0} \cdot \lambda_{i0}^{k+1} + C_{i0} - 1 \bar{T}_{i0}^{k+1} = C_{i0} \cdot U_{i0}^{k+1} + D_{i0} \cdot \lambda_{i0}^{k+1} - T_{i1}^{k+1}. \quad (2.83)$$

В уравнениях (4.9) и (4.10) коэффициенты имеют вид

$$C_{ij} = \frac{\alpha_{ij}^{k+1} \cdot \Delta x}{\lambda_{ij}^k} \text{ и } D_{ij} = \frac{\sigma_{ij}^{k+1} \cdot \Delta x}{100 \cdot \lambda_{ij}^k}, \text{ где } i=0 \text{ и } i=n \text{ при } j = \overline{0, m}.$$

В уравнениях (2.82) и (2.83) коэффициенты имеют вид

$$C_{ij} = \frac{\alpha_{ij}^{k+1} \cdot \Delta y}{\lambda_{ij}^k} \text{ и } D_{ij} = \frac{\sigma_{ij}^{k+1} \cdot \Delta y}{100 \cdot \lambda_{ij}^k}, \text{ где } j=0 \text{ и } j=n \text{ при } i = \overline{0, n}.$$

Решение по приведенной разностной задаче будет сходиться к истинным значениям при выполнении условия

$$\Delta \tau < \left(\max_{\substack{i=1, n \\ j=1, m}} \left\{ \lambda_{i,j}^k \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right) \right\} \right)^{-1}, \text{ где } n \in \mathbb{N}, m \in \mathbb{N}. \quad (2.84)$$

На рисунке 2.26 приведена схема наложения выбранного шаблона на плоскость поперечного сечения непрерывно-литой заготовки.

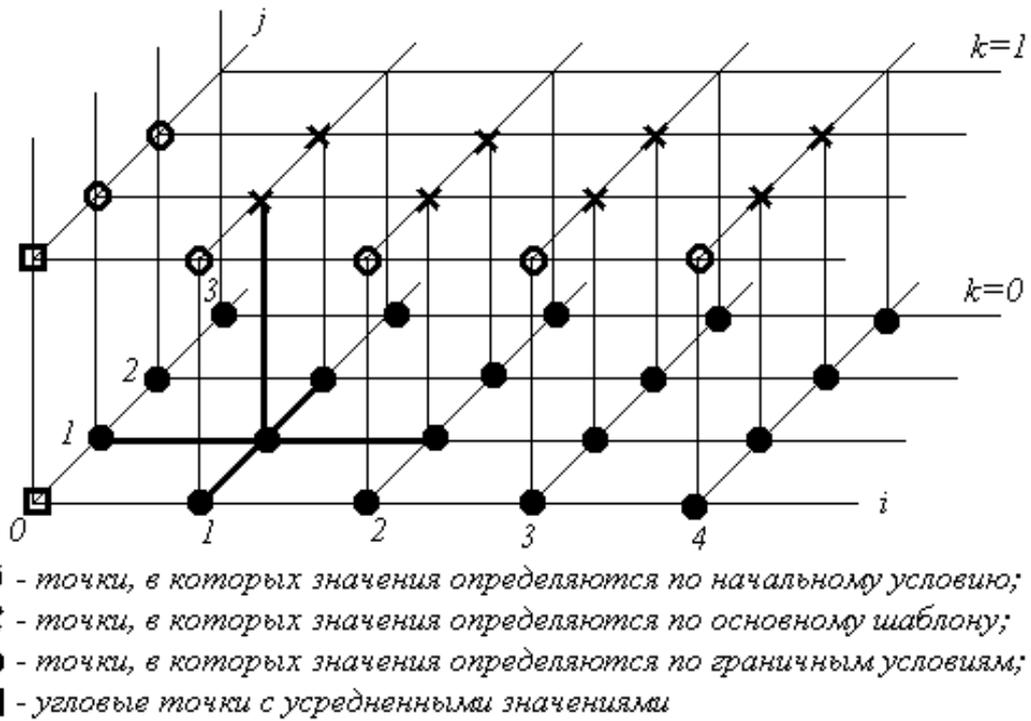


Рисунок 2.26 – Схема наложения шаблона явной схемы на плоскости поперечного сечения непрерывно-литой заготовки

Вычислительная процедура по (2.78) – (2.84) была организована по алгоритму, блок-схема которого приведена на рисунке 2.27.

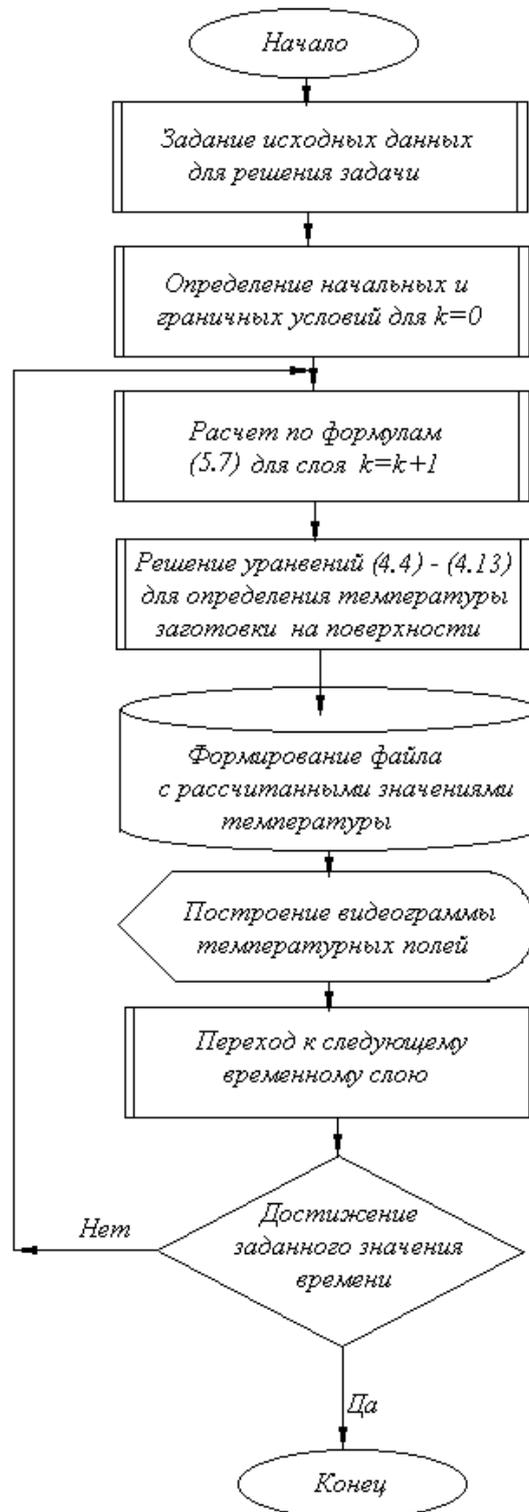


Рисунок 2.27 – Блок-схема процедуры определения температурных полей в поперечных сечениях непрерывно-литой заготовки

2.4.1.2 Алгоритм неградиентного метода случайного поиска с операторами адаптации для многокритериальной задачи при условии снижения внутренних термических напряжений в непрерывно-литой заготовке

Цель оптимизации может быть сформулирована следующим образом: определить такие режимы охлаждения непрерывно-литой заготовки в МНЛЗ, чтобы в течение заданного времени разливки одной плавки достичь равномерного снижения температуры по сечению заготовки и при этом получить заданную температуры поверхности заготовки перед машиной газовой резки, максимальную среднемассовую температуру при минимально возможном расходе охладителя.

Формальная постановка этой проблемы в терминах задачи оптимизации и теории предпочтения критериев запишется в виде:

– множество допустимых решений: X – матрица-строка управления, состоящая из набора значений коэффициентов теплоотдачи с поверхности непрерывно-литой заготовки и построенная по (2.75) – (2.76);

– вектор критериев: $SelY = f = f(f_1, f_3, f_4, f_7, f_8, f_9, f_{10})$;

– отношение предпочтения критериев: $f_4 \succ f_3 \succ f_7 \succ f_8 \succ f_9 \succ f_{10} \succ f_1$.

Для решения поставленной многокритериальной задачи применен неградиентный метод случайного поиска с операторами адаптации. Использование этого метода подразумевает введение функции потерь между требуемыми значениями выходного сигнала и реального выходного сигнала системы. Так как рассматриваемая задача является многокритериальной, то для ряда критериев введем ограничения, такие как скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, времени разливки одной плавки и расход охладителя, а для других введем функцию потерь – для среднемассовых температур, температуры поверхности заготовки перед машиной газовой резки и для темпа снижения температур по сечению заготовки.

Критерий по величине скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора переведем в ограничения, которые формируются по производственному заказу, и интервал ограничений составляет от 0,45 до 1,5 м/мин. В численной реализации метода эта величина входит в состав исходных данных. При моделировании процесса охлаждения заготовки величина скорости вытягивания не остается постоянной, так как в ходе разливки предусмотрено плановое изменение скорости и существует воздействие случайной компоненты.

Время разливки одной плавки является зависимой величиной от скорости вытягивания и может быть определено по формуле

$$\tau = \frac{V}{a \cdot b \cdot v}, \quad (2.85)$$

где V – объем одной плавки, м^3 ; a, b – геометрические размеры сечения заготовки, м ; v – скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, м/мин .

Определение расхода охладителя в каждой зоне вторичного охлаждения можно представить как

$$M_i = \frac{\alpha_i S_{op} (t_n - t_1)}{C_{H_2O} (1-x) (t_2 - t_1) + x (40 - t_1)}, \quad (2.86)$$

где M_i – расход воды в i -й зоне вторичного охлаждения, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$; α_i – коэффициент теплоотдачи в i -й зоне вторичного охлаждения, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$; t_n – средняя массовая температура в поверхностном слое заготовки, $^\circ\text{C}$, x – коэффициент испарения охладителя, значения которого идентифицированы.

Определим функции потерь для критериев, которые должны принимать экстремальные значения.

Функция потерь для величины, описывающей разность температур по сечению заготовки:

$$l_1 \Delta T_{\text{тр}}, \Delta T_p = \begin{cases} \min_{\substack{0 \leq i \leq n \\ 0 < j \leq n}} \left\{ \frac{|T_{i+1,j} - T_{i,j}|}{\Delta x} \right\}; & \text{при } \min_{\substack{0 \leq i \leq n \\ 0 < j \leq n}} \left\{ \frac{|T_{i+1,j} - T_{i,j}|}{\Delta x} \right\} > \Delta T_{\text{тр}}; \\ 0, & \text{при } \max_{\substack{0 \leq i \leq n \\ 0 < j \leq n}} \left\{ \frac{|T_{i+1,j} - T_{i,j}|}{\Delta x} \right\} \leq \Delta T_{\text{тр}}, \end{cases} \quad (2.87)$$

где $\Delta T_{\text{тр}}$ – требуемое значение выходного сигнала, определенное экспериментальными способами, при котором существует наименьшая угроза нарушения сплошности заготовки и, в частности, образование внутренних трещин, перпендикулярных широкой грани заготовки. Методика таких экспериментов описана в [74, с. 56–58]. В этой работе приведены следующие данные по конструкционным маркам стали при охлаждении образцов с литой структурой: в образце образовывались трещины при перепаде температур на 1 мм длины в 7°C и более для стали марки Ст75; в 4°C и более – для стали марки Ст65Г и т. д. Значение функции потерь определяется на границе зон вторичного охлаждения.

Функция потерь для такого технологического параметра, как температура поверхности непрерывно-литой заготовки перед машиной газовой резки может быть записана в виде

$$l_2 T_{\text{тр}}; T_p = \begin{cases} \min_{\substack{0 \leq i \leq n \\ 0 \leq j \leq n}} |T_{i,j}^{T_{\text{кон}}} - T_{\text{тр}}|, & \text{при } \min_{\substack{0 \leq i \leq n \\ 0 \leq j \leq n}} |T_{i,j}^{T_{\text{кон}}} - T_{\text{тр}}| > T_{\text{кр}}; \\ 0, & \text{при } \max_{\substack{0 \leq i \leq n \\ 0 \leq j \leq n}} |T_{i,j}^{T_{\text{кон}}} - T_{\text{тр}}| \leq T_{\text{кр}}, \end{cases} \quad (2.88)$$

где $T_{\text{тр}}$ – требуемая температура поверхности заготовки перед машиной газовой резки, задаваемая производственными условиями на складирование или транзит слябов. Величина требуемой температуры может принимать значения из интервала от температуры окружающей среды до 1250°C . В идеале требуемое значение температуры поверхности не должно отличаться от полученной, однако, учитывая неравномерность распределения температурного поля, принимают, что существует некоторое различие, не превышающее заданного критического значения.

Аналогичным образом строим функции потерь для среднемассовой температуры в поверхностных слоях заготовки со стороны большого и малого радиуса МНЛЗ (2.89), (2.90) и среднемассовой температуры по всему объему заготовки (2.91).

$$l_3(T_{\text{псмб}}; T_{\text{тр}}) = \begin{cases} \left| \sum_{k=0}^{\tau_{\text{кон}}} \sum_{i=0}^n T_{i,0}^k - T_{\text{тр}} \right|, & \text{при } \left| \sum_{k=0}^{\tau_{\text{кон}}} \sum_{i=0}^n T_{i,0}^k - T_{\text{тр}} \right| > T_{\text{кр}}, \\ 0, & \text{при } \left| \sum_{k=0}^{\tau_{\text{кон}}} \sum_{i=0}^n T_{i,0}^k - T_{\text{тр}} \right| \leq T_{\text{кр}}; \end{cases} \quad (2.89)$$

$$l_4(T_{\text{псмм}}; T_{\text{тр}}) = \begin{cases} \left| \sum_{k=0}^{\tau_{\text{кон}}} \sum_{i=0}^n T_{i,n}^k - T_{\text{тр}} \right|, & \text{при } \left| \sum_{k=0}^{\tau_{\text{кон}}} \sum_{i=0}^n T_{i,n}^k - T_{\text{тр}} \right| > T_{\text{кр}}, \\ 0, & \text{при } \left| \sum_{k=0}^{\tau_{\text{кон}}} \sum_{i=0}^n T_{i,n}^k - T_{\text{тр}} \right| \leq T_{\text{кр}}; \end{cases} \quad (2.90)$$

$$l_5(T_{\text{смo}}; T_{\text{тр}}) = \begin{cases} \left| \sum_{k=0}^{\tau_{\text{кон}}} \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^n T_{i,j}^k - T_{\text{тр}} \right|, & \text{при } \left| \sum_{k=0}^{\tau_{\text{кон}}} \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^n T_{i,j}^k - T_{\text{тр}} \right| > T_{\text{кр}}, \\ 0, & \text{при } \left| \sum_{k=0}^{\tau_{\text{кон}}} \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^n T_{i,j}^k - T_{\text{тр}} \right| \leq T_{\text{кр}}. \end{cases} \quad (2.91)$$

Для многокритериальной задачи получили пять функций потерь, которые не допускают дифференцирования. Поэтому говорить о градиенте нет смысла, и метод поиска решения многокритериальной задачи по этим функциям, соответствующим критериям оптимальности для задачи выбора режимов охлаждения непрерывно-литой заготовки, будем называть неградиентным.

Так как определен вид и структура управляющего воздействия, то задачу можно отнести к параметрическому виду. Принципиальной особенностью случайного поиска как метода оптимизации систем является наличие в алгоритмах поиска механизма случайных явлений [74, с. 42–59; 75, с. 22–41]. В градиентном методе случайного поиска этими величинами являются те, которые определяют величину шага и знака и задают направления поиска. В неградиентном случайном поиске случайными являются элементы матрицы или, в нашей задаче, параметры функции управления.

Первоначальное приближение искомых параметров задается априорными многогранниками возможных решений, которые будут сужаться или расширяться по апостериорным значениям функций потерь (2.87) – (2.91).

Направление сужения или расширения интервала случайного поиска может быть определено только на основе априорного физического объяснения протекающих явлений и схемами взаимосвязи. Реализация изменения интервала случайного поиска для параметров управляющей функции выполнена на основе операторов адаптации.

Схема одного блока оптимизации неградиентном методом случайного поиска показана на рисунке 2.28.

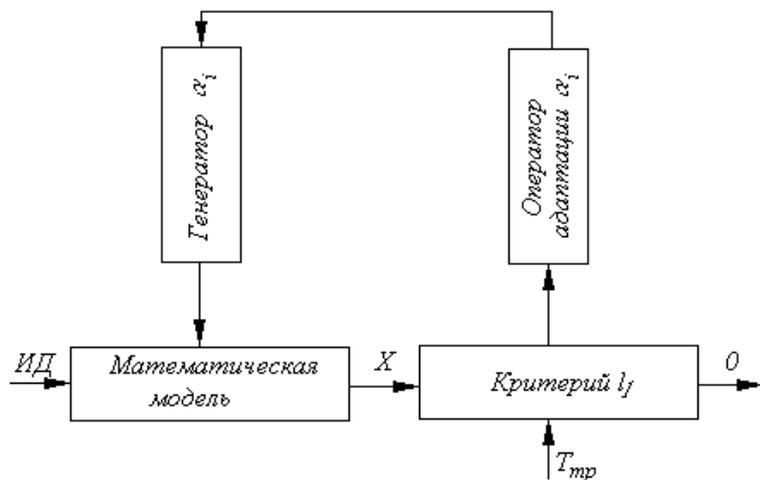


Рисунок 2.28 – Схема одного блока оптимизации неградиентном методом случайного поиска

Блок «Математическая модель» выполняет расчет температурного поля непрерывно-литой заготовки в выбранной зоне вторичного охлаждения для выбранных исходных данных по алгоритму, приведенному на рисунке 2.27. При первом входе в цикл оптимизации выбираем коэффициент теплоотдачи для i -й зоны по верхней границе многогранника допустимых решений. Учитывая, что при более высоких коэффициентах теплоотдачи теплоотвод проходит более интенсивно, следует предположить, что необходимо будет выполнить сужение интервала в сторону уменьшения этого

значения. «Оператор адаптации α_i » предполагает изменение интервала для многогранника решения от минимального значения до выбранного случайным образом блоком «Генерации α_i ». Дальнейшая адаптация проводится по значениям α_i двух предыдущих шагов. Схема областей для оператора адаптации приведена на рисунке 2.29 и блок-схема оператора адаптации – на рисунке 2.30. Адаптация выполняется до тех пор, пока значение функции потерь не станет равным нулю. Это позволяет выполнить переход к следующей зоне вторичного охлаждения, для которой этот блок должен повториться. Ввод значения $T_{тр}$ позволяет работать в режиме автоматизированного управления процессом оптимизации.

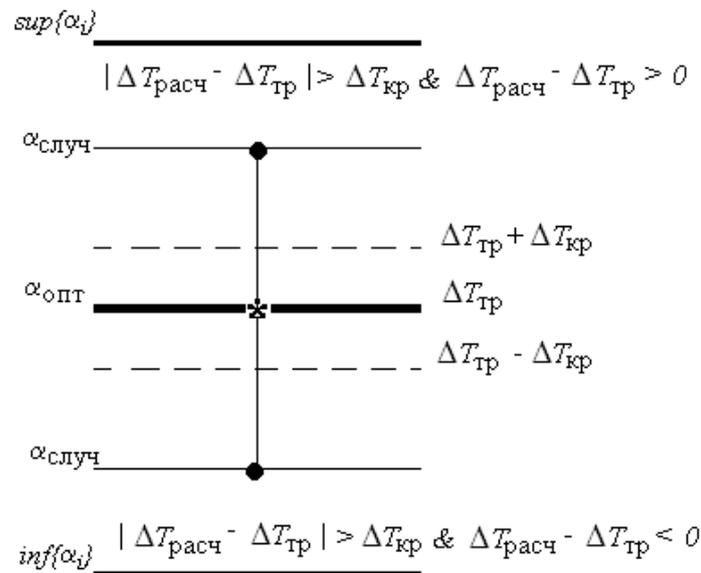


Рисунок 2.29 – Схема областей для оператора адаптации

Для блок-схемы на рис. 2.30 при первом входе в оператор адаптации значение $A = \sup \alpha_i$, значение $B = \inf \alpha_i$ и первое значение $\alpha_i = md \cdot (A - B) + B$.

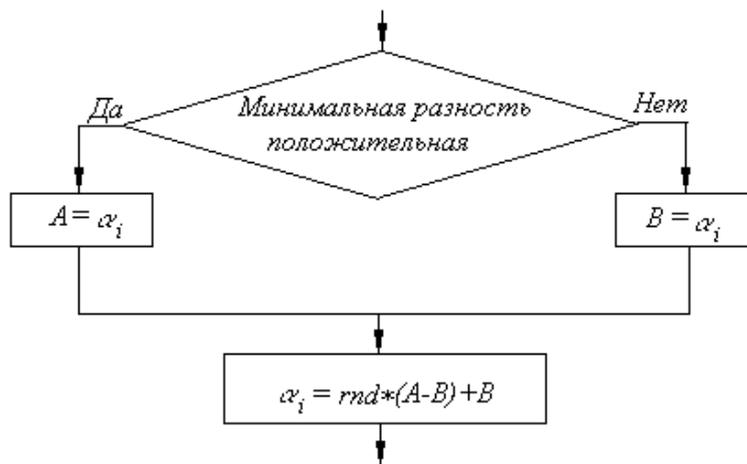


Рисунок 2.30 – Блок-схема оператора адаптации в процессе оптимизации для одной зоны вторичного охлаждения

Полная схема процесса оптимизации состоит из девяти блоков, приведенных на рисунке 2.28, и дополнительных операторов адаптации по функциям (2.88) – (2.91). Полная схема процесса оптимизации приведена на рисунке 2.31.

Каждый блок процесса оптимизации многокритериальной задачи определен для соответствующей зоны вторичного охлаждения МНЛЗ. Переход к следующему блоку оптимизации возможен только в том случае, если функция потерь в предыдущем принимает нулевой значение, то есть удовлетворяет первому критерию задачи.

После прохода всех блоков проверяется требование по температуре поверхности заготовки перед машиной газовой резки. Если функция потерь не принимает нулевое значение, то необходимо пересмотреть охлаждение, начиная с седьмой зоны для слябовой МНЛЗ и с четвертой зоны для сортовой (условия перехода для сортовой МНЛЗ показаны штриховой линией на рисунке 2.31). В качестве уступок на управление для этого блока может быть использовано изменение требований как на температуру поверхности заготовки, так и на перепад температур по сечению заготовки [80, с. 154 – 161; 81].

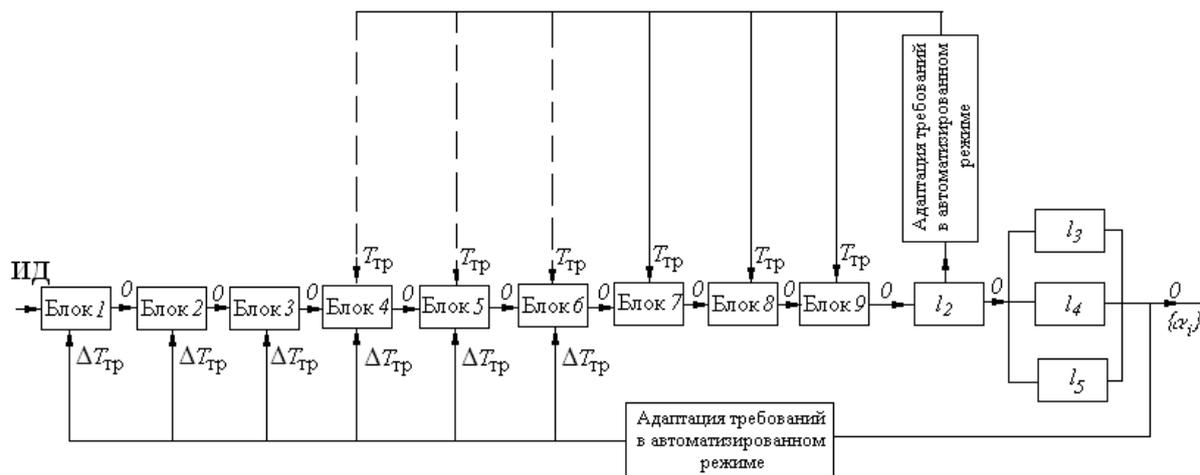


Рисунок 2.31 – Общая схема процесса оптимизации многокритериальной задачи выбора режимов охлаждения для непрерывно-литой заготовки

При нулевом значении функции потерь l_2 проверяются значения функций l_3 , l_4 и l_5 . Проверку этих значений можно производить параллельно, так как связанные с ними критерии одновременно должны принимать или максимальное, или минимальное значение. Если значения этих функций не принимают нулевое значение, то необходимо пересмотреть процесс охлаждения заготовки, начиная с первой зоны вторичного охлаждения как для слябового, так и сортового агрегата.

В качестве управляющего воздействия в этом случае должны использоваться значения интервала $\Delta T_{кр}$ для каждой зоны вторичного охлаждения. При повышенных значениях среднemasсовых температур значение $\Delta T_{кр}$ должно возрастать до возможных допустимых по термическим напряжениям. И соответственно при пониженных значениях среднemasсовых температур значение $\Delta T_{кр}$ должно уменьшаться до возможных допустимых значений.

При нулевых значениях всех функций потерь будем считать, что найдено оптимальное решение. В качестве результата принимаем множество коэффициентов теплоотдачи и температурное поле непрерывно-литой

заготовки по всей ее металлургической длине во всех точках введенной сеточной функции.

2.4.2 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей

2.4.2.1 Скорость поиска и сходимость процесса адаптации в неградиентном методе случайного поиска решения многокритериальной задачи оптимизации

Условимся далее называть сеансом поиска процесс, при котором на вход системы подается реализация входного сигнала и на выходе системы формируется реализация выходного сигнала. Событие Θ , состоящее в том, что получено оптимальное состояние системы с заданной погрешностью, в данном случае может произойти, а может и не произойти.

Пусть Ω_n – количество сеансов поиска до того момента, в который событие Θ произошло. Тогда время общего поиска составит

$$T_{\text{поиска}} = \Omega_n \cdot t_n, \quad (2.92)$$

где t_n – время выполнения одного сеанса или назовем его скоростью скоростью поиска.

Величина t_n в большей степени определяется временем реализации математической модели по алгоритму, приведенному на рисунке 2.27. Учитывая, что при реализации модели используется явная схема, и шаг по времени зависит от размера сетки по осям координат, можно оценить, сколько временных шагов необходимо выполнить в процессе моделирования для каждой зоны.

Рассмотрим заготовку прямоугольного сечения $250 \times 1250 \text{ мм}^2$ и моделирование процесса ее затвердевания в первой зоне, длина которой на МНЛЗ в ККЦ ОАО «ММК» составляет 0,15 м при скорости разливки 0,8 м/мин. Определим размер разностной сетки в 126 узлов по оси Ox и 26

по оси OY , тогда шаги по осям координат составят $\Delta x = 0,1$ мм и $\Delta y = 0,1$ мм и соответственно шаг по времени – $0,0025$ с. При заданной скорости вытягивания заготовка в первой зоне будет находиться $11,25$ с, за это время должно быть сформировано 4500 массивов размерностью 126×26 элементов. Если на одну операцию по формированию массива требуется $0,0003$ с, то потребуется $13,5$ с. Итак, время одного сеанса поиска составляет приблизительно 13 с.

Было проведено исследование генератора случайных чисел на одном из промежутков многогранника решений, в частности для первой зоны большого радиуса МНЛЗ, на основе многократного вычислительного эксперимента для 1000 сеансов генерации [76, 82–85; 77 с. 118–125]. В результате надо отметить, что вероятность генерации случайного числа практически равномерно распределена по всему выбранному интервалу (рисунок 2.32), поэтому без использования оператора адаптации процесс оптимизации может затянуться на бесконечно долгое время.

Использование оператора адаптации позволяет «упорядочить» процесс сходимости оптимизационного процесса к некоторому заданному значению или значению, удовлетворяющему условию функции потерь. Аналогичный вычислительный эксперимент показал, что при выбранном операторе адаптации процесс сходится к некоторому выбранному значению приблизительно за 20 шагов итераций. Выборочные результаты этого вычислительного эксперимента приводятся на рисунке 2.33.

Количество сеансов поиска составляет не более 20. Поэтому максимальное общее время процесса оптимизации будет не более 270 с.

Исследования по скорости вычислительного процесса и по его сходимости позволяют утверждать, что выбранный метод оптимизации и форма оператора адаптации позволяют получить оптимальное решение задачи за конечное время, которое превышает время реального процесса на-

хождения непрерывно-литой заготовки на технологической линии МНЛЗ, и поэтому требуется разработка полуэмпирических закономерностей и технологических таблиц для режимов непрерывной разливки стали на МНЛЗ.

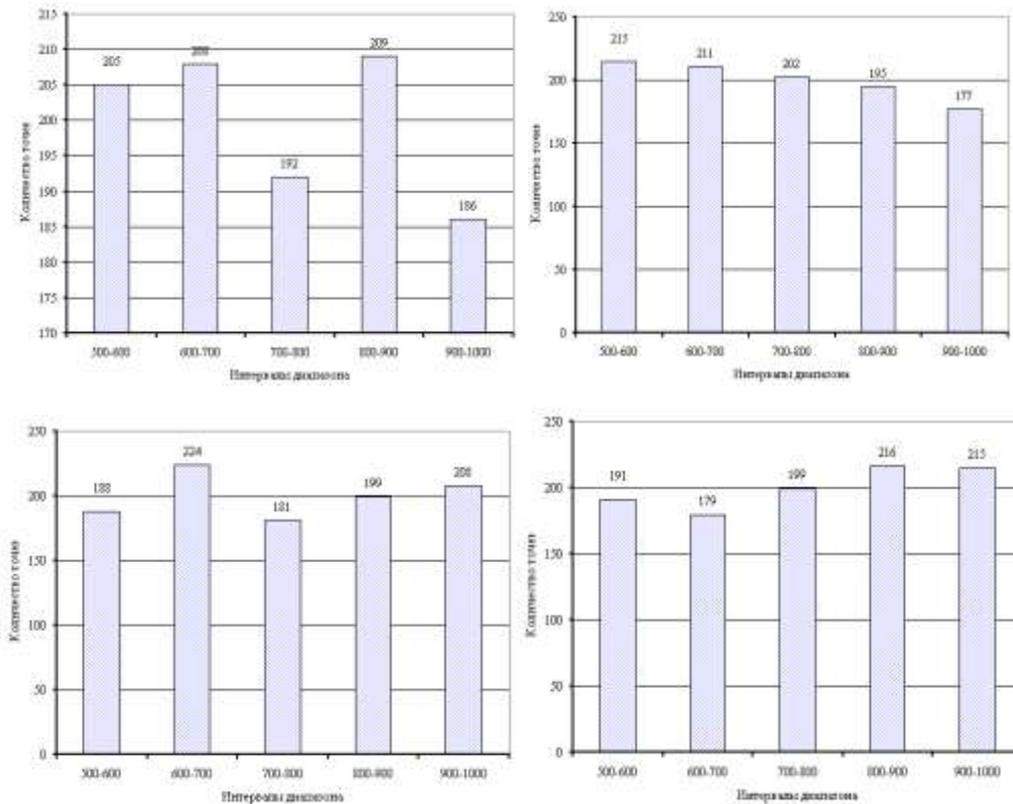


Рисунок 2.32 – Результаты исследования работы генератора случайных чисел для пяти интервалов

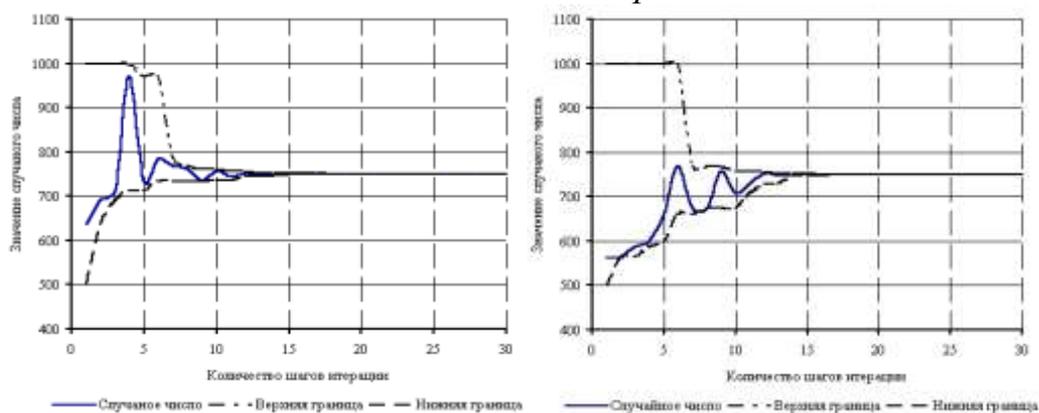


Рисунок 2.33 – Результаты вычислительного эксперимента по исследованию сходимости процесса оптимизации при выбранной форме оператора адаптации

2.4.2.2 Структура программного обеспечения “Steel & Gradient”

Программный продукт “*Steel & Gradient*” предназначен для реализации выбора производственной задачи на основе набора критериев и определения предпочтения выбранных критериев.

Обобщенный алгоритм выбора производственных целей, набора критериев и их предпочтения приведен на рисунке 2.34. Первоначальный список производственных целей считается пустым, и пользователь в интерактивном режиме должен определить массив ограничений и целевых функций. Для каждого элемента массива в соответствии поставлена математическая формулировка этого элемента. Так же в интерактивном режиме определяется предпочтение элементов массива для каждой диагностируемой зоны вторичного охлаждения.

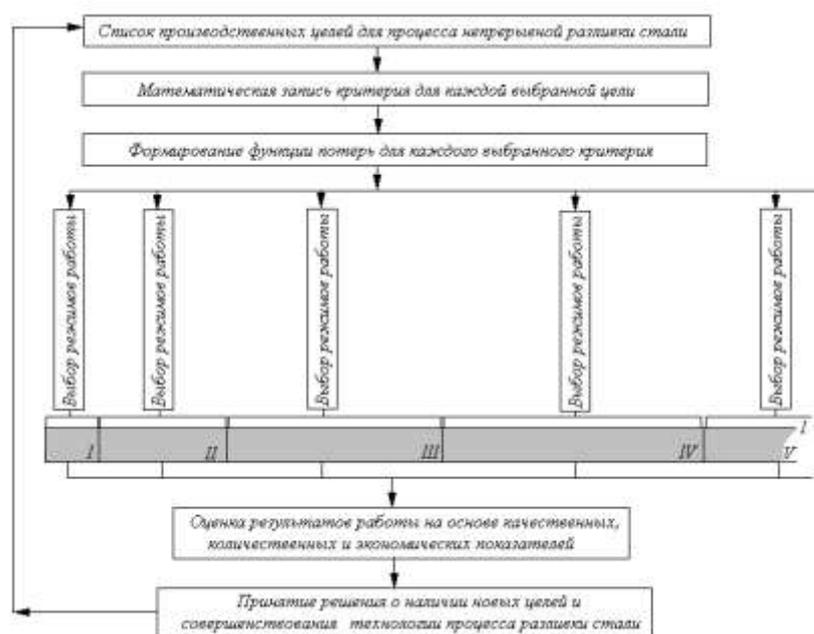


Рисунок 2.34 – Обобщенная схема выбора производственных целей, набора критериев и их предпочтения

Функциональная схема взаимодействия структурных частей приведена на рисунке 2.35. Согласно этой схеме априорные данные и сформированный массив критериев, ограничений и выбранных предпочтений передается в ядро интегрированной системы. Полученные результаты возвращаются в подсистему “*Steel & Gradient*”, в которой происходит их оценка, формируется

новый список с формализацией в массив функций потерь и итерация может быть запущена на следующий шаг.

Таким образом, реализуется итерационная схема решения задачи в многокритериальной среде с имитатором события и множеством генераторов исходных данных (см. рисунок 2.36) [78, с. 417–421; 79, с. 117–121].

На рисунке 2.36 в качестве имитатора события рассматривается ядро программного продукта, в котором выполняется решение системы уравнений. Генератор реализует выбор значений коэффициентов теплоотдачи с поверхности заготовки из априорного диапазона. Значения целевых функций рассматриваются как значения запирающего ключа для цикла имитации.

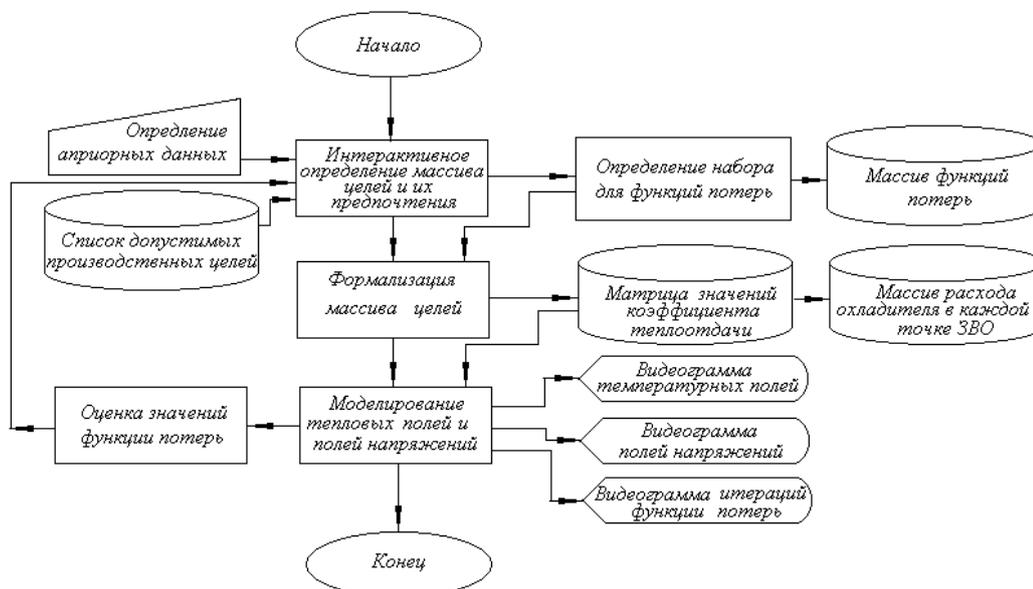


Рисунок 2.35 – Функциональная схема взаимодействия структурных частей “Steel & Gradient”

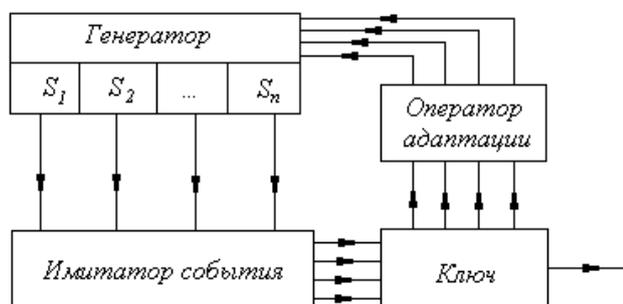


Рисунок 2.36 – Схема решения задачи в многокритериальной среде с имитатором события и множеством генераторов исходных данных

На основе оператора адаптации ускоряем сходимость итерационного процесса по выбору оптимального значения управляющего воздействия, в частности коэффициентов теплоотдачи с поверхности непрерывно-литой заготовки.

На рисунке 2.37 приводится вид диалоговых окон для ввода исходных данных, определения значений для критериев и вывода, получившихся результатов.

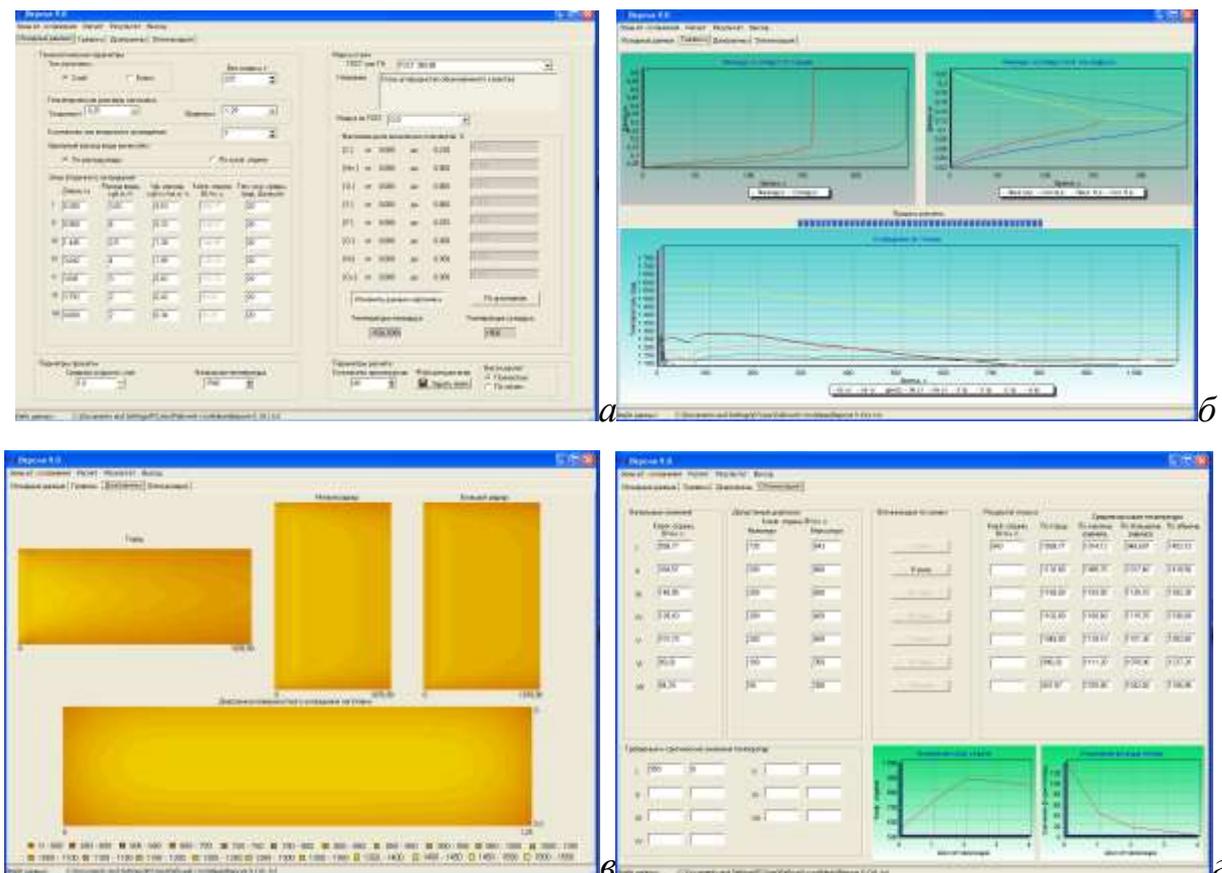


Рисунок 2.37 – Вид диалоговых окон программного продукта

“Steel & Gradient”: а – определение набора исходных данных;

б – графическое представление результатов в виде двумерных диаграмм;

в – графическое представление результатов в виде диаграмм линий уровня;

г – организация процесса оптимизации

2.4.2.3 Структура программного обеспечения “Steel & Cooling”

Программный продукт “Steel & Cooling” предназначен для реализации выбора схемы расстановки форсунок. Функциональная схема взаимодейст-

вия структурных частей приведена на рисунке 2.38. Согласно этой схеме априорные данные, существующая схема расстановки форсунок и предлагаемые расходы охладителя передаются в ядро интегрированной системы. Полученные результаты по моделированию тепловых полей возвращаются в подсистему «Steel & Cooling», в которой происходит их оценка, формируется новая схема с учетом значения функции потерь и итерация может быть запущена на следующий шаг.

В ходе процесса выбора формируются результаты в виде файлов текстового формата для хранения матрицы значений коэффициента теплоотдачи с поверхности заготовки по каждой выбранной позиции форсунок и файлов графического формата для сохранения построенной схемы расстановки в интерактивном режиме. Графический анализ данных может быть выполнен на основе видеogramм для температурных полей заготовки в различных ее сечениях, полей термических напряжений и итерационного изменения значения функции потерь на каждом шаге решения.

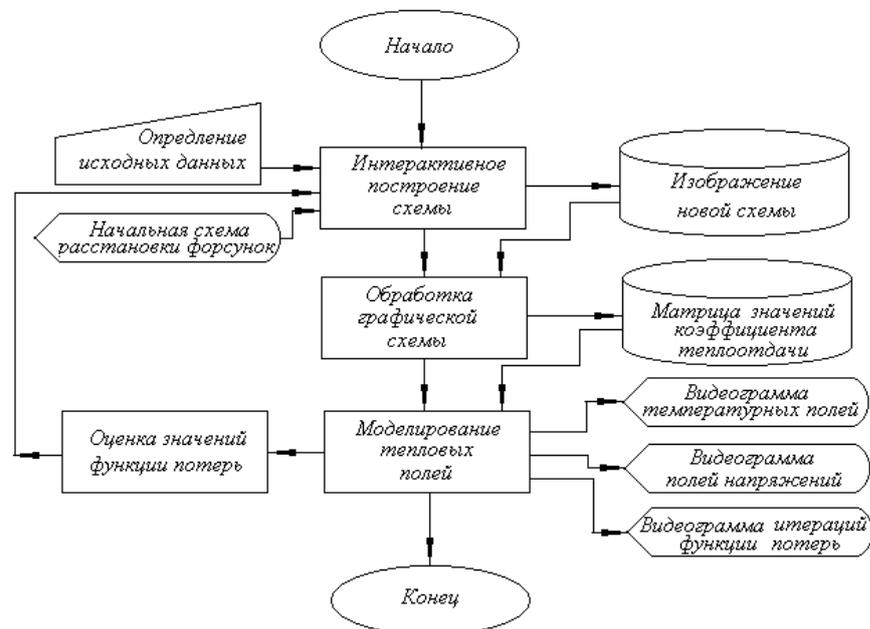


Рисунок 2.38 – Функциональные возможности программного продукта и схема взаимодействия его составных частей

Виды основных диалоговых окон программного продукта *WCooler* для определения исходных данных и графического интерактивного изменения схемы расстановок форсунок приведены на рисунок 2.39 и 2.40.

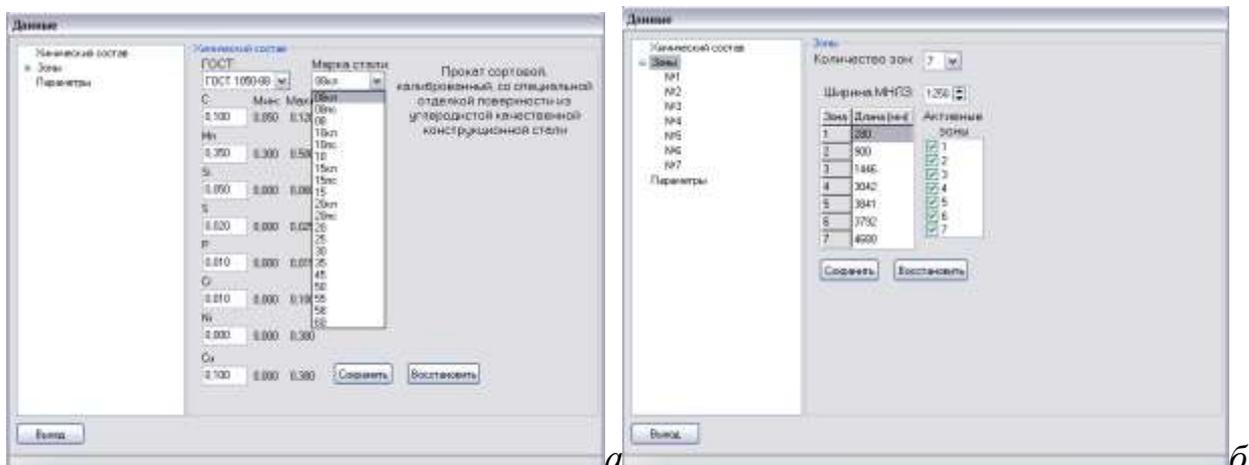


Рисунок 2.39 – Вид диалогового окна для определения исходных данных: а – по процентному содержанию химических элементов в стали; б – по основным технологическим параметрам машины непрерывного литья заготовок

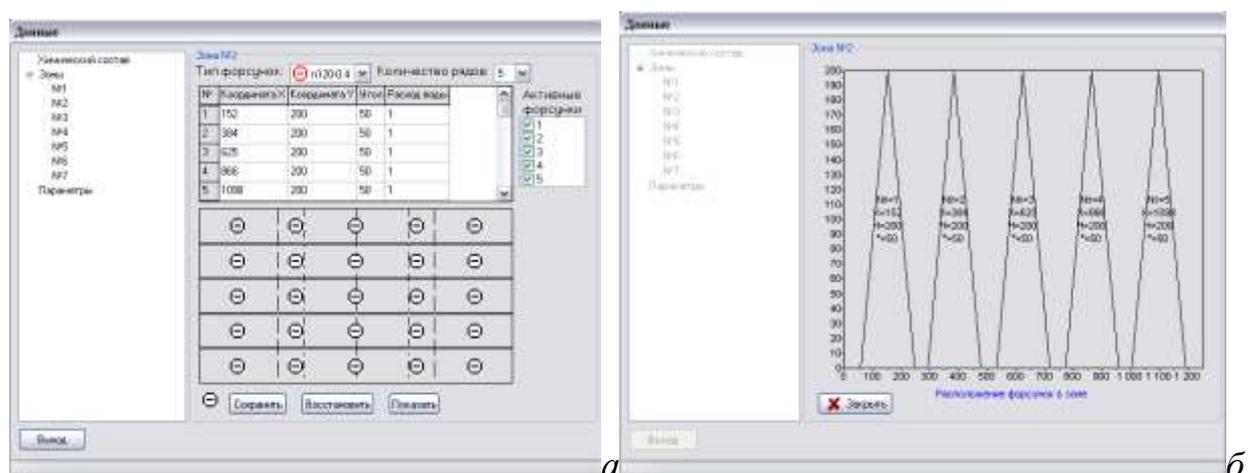


Рисунок 2.40 – Вид диалогового окна для интерактивного изменения схемы расстановки форсунок: а – в режиме интерактивного размещения форсунок; б – в режиме просмотра областей перекрытия факелов форсунок

По результатам работы можно утверждать, что:

1) на основе эмпирических данных и результатов математического моделирования выполнено обоснование необходимости изменения существующей

схемы расстановки форсунок для организации вторичного охлаждения непрерывно-литой заготовки;

2) итерационная природа процесса для построения новых схем расстановки форсунок по ширине заготовки усложняет выбор оптимального решения, делает его ресурсоемким по времени, поэтому для его реализации необходимо использовать технические и программные средства;

3) предлагаемые схемы расстановки форсунок усложняют конструкцию машины непрерывного литья заготовок и, следовательно, обслуживание агрегата, но позволяют обеспечить любой вид распределения значений коэффициента теплоотдачи по ширине заготовки в пределах каждой зоны вторичного охлаждения;

4) использование интерактивного способа построения новых схем расстановки форсунок позволяет реализовать пользовательский интерфейс на основе метафор реального мира;

5) исходные данные для реализации предлагаемого алгоритма выбора схемы расстановки форсунок должны выбираться из единого хранилища данных информационной системы действующего производства.

2.4.2.4 Структура программного обеспечения “Steel & Speed”

Целью разработки программного продукта “*Steel & Speed*” является выполнение диагностики охлаждения непрерывно-литой заготовки в процессе ее нахождения в МНЛЗ в условиях динамического изменения скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора. В программном продукте «*Steel & Speed*» можно выделить основные функциональные части, взаимосвязь между которыми приведена на рисунке 2.41.

Определение исходных данных подразумевает ввод или выбор набора физико-химических и технологических параметров непрерывной разливки стали, за исключением скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора. В качестве исходных данных можно рассматривать первоначальную диа-

грамму скорости, на которой отображены результаты влияния компоненты S_{1i} , полученные по частоте качания кристаллизатора.

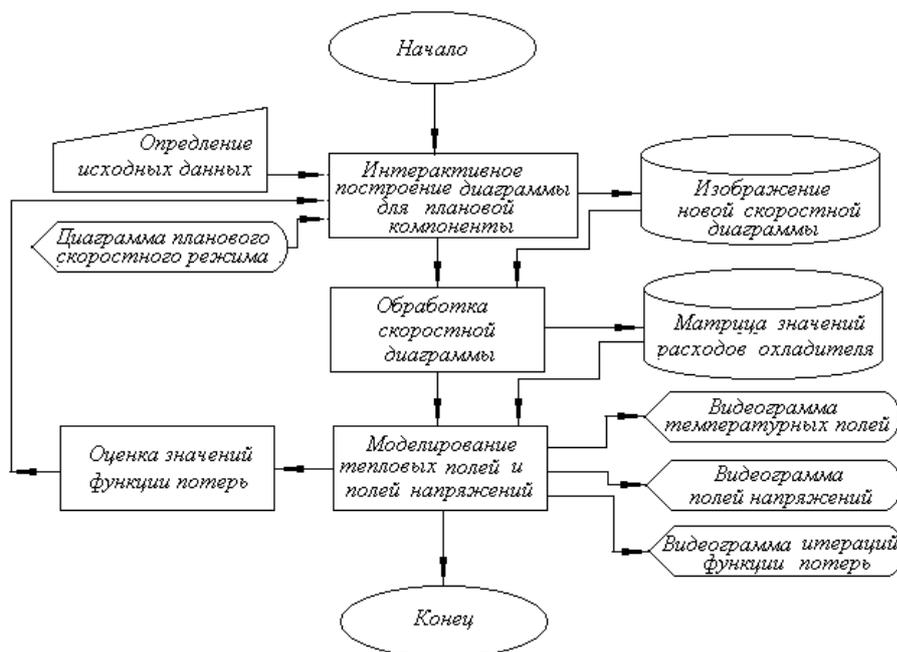


Рисунок 2.41 – Функциональная схема взаимосвязи основных компонент программного продукта “Steel & Speed”

Определение исходных данных подразумевает ввод или выбор набора физико-химических и технологических параметров непрерывной разливки стали, за исключением скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора. В качестве исходных данных можно рассматривать первоначальную диаграмму скорости, на которой отображены результаты влияния компоненты S_{1i} , полученные по частоте качания кристаллизатора.

Первоначальная скоростная диаграмма корректируется в интерактивном графическом режиме для компонент v_i и S_2 . В автоматическом режиме на основе математической модели добавляются компоненты случайной составляющей.

В результате обработки скоростной диаграммы формируется обновленная зависимость коэффициента теплоотдачи и расходов воды, для нее корректируется матрица расходов охладителя согласно существующим эмпирическим зависимостям и схеме расстановок форсунок.

Диаграмма плановой скорости вытягивания строится в интерактивном режиме, устанавливая заданную скорость в заданное время в течение всей разливки стали. График скорости имеет ступенчатый вид. Введенные значения скорости отображаются в таблице. Предусмотрена возможность отменять и возвращать последние введенные значения скорости (рисунке 2.42). Последнее значение скорости должно соответствовать тому времени, в течение которого необходимо произвести расчет.

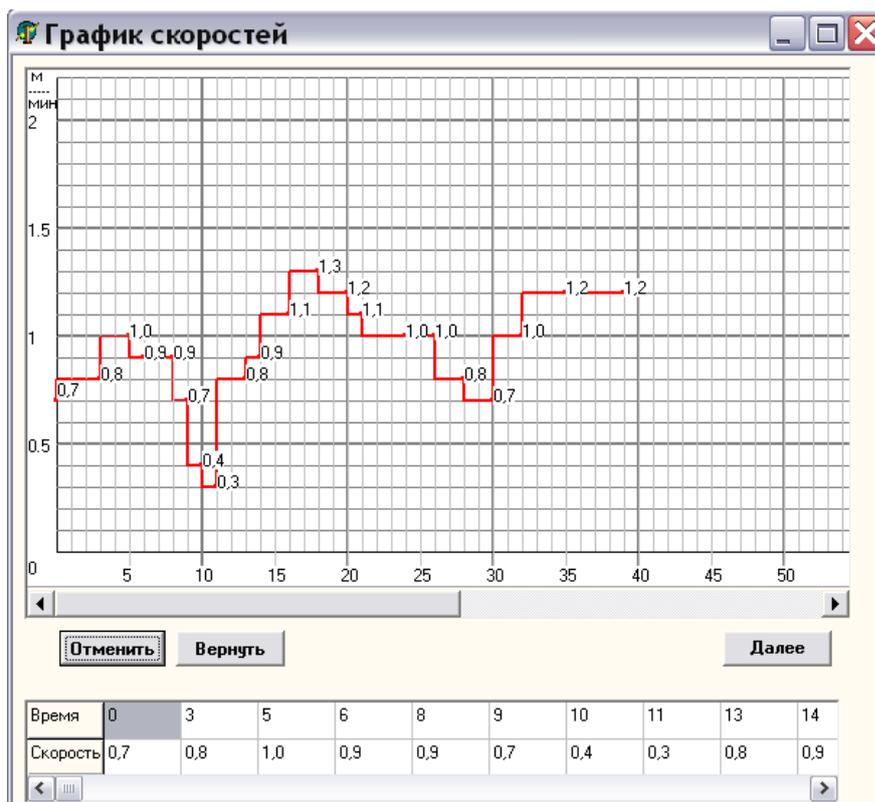


Рисунок 2.42 – Вид диалогового окна для определения плановой компоненты в интерактивном режиме

На основе принятых исходных данных и скорректированной скоростной диаграммы выполняется диагностика поведения охлаждения непрерывно-литой заготовки и оптимизация режимов вторичного охлаждения на основе неградиентного метода случайного поиска с операторами адаптации. Результаты диагностирования представляются графически в виде двух- и трехмерных диаграмм (рисунки 2.43 – 2.45).

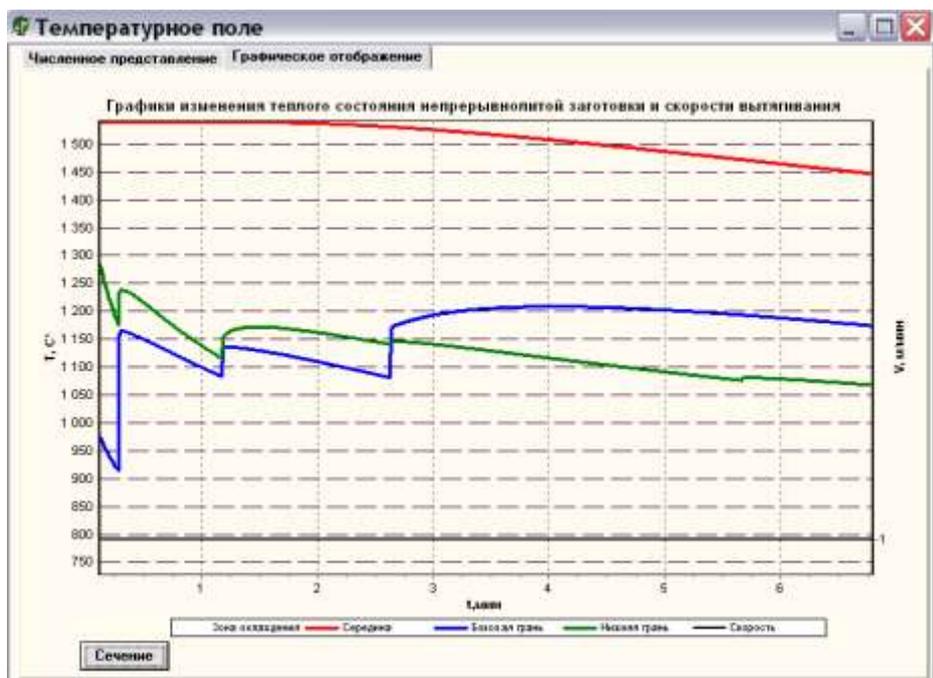


Рисунок 2.43 – Вид графического окна с результатами изменения теплового состояния заготовки при неизменной скорости вытягивания

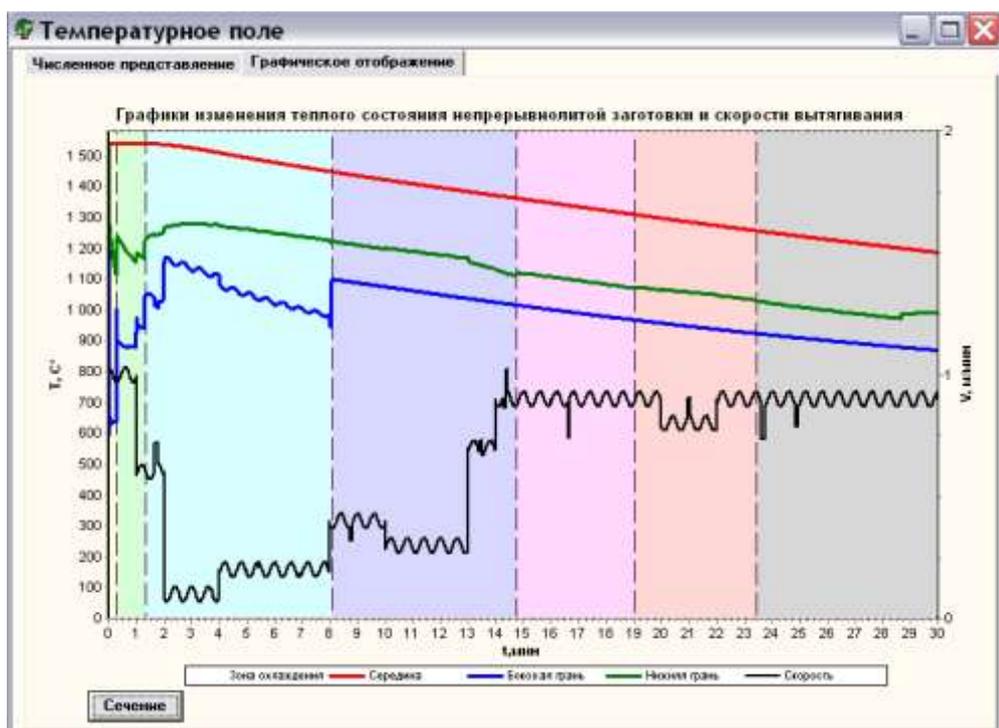


Рисунок 2.44 – Вид графического окна с результатами изменения теплового состояния заготовки с участком резкого падения скорости вытягивания

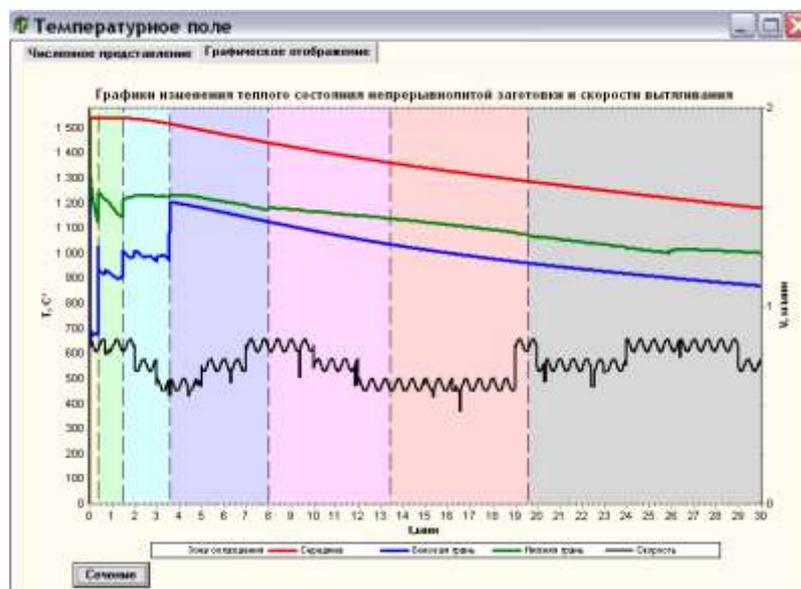


Рисунок 2.45 – Вид графического окна с результатами изменения теплового состояния заготовки при плавных небольших изменениях скорости вытягивания

Программный продукт использует многооконный пользовательский интерфейс, систему главного меню и панель инструментов для интерактивного диалога с пользователем.

2.4.3 Сопоставление и обобщение результатов анализа научно-информационных источников и исследований

По результатам математического моделирования теплового состояния непрерывно-литого слитка можно сделать следующие обобщающие выводы:

- 1) допущение о постоянстве скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора является допустимым при исследовании процессов затвердевания заготовки и динамики продвижения фронта кристаллизации;
- 2) учет динамики скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора необходим при исследовании теплового состояния поверхностных слоев заготовки глубиной не более 1 см;
- 3) температурные колебания, возникающие в затвердевших поверхностных слоях заготовки с амплитудой до 30° приводят к термоциклированию, в результате которого формируется мелкозернистая структура протяженностью

от 0,003 до 0,01 м, которая при увеличении амплитуды колебаний разрушается и в ней формируются сетчатообразные трещины.

В отличие от известных работ по этой тематике:

- 1) построенные алгоритмы и примененные численные методы использованы для уравнения теплопроводности, в котором теплофизические характеристики изменяются во времени в зависимости от текущих температурных полей заготовки;
- 2) выполнено структурирование информации о характеристиках заготовки для организации ее хранения в электронном виде;
- 3) использован метод неградиентного случайного поиска с операторами адаптации для оптимизации режимов вторичного охлаждения, который ранее не применялся для такого класса задач;
- 4) выполнена оценка сходимости нетрадиционного метода решения задачи оптимизации для выбора режимов вторичного охлаждения и доказана его сходимость за количество шагов не более 10;
- 5) разработан комплексный подход к построению программного обеспечения, включающий решение задачи теплопроводности, оптимизации режимов охлаждения и оценки качества готовой продукции.

2.4.4 Оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем

Полученные алгоритмы и программное обеспечение позволяют повысить эффективность эксплуатации машин непрерывного литья заготовок за счет:

- снижения влияния человеческого фактора на достоверность экспертных оценок качества непрерывно-литой заготовки, получаемых при обработке изображения её серного отпечатка поперечного сечения с низкой контрастностью;
- формализованного описания производственных многостадийных процессов с учетом их декомпозиции на этапы, выявление и классификация возможных

целей управления, расширение области применения методов оптимизации для ТП;

– разработки и использования в АСУ ТП непрерывно разливки стали пакетов прикладных программ для интеллектуальной поддержки управления непрерывной разливки стали, выбора новых технологий и конструкций машин непрерывного литья заготовок.

Программное обеспечение позволило снизить финансовые и материальные затраты на экспериментальные исследования новых технологических режимов разливки стали и конструкций машин непрерывного литья заготовок в размере до 2 млн. рублей на один эксперимент.

2.4.5 Рекомендации по использованию результатов проведенных НИР в АСУ ТП непрерывной разливки стали

Основная проблема при обработке теоретических и эмпирических данных состоит в том, чтобы привести их в такой вид, в котором они будут легче и эффективнее восприниматься исследователем

Для упрощения записи и более эффективного использования результатов исследований, полученных автором в ходе теоретических и экспериментальных исследований, предложен ряд полуэмпирических зависимостей. Эти зависимости нашли свое практическое применение в условиях действующего производства, в частности в условиях кислородно-конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Целями упрощения формы представления результатов исследования в первую очередь являются:

- выделение отличительных особенностей предлагаемых технологий непрерывной разливки стали от ранее известных как в условиях кислородно-конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», так и других металлургических предприятий;
- приведение результатов к виду, приемлемому для промышленного использования в заданных производственных условиях в виде многомерных но-

мограмм для задачи оптимизации по металлургической длине заготовки и технологических таблиц для двухмерной оптимизационной задачи.

На основе предложенных обобщенных зависимостей разработаны три способа непрерывной разливки стали на машинах криволинейного типа.

Первый способ непрерывного литья заготовок предполагает подачу из промежуточного ковша стали, содержащей углерод, кремний, марганец и алюминий, в кристаллизатор, вытягивание из него заготовки и ее охлаждение по зонам путем подачи воды на поверхность заготовки со стороны большого и малого радиусов. Способ отличается тем, что расход воды по зонам определяют из выражения

$$F = \sum_{j=1}^N k_{1j}H + k_{2j}V + k_{3j}T_1 + k_{4j}T_2 + k_{5j} ,$$

где F – общий расход воды в зонах охлаждения со стороны большого и малого радиуса, м³/ч; i – индекс, определяющий номер зоны вторичного охлаждения; k_{ij} – эмпирические коэффициенты; N – количество зон охлаждения; H – ширина заготовки, м; V – скорость вытягивания заготовки, м/мин; T_1 – температура поверхности заготовки на выходе из последней зоны охлаждения, °С; T_2 – температура металла в промежуточном ковше, °С.

Значение эмпирических коэффициентов зависит от процентного содержания химических элементов в стали:

$$k_{ij} = a_{ij} \cdot \exp C + b_{ij} \cdot \exp Si + c_{ij} \exp Mn + d_{ij} \cdot \exp Al + e_{ij} ,$$

где a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} , e_{ij} – коэффициенты, полученные опытным путем; [C], [Si], [Mn], [Al] – содержание углерода, кремния, марганца и алюминия в стали, %.

Способ обеспечивает выбор режимов охлаждения непрерывно-литых заготовок, позволяющих без изменения конструкции действующих машин получить заданную температуру поверхности на выходе из последней зоны охлаждения. При этом обеспечивается равномерное охлаждение поверхности по ее металлургической длине в машине непрерывного литья заготовок, что,

в свою очередь, приводит к минимизации внутренних термических напряжений в слитке и препятствует образованию дефектов.

Второй способ непрерывного литья заготовок для малоуглеродистой стали предполагает подачу металла в кристаллизатор, вытягивание из него заготовки и ее охлаждение. Способ отличается тем, что общий расход воды для зон вторичного охлаждения со стороны большого и малого радиусов машины непрерывного литья заготовок рассчитывается по формулам:

$$F_1 = 6,38 \cdot V + 1,29 \cdot I - 7,65 \cdot [C] - 0,91 \cdot [Mn] - 122,55 \cdot [S] + 21,10 \cdot [Al] + 5,09;$$

$$F_2 = 18,77 \cdot V + 0,71 \cdot I - 21,89 \cdot [C] + 4,17 \cdot [Mn] - 146,99 \cdot [S] - 14,95 \cdot [Al] - 3,08,$$

где F_1 – расход воды для зон вторичного охлаждения со стороны большого радиуса машины непрерывного литья заготовок, м³/ч; F_2 – расход воды для зон вторичного охлаждения со стороны малого радиуса машины непрерывного литья заготовок, м³/ч; V – скорость вытягивания заготовки, м/мин; I – средний балл осевой химической неоднородности заготовки; $[C]$ – содержание углерода в стали, %; $[Mn]$ – содержание марганца в стали, %; $[S]$ – содержание серы в стали, %; $[Al]$ – содержание алюминия в стали, %.

Третий способ непрерывного литья заготовок из низкоуглеродистой стали, включает подачу низкоуглеродистой стали, содержащей углерод, марганец и серу, в кристаллизатор, вытягивание из него заготовки и охлаждение ее по зонам вторичного охлаждения путем подачи воды со стороны большого и малого радиусов машины непрерывного литья. Способ отличается тем, что отношение плотностей орошения водой для зон вторичного охлаждения со стороны большого и малого радиусов определяют из соотношения

$$\frac{f_{БР}}{f_{МР}} = 1,23 \cdot 1,004^I \cdot 1,142^{R-r} \cdot 0,9996^{[S]} \cdot 0,928^{[C]} \cdot 0,944^V,$$

где $f_{БР}$, $f_{МР}$ – удельные расходы воды на все зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок, м³/(м²·ч); I – балл осевой рыхлости в заготовке по ОСТ 14–11–73; R – расстояние от поверхности заготовки со сто-

роны большого радиуса МНЛЗ до границы смыкания тепловых фронтов на поперечном сечении, м; r – расстояние от поверхности заготовки со стороны малого радиуса МНЛЗ до границы смыкания тепловых фронтов на поперечном сечении, м; $R - r$ – смещение теплового фронта относительно геометрического центра поперечного сечения заготовки, м; $[Mn]$, $[S]$, $[C]$ – процентное содержание марганца, серы, углерода в стали, %; V – скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, м/мин.

Наличие обобщающих зависимостей позволило предложить новые варианты работы программы автоматического регулирования вторичным охлаждением.

Результаты теоретических исследований опробованы на машинах криволинейного типа, функционирующих в условиях кислородно-конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината. При этом получен экономический эффект в размере 20 млн. рублей в год.

2.4.6 Рекомендации по использованию результатов НИР при создании научно-образовательных курсов

С использованием результатов научного исследования подготовлены макеты учебных пособий и методических указаний к лабораторным работам для направления 230100 – Информатика и вычислительная техника по дисциплине:

- «Обработка экспериментальных на ЭВМ»;
- «Теория распознавания образов».

Выполнены исследования по выявлению приоритетов при принятии молодых специалистов различной квалификации (бакалавр, инженер, магистр) на работу.

Определена роль компетентностного подхода в построении образовательных программ согласно требованиям ФГОС III поколения. В связи с этим проект новой образовательной программы введены новые курсы: «Основы компьютерного зрения», «Численные методы». Определена недостаточная

потребность в знаниях выпускников по дисциплинам, направленным на научное обоснование технических разработок и математического моделирования процессов в металлургии.

В связи с этим рекомендуется расширять круг задач, решение которых основано на методах математического моделирования, и сформировать у студентов навыки научного обоснования полученных результатов.

2.5 Разработка алгоритмов и программного обеспечения для имитационного моделирования оценки и прогнозирования качества непрерывно-литой заготовки статистическими методами

2.5.1 Систематизация и оценка полученных результатов

Автоматизированную информационную систему можно определить как совокупность информации, математических методов и моделей, программных, технологических средств и специалистов, предназначенных для обработки информации и принятия управленческих решений.

Название автоматизированной информационной системы – “*Q&S*” является сокращением двух английских слов: *Quality* (качество) и *Steel* (сталь). Такое название ориентирует пользователя и на область использования программного продукта, и на его назначение и в то же время является оригинальной аббревиатурой.

Производственные предприятия и их подразделения представляют собой сложные системы. Они состоят из большого числа элементов, реализующих производственные и управленческие функции. Такие объекты имеют многоуровневую структуру, а также обширные внешние и внутренние информационные связи. Для выработки в таких сложных системах эффективных воздействий требуется наряду с созданием соответствующих алгоритмов управления переработать значительные объемы разнообразной информации [86, 87].

В зависимости от технологического и функционального аспектов рассмотрения автоматизированная информационная система была разделена на несколько составляющих элементов (см. рисунок 2.46 и рисунок 2.47).

Используя технологический аспект рассмотрения, в системе “Q&S” можно выделить уровень принятия решения, который исполняет роль аппарата управления, производственную информацию, методы и средства ее технологической обработки.

<i>Private</i>				
<i>Ширина заготовки</i>	<i>Толщина заготовки</i>	<i>Количество промежуточных разбиения</i>	<i>Скорость вытягивания</i>	<i>Начальная температура</i>
<i>Температура ликвидуса</i>	<i>Температура солидуса</i>	<i>Матрица начального слоя</i>	<i>Матрица следующего слоя</i>	<i>Начальная матрица оптимизации в зоне</i>
<i>Public</i>				
<i>Величина шага по x</i>	<i>Величина шага по y</i>	<i>Шаг по времени</i>		
Функции, определенные в классе				
<i>Input(толщина, ширина, кол-во промеж., скорость, нач. температура)</i> {создает и инициализирует матрицы нач. значениями}				
<i>DelT()</i> {уничтожает матрицы, освобождая динам. память}				
<i>Int OutN()</i> {возвращает кол-во промежуточных разбиения}				
<i>Float** OutT()</i> {возвращает матрицу следующего слоя}				
<i>Float OutY(возвращает ширину заготовки)</i>				
<i>Float OutLicv()</i> {возвращает температуру ликвидуса}				
<i>Float OutSol()</i> {возвращает температуру солидуса}				
<i>ReInitT0()</i> {инициирует матрицу начального слоя начальной матрицей оптимизации в зоне}				
<i>ReInitTOp()</i> {инициирует нач. матрицу оптимизации матрицей начального слоя}				
<i>Float** Move(AlBr,AlMr,AlTr, тем.окр.среды)</i> {рассчитывает матрицу следующего слоя}				
<i>Float Licvidus(углерод, марганец, кремний, сера, фосфор, хром, никель, медь)</i> {расчет температуры ликвидуса}				
<i>Float Solidus(углерод, марганец, кремний, сера, фосфор, хром, никель, медь)</i> {расчет температуры солидуса}				

Рисунок 2.46 – Схема объектной модели ядра интегрированной системы “Steel” для класса заготовки

Являясь человеко-машинной системой, в рамках которой реализуется информационная модель, формализующая процесс обработки данных в условиях новой технологии, автоматизированная информационная технология замыкает через себя прямые и обратные информационные связи между объектом исследования и уровнем принятия решения, а также вводит в систему и выводит из нее потоки внешних информационных связей [88, с. 126–131].

<i>Private</i>																							
<i>Скорость</i>	<i>Количество зон(n)</i>																						
<table border="1"> <tr><td><i>ZVO[1]</i></td></tr> <tr><td><i>Длина</i></td></tr> <tr><td><i>Время</i></td></tr> <tr><td><i>Alfa BR</i></td></tr> <tr><td><i>Alfa TR</i></td></tr> <tr><td><i>Alfa Mr</i></td></tr> <tr><td><i>Темп. окр. ср.</i></td></tr> </table>	<i>ZVO[1]</i>	<i>Длина</i>	<i>Время</i>	<i>Alfa BR</i>	<i>Alfa TR</i>	<i>Alfa Mr</i>	<i>Темп. окр. ср.</i>	<table border="1"> <tr><td><i>ZVO[i]</i></td></tr> <tr><td><i>Длина</i></td></tr> <tr><td><i>Время</i></td></tr> <tr><td><i>Alfa BR</i></td></tr> <tr><td><i>Alfa TR</i></td></tr> <tr><td><i>Alfa Mr</i></td></tr> <tr><td><i>Темп. окр. ср.</i></td></tr> </table>	<i>ZVO[i]</i>	<i>Длина</i>	<i>Время</i>	<i>Alfa BR</i>	<i>Alfa TR</i>	<i>Alfa Mr</i>	<i>Темп. окр. ср.</i>	<table border="1"> <tr><td><i>ZVO[n]</i></td></tr> <tr><td><i>Длина</i></td></tr> <tr><td><i>Время</i></td></tr> <tr><td><i>Alfa BR</i></td></tr> <tr><td><i>Alfa TR</i></td></tr> <tr><td><i>Alfa Mr</i></td></tr> <tr><td><i>Темп. окр. ср.</i></td></tr> </table>	<i>ZVO[n]</i>	<i>Длина</i>	<i>Время</i>	<i>Alfa BR</i>	<i>Alfa TR</i>	<i>Alfa Mr</i>	<i>Темп. окр. ср.</i>
<i>ZVO[1]</i>																							
<i>Длина</i>																							
<i>Время</i>																							
<i>Alfa BR</i>																							
<i>Alfa TR</i>																							
<i>Alfa Mr</i>																							
<i>Темп. окр. ср.</i>																							
<i>ZVO[i]</i>																							
<i>Длина</i>																							
<i>Время</i>																							
<i>Alfa BR</i>																							
<i>Alfa TR</i>																							
<i>Alfa Mr</i>																							
<i>Темп. окр. ср.</i>																							
<i>ZVO[n]</i>																							
<i>Длина</i>																							
<i>Время</i>																							
<i>Alfa BR</i>																							
<i>Alfa TR</i>																							
<i>Alfa Mr</i>																							
<i>Темп. окр. ср.</i>																							
<i>Public</i>																							
Функции, определенные в классе																							
<i>Init</i> (количество во зон, скорость) {инициализация вектора зон и скорости}																							
<i>InitZone</i> (номер зоны, длина зоны, уд. расход в зоне, вид зоны) {расчет коэф. отдачи по радиусам, в зависимости от вида зоны(возд./водн.)}																							
<i>ReInitZone</i> (номер зоны, коэф. отд. по б.р., вид зоны) {расчет коэф. отдачи по радиусам в процессе оптимизации}																							
<i>Float FullTime</i> () {расчет и вывод времени прохода всех зон}																							
<i>Float ZoneTime</i> (номер зоны) {вывод времени прохода зоны}																							
<i>Float OutAlfaBr</i> (номер зоны) {вывод коэф. отдачи по б.р. в зоне}																							
<i>Float OutAlfaMr</i> (номер зоны) {вывод коэф. отдачи по м.р. в зоне}																							
<i>Float OutAlfaTr</i> (номер зоны) {вывод коэф. отдачи по торцу в зоне}																							
<i>Float OutU</i> (номер зоны) {вывод темп. окр. среды в зоне}																							

Рисунок 2.47 – Схема объектной модели ядра интегрированной системы

“Steel” для класса МНЛЗ

Функции автоматизированной информационной технологии определяют ее структуру, которая реализует информационные процессы: сбор и реги-

страцию данных; подготовку информационных массивов; обработку, накопление и хранение данных; формирование результатной информации; передача данных от источников возникновения к месту обработки, а результатов (расчетов) – к потребителям информации для принятия решения.

Сбор и регистрация информации – наиболее трудоемкие и сложные процессы. Сбор информации происходит на различных этапах ведения выплавки и разливки стали: сведения о химическом составе металла поступают из лаборатории химического анализа, температура стали в промежуточном ковше – с поста непрерывной разливки, сведения о расходах воды и скорости вытягивания – от автоматизированной системы регистрации параметров разливки и т.п. Все эти сведения в настоящее время фиксируются в паспорте плавки и передаются в электронную базу.

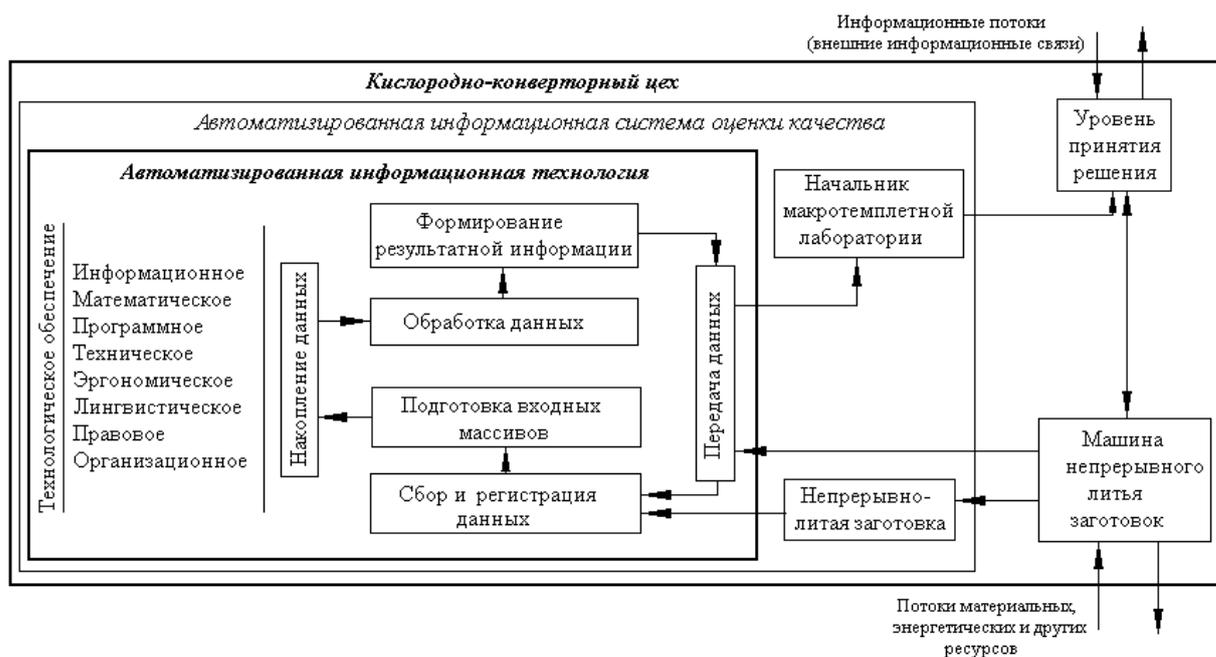


Рисунок 2.48 – Структура автоматизированной эрагитической подсистемы «Q&S»

В связи с вводом в эксплуатацию МНЛЗ для выпуска сортовых заготовок были разработаны новые формы для сбора и регистрации информации по технологическим параметрам работы МНЛЗ. Особое значение при этом придается достоверности, полноте и своевременности информации.

Для разработки программного обеспечения “Q&S” было рассмотрено информационное обеспечение, необходимое для формирования информационной базы данных. Особое внимание было уделено изучению и разработке математического и программного обеспечения.

В общем смысле информационное обеспечение включает:

- проектные решения по объему, размещению, формам организации информации;
- совокупность показателей, справочных данных, классификаторов информации, унифицированные системы документации;
- массивы информации;
- персонал, обеспечивающий надежность хранения, своевременность и качество обработки информации.

В ходе создания информационного обеспечения были приняты следующие решения:

1) создание информационной базы требует сканирования серного отпечатка и накопления файлов электронных изображений в формате BMP. При обработке серных отпечатков для заготовок прямоугольного сечения выбирается фрагмент размером 210×297 мм. В режиме Gray с разрешением 300 dpi такое изображение на магнитном носителе занимает объем памяти 8,38 МБ. Учитывая, что в течение суток обрабатывается планово от 2 до 4 темплетов, можно определить максимальный объем памяти, которая требуется для хранения электронных изображений, собранных в течение рабочего месяца: $4 \cdot 8,38 \cdot 30 = 1005,6$ (МБ) = 0,98 (ГБ). За календарный год объем этой информации составит 11,78 ГБ. Коэффициент сжатия файлов составляет 0,62 %. Поэтому объем базы данных в архиве ≈ 74 МБ. Хранение таких объемов информации можно осуществить на жестком диске используемой ЭВМ;

2) при оценке качества сортовой заготовки размеры изображения значительно меньше; для одного серного отпечатка его электронная копия зани-

мает на магнитном носителе 3,14 МБ при размере 170 × 170 мм, следовательно, в 2,67 раза сокращаются объемы памяти для хранения электронной базы изображений и ее архива;

3) для хранения оцифрованной матрицы могут быть использованы два формата: формат текстового документа и формат электронной таблицы Excel. Размер текстового файла для хранения одной матрицы составляет 2 КБ и в формате электронной таблицы – 555 КБ. Соответственно, объем памяти на магнитном носителе для хранения оцифрованных матриц составит 2,8 МБ и 0,76 ГБ;

4) массивы используемых исходных и выходных потоков информации имеют сложный структурированный вид. Схема структурной единицы информации используемой инфологической модели приведена на рисунке 2.49. На рисунке 2.49 прямоугольником отображается агрегат данных, квадратом – атомарная единица информации;

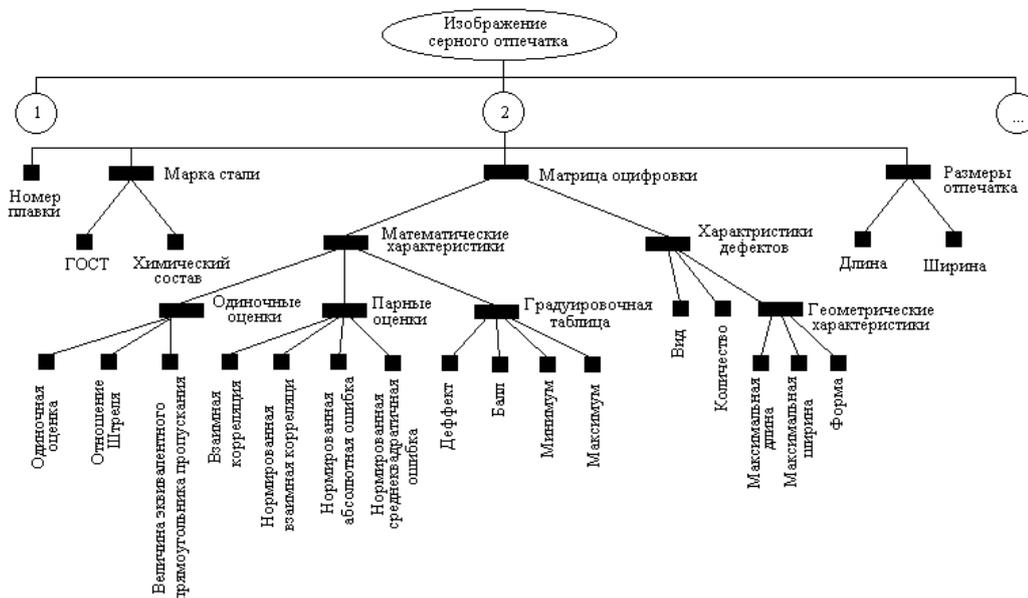


Рисунок 2.49 – Структура составной единицы информации для информационной базы по изображениям серных отпечатков

5) по схеме структурной единицы информации, приведенной на рис. 5.4, прослеживается система показателей, которые используются в системе. Среди них можно выделить группу показателей, представленных в справоч-

никах и классификаторах: марочник сталей сортамента ОАО «ММК»; ОСТ по шкалам для атрибутивных признаков внутренних дефектов заготовки, градировочные таблицы для количественной оценки дефектов;

б) унифицированные формы для входной и выходной информации не используются;

7) в качестве кодирования номера плавки должен быть использован специальный классификатор. Схема кода для этих номеров приведена на рисунке 2.50. Марочник стали по сортаменту ОАО «ММК» также является классификатором;

8) обязанности по обеспечению надежности хранения, своевременности и качества обработки информации возлагается на сотрудников макротемплетной лаборатории и ВЦ ЦЛК ОАО «ММК».

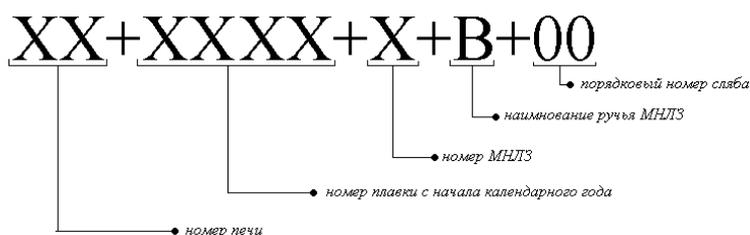


Рисунок 2.50 – Схема структуры кода для номера плавки

Разработка математического обеспечения для программного продукта “Q&S” потребовала построения математической модели для электронного изображения серного отпечатка от заготовок прямоугольного и квадратного сечения. Математическая формализация изображения и его статистические характеристики представлены на предыдущем этапе.

2.5.2 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей

2.5.2.1 Функциональные и технологические схемы эргатической подсистемы “Q&S”

Программный продукт “Q&S” является человеко-машинной системой. На человека возлагаются обязанности по формированию электронной базы данных, выбора формы отчетности и настройки программного продукта. В

связи с этим при подробном изучении предметной области объектов, участвующих в решении, задач и требований к условиям этих задач потребовалась разработка схем взаимодействия человека и программного обеспечения, а также моделей программного продукта между собой.

Схема взаимодействия программ системы «Q&S» представлена на рисунке 2.51. Центральное место в этой схеме занимает интерфейс «человек – машина». Именно этот блок отвечает за выбор объекта или задачи для последующих операций.

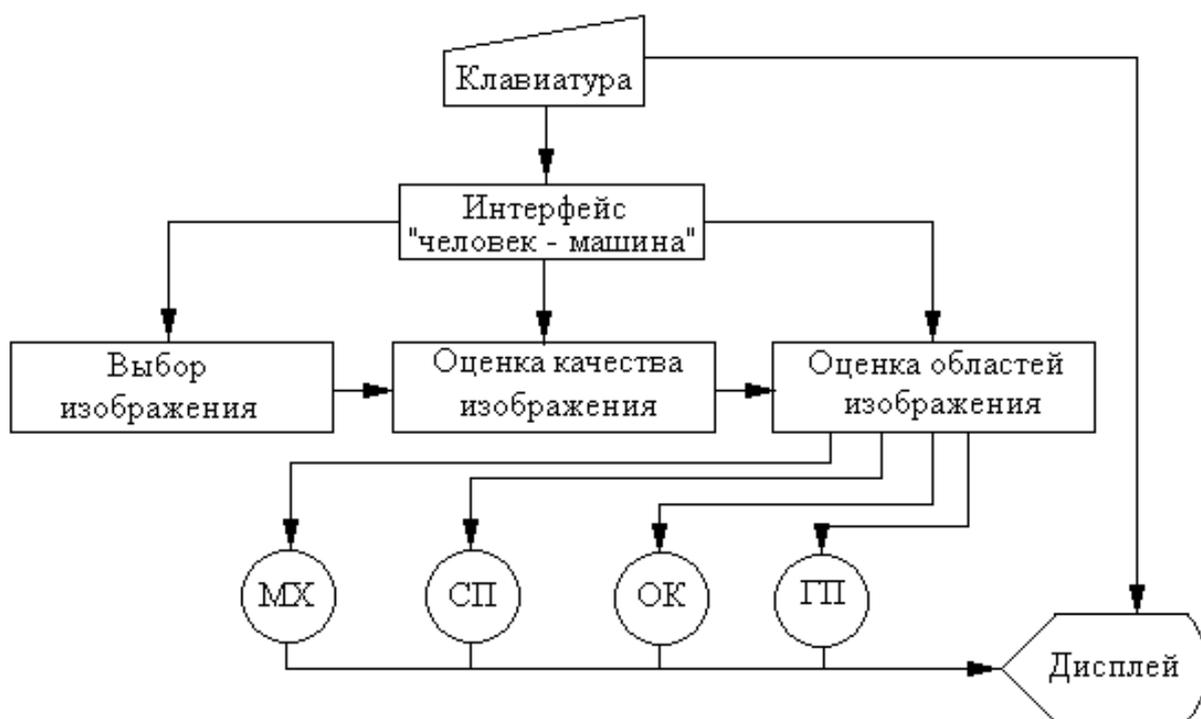


Рисунок 2.51 – Схема взаимодействия программных модулей системы «Q&S»

Часть операций выполняется в автоматическом режиме: расчет математических характеристик (модуль МХ); определение формы выделенных объектов (модуль СП); классификация дефекта по шкале качества (модуль ОК); графическое представление результатов по одному или группе электронных изображений (модуль ГП). Программный продукт предусматривает вывод всех результатов на дисплей.

В соответствии со схемой взаимодействия была разработана схема работы программного продукта (рисунок 2.52).

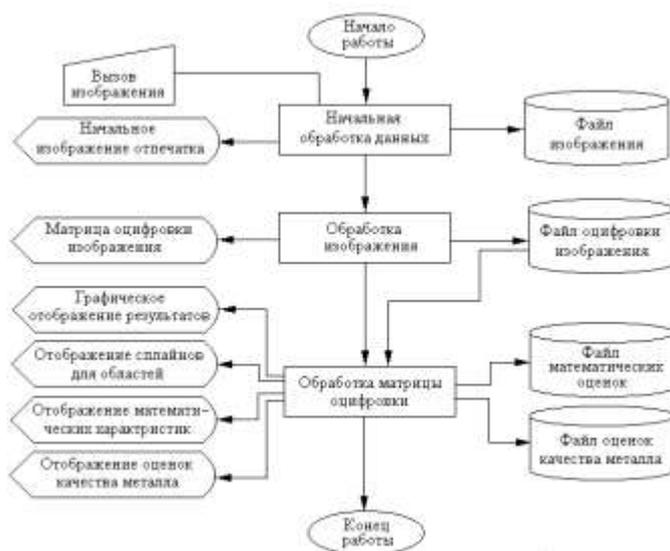


Рисунок 2.52 – Схема работы системы «Q&S»

В работе программного продукта можно выделить три основные задачи:

- начальная обработка данных подразумевает сканирование изображения для перевода его в электронный вид и выбор изображения для дальнейшей работы, а именно отображения на экране в различных формах и наложения схемы разбиения на зоны обработки. В результате на том этапе получаем базу данных электронных изображений в виде файлов формата *BMP*;

- обработка изображения, в которой происходит оцифровка изображения и формирования числовой матрицы со значениями относительного цвета. Полученная числовая матрица отображается на дисплее и сохраняется в виде файлов двух форматов *TXT* и *XLS*;

- обработка цифровой матрицы. Задача может решаться как для активного изображения, так и для группы изображений. Результаты обработки могут быть выведены на дисплей и в файлы форматов *TXT* и *XLS*.

Схема работы системы позволила выбрать вид диалога, который должен быть использован в программном продукте. Выбор структуры диалога – это первый из этапов, который должен быть выполнен при разработке ин-

терфейса. В результате исследования требований к программному продукту и специфики его работы был выбран диалог на основе меню.

Меню является наиболее популярным вариантом организации запросов на ввод данных во время диалога, управляемого компьютером.

Существует несколько основных форматов представления меню на экране:

- список объектов, выбираемых прямым указанием либо указанием номера (или мнемонического кода);
- меню в виде строки данных;
- меню в виде блока данных;
- меню в виде пиктограмм.

Из всех предлагаемых вариантов были выбраны два варианта меню: в виде строки данных и в виде пиктограмм.

Меню в виде строки данных появляется вверху экрана и остается в этой позиции на протяжении всего диалога. Таким образом, посредством меню удобно отображаются возможные варианты данных для ввода, доступных в любое время работы с системой. В меню программного продукта представлено достаточно большое разнообразие вариантов действий и организуется иерархическая структура из соответствующих меню.

Меню в виде пиктограмм представляет собой множество объектов выбора, и эти объекты содержат графическое представление вариантов работы.

Функциональная схема главного меню программного продукта со всеми вложениями представлена на рисунке 2.53, который отображает основные действия, выполняемые программным продуктом в процессе работы. Схема составлена в соответствии с Единой схемой программной документации ГОСТ 19.701 – 90 (ИСО 5807 – 85).

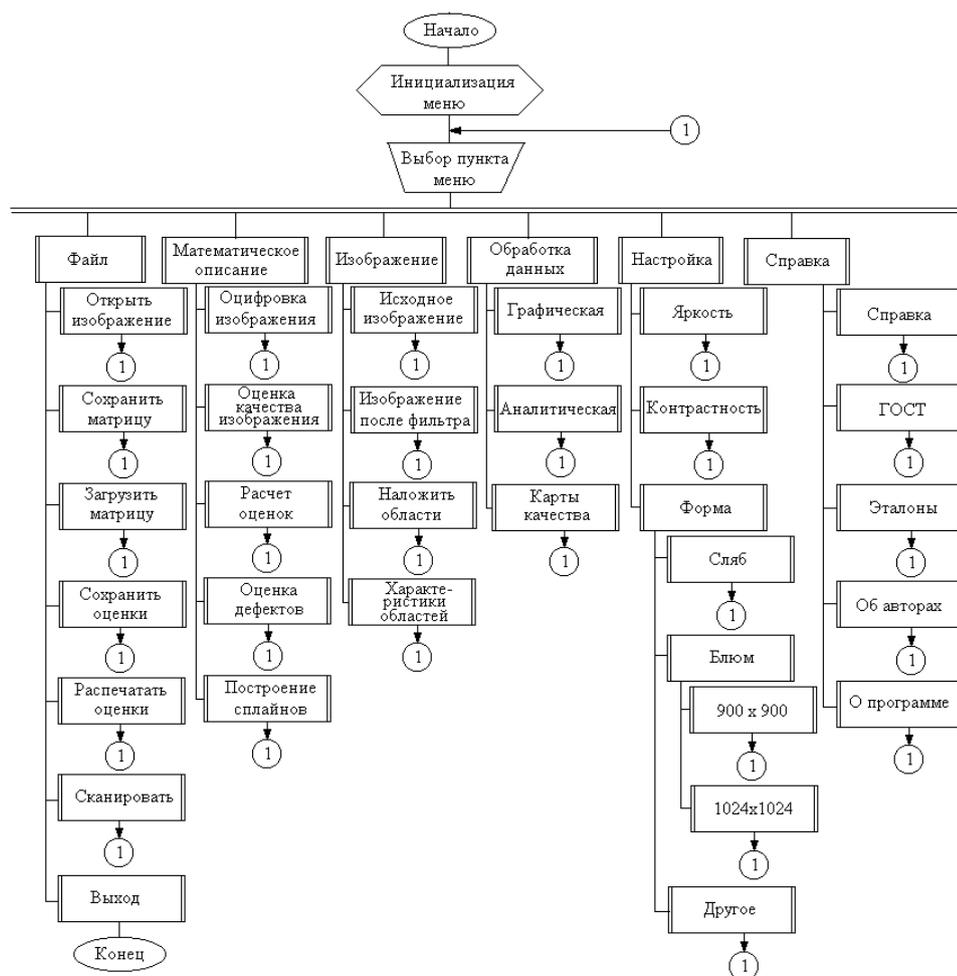


Рисунок 2.53 – Функциональная схема программного продукта “Q&S”

Главное меню программного продукта должно охватывать стандартные и унифицированные возможности программ, а также содержать специализированные пункты для обработки изображения. К стандартным функциям меню можно отнести операции пунктов Файл и Справка. Остальные функции реализуют специализированные возможности программного продукта.

2.5.2.2 Алгоритмизация оцифровки электронного изображения серного отпечатка поперечного темплета непрерывно-литой заготовки

К исходному электронному изображению серного отпечатка от поперечного темплета применяется операция оцифровки, то есть формирование числовой матрицы, каждый элемент которой соответствует значению относительного цвета согласно математической модели. Для работы с областями, которые могут признаваться областью внутреннего дефекта, предлагается

использовать программный объект *Defect*. Описание объекта представлено ниже.

```
struct Defect
{
public:
bool Used;      //Учитываем ли мы этот дефект
int Left;      //Координата X левого верхнего угла
int Top;       //Координата Y левого верхнего угла
int Right;     //Координата X правого нижнего угла
int Bottom;   //Координата Y правого нижнего угла
int Size;     //Площадь дефекта
EZone Zone;   //зона
//Конструктор с параметрами
Defect(int i, int j)
{
Used = true;
Left = Right = i;
Top = Bottom = j;
Zone = None;
Size = 0;
};
//Конструктор по умолчанию
Defect()
{
Used = true;
Left = Right = Top = Bottom = 0;
Zone = None;
Size = 0;
};
};
```

Для выполнения операции по обработке изображения необходимо получить доступ к значениям отдельных пикселей. Проще всего такой доступ получить с помощью свойства *Pixel* компонента *TCanvas*. Это свойство можно рассматривать и использовать как двумерный массив с координатами (x,y) .

Операция оцифровки изображения размеров 256×256 пикселей при таком подходе занимает от 1 до 3 с. Более оптимальной является обработка электронного изображения с помощью двумерного массива и копирование результатов в компонент *TBitmap*, используя свойство *ScanLine*. Время оцифровки электронного изображения сокращается приблизительно в 10 раз [89, с. 164–177; 90, с. 67 – 70].

Класс *TBitmap* – это *VCL*-инкапсуляция растрового объекта *Windows*. Этот класс выведен из абстрактного базового класса *TGraphic*, и он динамически адаптируется к использованию либо *DDB*-, либо секционного *DIB*-

растра. Действия этого плана представлены внутренней *VCL*-функцией *CopyBitmap()*. Именно в этой функции происходит создание либо *DDB*-растра с помощью *GDI*-функций *CreateBitmap()* (для монохромных растров) и *CreateCompatibleBitmap()*, либо секционного *DIB*-растра с помощью *GDI*-функции *CreateDIBSection()*.

Класс *TBitmap* опирается на классы *TBitmapCanvas* и *TBitmapImage*. Класс *TBitmapCanvas*, потомок класса *TCanvas*, расширяет возможности своего родительского класса за счет инкапсуляции *GDI*-контекста устройства памяти. Класс *TBitmapImage*, потомок класса *TSharedImage*, обрабатывает ресурсы, проводя «инвентаризацию» и «списывание» *DDB*- или секционных *DIB*-растров. Списывание выполняется посредством *GDI*-функции *DeleteObject()*.

Для поддержки отображения графических объектов класс *TBitmapCanvas* наследует от своего родительского класса функции-члены *Draw()*, *StretchDraw()* и *CopyRect()*. Функция *TBitmapCanvas::CreateHandle()* выполняет задачу выбора растра (и палитры при необходимости) в контексте устройства памяти. Следовательно, при использовании функции-члена *Draw()*, *StretchDraw()* или *CopyRect()* класс *TCanvas* может опираться исключительно на *GDI*-функцию *StretchBit()* или *TransparentStretchBit()*.

Помимо функций-членов операций отображения, представленных классом *TCanvas*, в классе *TBitmap* предусмотрено свойство *ScanLine*. Это свойство использует внутреннюю функцию-член *TBitmap::GetScanLine()*, которая просто возвращает сдвинутый указатель на биты секционного *DIB*-растра. Выполняя преобразование из других форматов, приходится получать доступ к этим битам, чтобы можно было непосредственно манипулировать пикселями изображения. В этом смысле свойство *ScanLine* значительно упрощает задачу манипуляции пикселями.

В процессе оцифровки изображения создается «новое» изображение – очищенное от серого тона. Определение «порогового» значения может быть

выполнено двумя способами. Первый способ сохраняет субъективную оценку, то есть некоторое «пороговое» значение, при котором устанавливается белый или черный цвет, назначается человеком. Согласно второму способу точка имеет пониженную яркость, если выполняется соотношение:

$$|f(x,y) - Q_s| < G_{кр} ,$$

где $f(x,y)$ – значение цвета в точке с координатами (x,y) ; Q_s – отношение Штреля; $G_{кр}$ – критическое значение максимальной разности, устанавливаемое эмпирическим путем по сформированной базе данных и на основе ее статистических оценок.

В программном продукте реализована «пороговая» обработка (*thresholding*). Значение пикселя преобразуется в соответствии с условием

$$f(x,y) < threshold \leq 255.$$

Значение серого оттенка устанавливается равным нулю, если исходное значение цвета для пикселя меньше заданного порога, и равным 255 – в противном случае.

Фрагмент листинга для оцифровки изображения приведен далее.

```
//Фрагмент программного кода для пороговой обработки
//Рассматривается каждый пиксель исходного изображения
int k, l=0;
for (int i=0; i<215; i++)
for (int j=0; j<297; j++)
Matrix[i][j]=0;
BYTE* LinePtr;
BYTE* LinePtr2;
for (int i=0; i<Image2->Picture->Blitmap->Height;i++)
{k=0;
LinePtr=(BYTE*)Image1->Picture->Bitmap->ScanLine[i];
LinePtr2=(BYTE*)Image2->Picture->Bitmap->ScanLine[i];
for (int j=0; j<Image2->Picture->Bitmap->Width;j++)
{
//Если цвет точки больше (светлее) заданной чувствительности к черному,
//то рисуем ее белым цветом, иначе – черным
if (LinePtr [j]>Blackness)
{
LinePtr2[j]=255;
DefMatr[j+1][i+1] = false;
}
else
{
LinePtr2[j]=0;
DefMatr[j+1][i+1]=true;
}
}
```

2.5.2.3 Алгоритм сканирования изображения серного отпечатка

Для взаимодействия программного продукта “Q&S” со сканером используется интерфейс, имеющий аббревиатуру *TWAIN* – индустриальный стандарт на программный интерфейс, предназначенный для работы со сканирующими устройствами.

Для упрощения работы с интерфейсом *TWAIN* разработано большое количество библиотек. При построении приложения определяется необходимая библиотека, обеспечивающая требуемый результат. Наиболее популярной является библиотека *EZTwain*. *EZTWAIN* обеспечивает передачу всех *Windows* сообщений через *TWAIN* и ожидает сообщения о готовности изображения. Библиотека *EZTWAIN* является свободно распространяемой библиотекой с открытыми исходными кодами.

Twain определяет стандарты программного обеспечения и интерфейса прикладного программирования для обеспечения коммуникации между программным приложением и устройствами, получения цифрового изображения (источниками).

На рисунке 2.54 представлена логическая модель для модуля сканирования, позволяющего обращаться к ресурсам *TWAIN* технологии непосредственно при работе приложения “Q&S”.

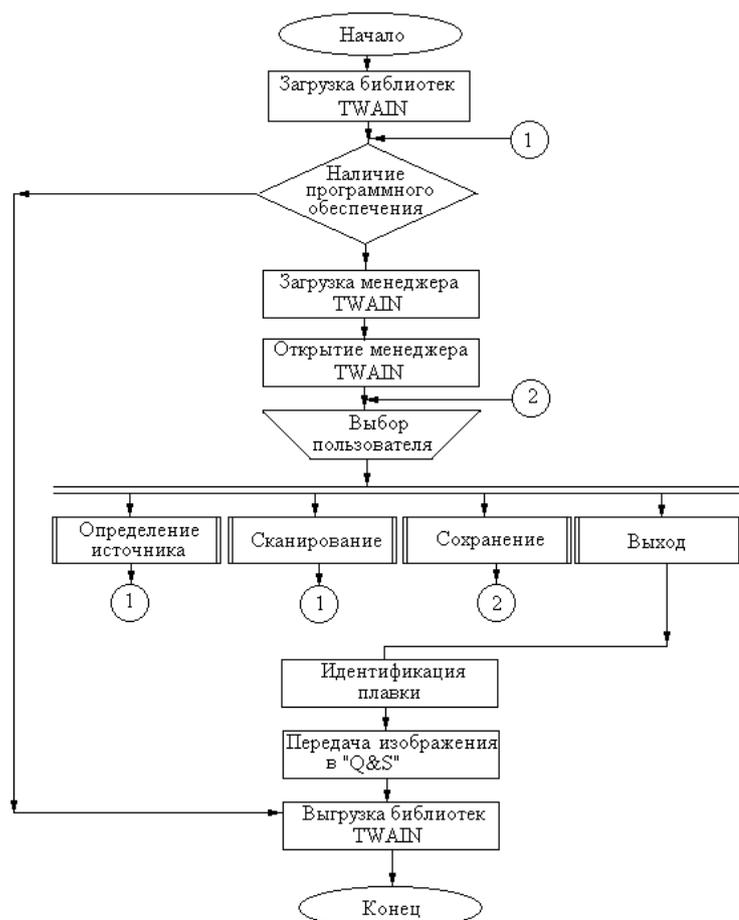


Рисунок 2.54 – Логическая модель модуля сканирования

В модуле графического представления данных используется технология *OpenGL*. Интерфейс *OpenGL* состоит из ряда порядка нескольких сотен процедур и функций, которые позволяют программисту определять объекты и операции, вовлеченные в создание высококачественных графических изображений, определенно окрашивать изображения трехмерных объектов.

Большинство *OpenGL* требует, чтобы графические аппаратные средства содержали *framebuffer*. Большинство команд *OpenGL* связано с рисованием объектов, таких как точки, линий, многоугольников, и битовых массивов, но способы, которыми происходит рисование подобных объектов (типа сглаживание или задание текстуры), полагаются на существование *framebuffer*. Далее некоторые из графических библиотек *OpenGL* непосредственно связаны с манипуляцией с *framebuffer*.

С точки зрения программиста, *OpenGL* – ряд команд, которые позволяют не только определять геометрические объекты в двух или трех измерениях, но и управлять представлением этих объектов в *framebuffer*. Главным образом, *OpenGL* обеспечивает интерфейс непосредственного способа рисования, что означает определение объекта, который нужно нарисовать.

2.5.2.4 Алгоритм графического представления данных по набору изображений серных отпечатков

Типичная программа, использующая *OpenGL*, начинается с запроса открыть окно в *framebuffer* в программе, в которой будет рисоваться объект. Тогда запрос определяет контекст *OpenGL* и связывает его с контекстом окна программы. Как только контекст *GL* определен, программист может применять команды *OpenGL*. Некоторые запросы используются, чтобы нарисовать простые геометрические объекты (то есть точки, линейные сегменты и многоугольники), в то время как другие затрагивают предоставление этих примитивов, включая как они освещены или покрашены и как они будут прорисованы в двух- или трехмерном пространстве пользователя. Есть также запросы произвести прямой контроль *framebuffer* типа чтения и записи пикселей.

Конструктор *OpenGL* – ряд команд, которые управляют графическими аппаратными средствами. Если аппаратные средства состоят только из адресуемого *framebuffer*, то *OpenGL* должен быть осуществлен почти полностью на центральном процессоре компьютера разработчика. Обычно графические аппаратные средства могут включить различные способы графического ускорения, от растровой подсистемы, способной к предоставлению двумерных линий и многоугольников на сложные процессоры с плавающей запятой, способные к преобразованию и вычислению на геометрических данных. Задача конструктора – наладить взаимодействие между процессором и командами *GL*, то есть он определяет имеющееся графическое аппаратное обеспечение, чтобы достигнуть оптимального выполнения команд.

OpenGL содержит огромное количество информации о состоянии системы, которая определяет, как объекты будут нарисованы в *framebuffer*. Некоторые состояния доступны для пользователя, он может получить их значения, другие видны по тому, как они воздействуют на рисуемый объект.

При рисовании *GL* оперирует понятиями примитивов (точка, линия, многоугольник), режим рисования каждого из них может изменяться разработчиком независимо от остальных. Примитивы определяются набором точек или несколькими точками, которые в *OpenGL* задаются внутри командных скобок *glBeginglEnd*.

В *OpenGL* привязка данных происходит только после вызова функции, то есть интерпретация данных осуществляется только после того, как функция их получит.

GL предоставляет возможность прямого управления *2D* и *3D* функциями, такими как подсветка, поворот и перемещение, обновление матрицы, но не имеет возможности описания и проектирования самих объектов. Иными словами *OpenGL*, представляет механизм описания того, как сложные геометрические объекты могут обрабатываться, а не самих объектов.

Влияние команд *GL* на *framebuffer* (буфер, отвечающий за отображение информации в окне) управляется непосредственно операционной системой *Windows*, которая располагает данным ресурсом. Операционная система определяет часть окна, к которой имеет доступ *OpenGL* в каждый момент времени и то, как они связаны, и как данная часть окна устроена. Таким образом, команды *GL* никоим образом не воздействуют на структуру *framebuffer* и не могут инициализировать *OpenGL*, то есть операционная система берет на себя функции по установке настроек буфера, инициализация контекста *GL* происходит тогда, когда *Windows* определяет окно, с которым будет работать *OpenGL*.

Команды *OpenGL* – это процедуры или функции. Различные группы команд выполняют одни и те же задачи и отличаются только по числу и типу параметров.

Логическая схема модуля для трехмерного изображения серного отпечатка представлена на рисунке 2.55 и вид диалоговых окон для представления информации на рисунке 2.56.

Статистические методы являются эффективным инструментом сбора, анализа и интерпретации информации о качестве, их применение позволяет с заданной степенью точности и достоверности судить о состоянии исследуемых явлений (объектов, процессов) в системе качества, прогнозировать и регулировать проблемы на всех этапах жизненного цикла продукции и на основании этого вырабатывать оптимальные управленческие решения.

Общий подход к текущему контролю качества заключается в следующем: в процессе производства из изготовленной продукции или поступающего сырья проводится отбор выборок изделий заданного объема. После этого на специально разлинованной бумаге строятся диаграммы средних значений и изменчивости выборочных значений плановых спецификаций в этих выборках, и рассматривается степень их близости к плановым значениям.

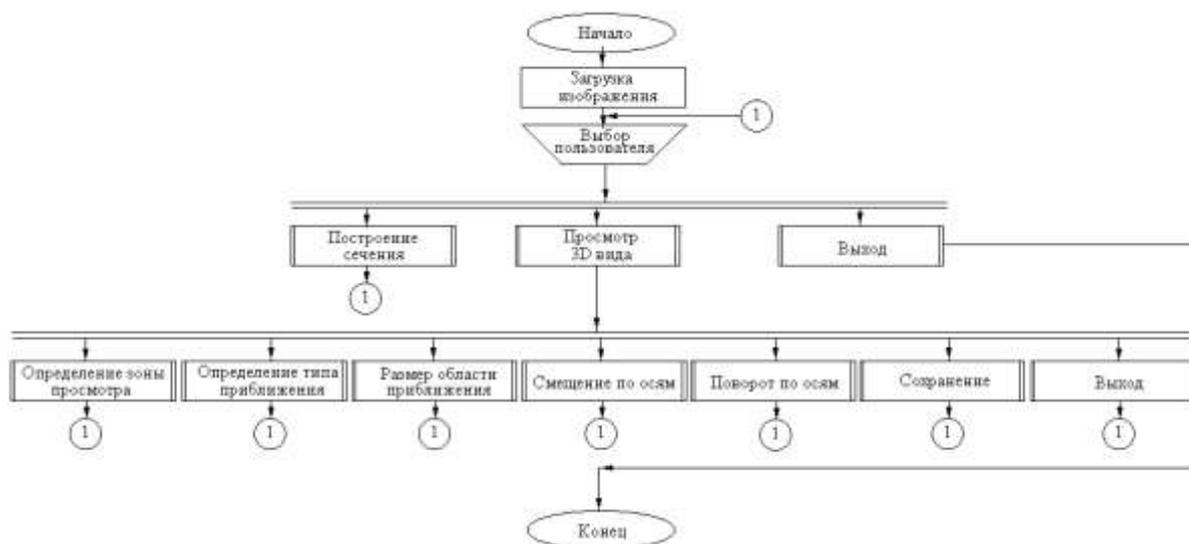


Рисунок 2.55 – Логическая схема модуля для трехмерного изображения серного отпечатка

Если диаграммы обнаруживают наличие тренда выборочных значений или выборочные значения оказываются вне заданных пределов, то считается, что процесс вышел из-под контроля, и предпринимаются необходимые действия для того, чтобы найти причину разладки процесса.

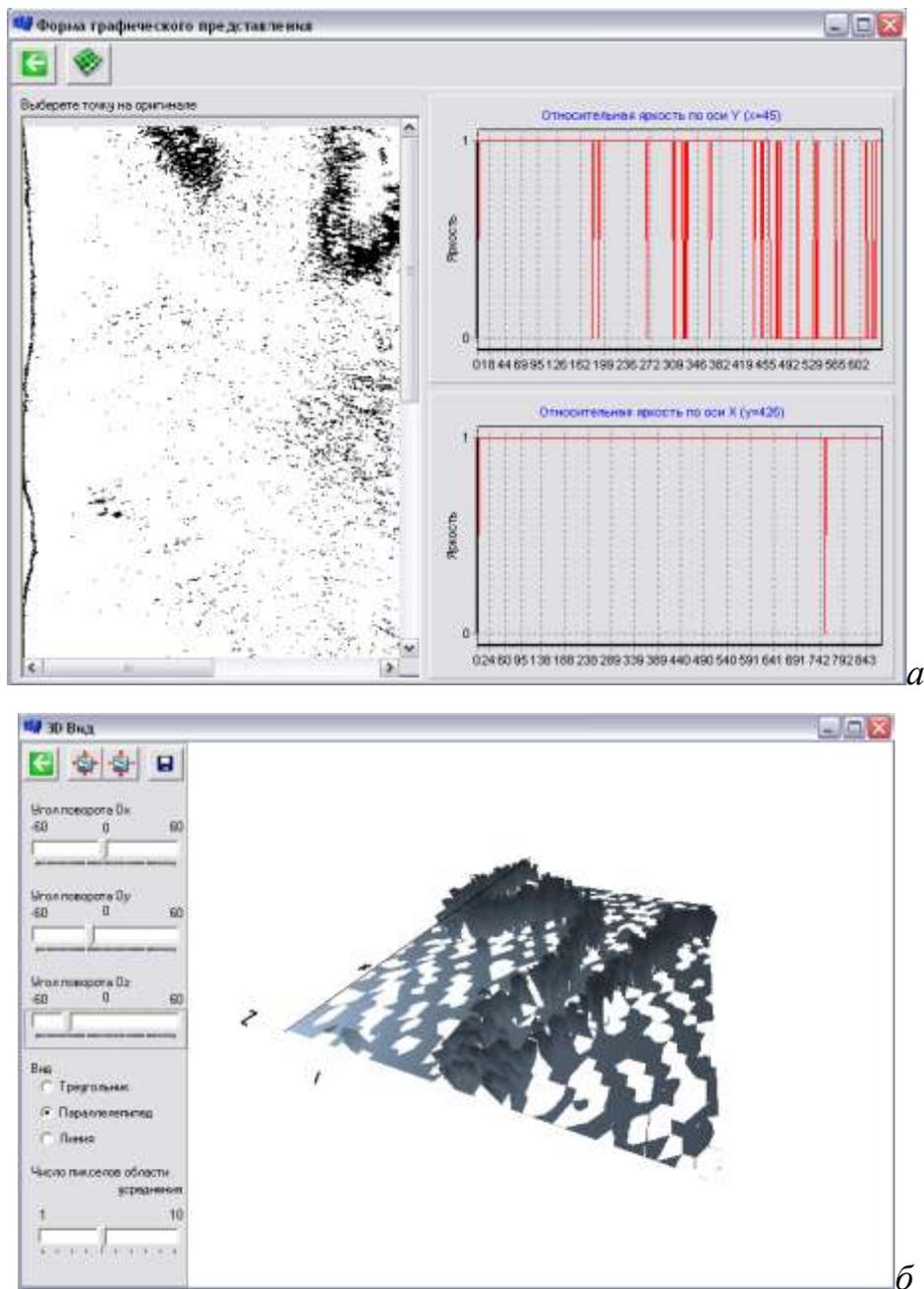


Рисунок 2.56 – Вид диалоговых окон для графического отображения серного отпечатка: а – яркости по выбранным уровням; б – трехмерного изображения выбранной области

Такие специальные карты называются *контрольными* картами Шухарта (названные в честь *W. A. Shewhart*).

Модуль графического представления результатов в программном продукте “*Q&S*” предназначен для построения контрольных карт по статистическим характеристикам изображения. Вид формы с результатами представления данных приведен на рисунке 2.57 и логическая схема модуля графического отображения контрольных карт приведена на рисунке 2.58.

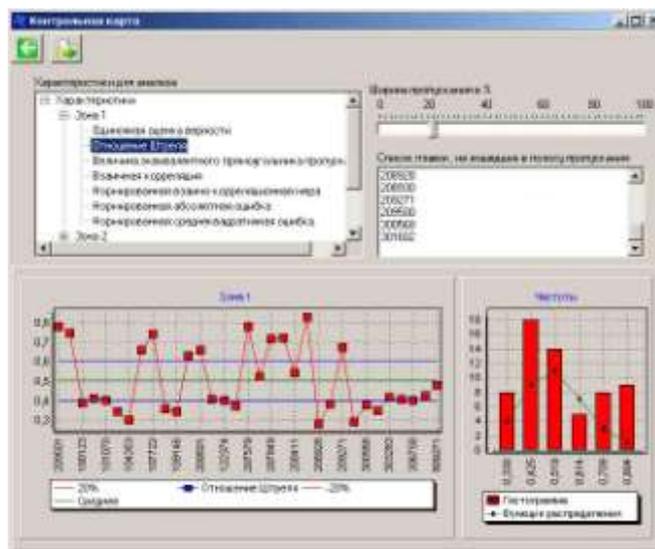


Рисунок 2.57 – Вид рабочего окна программного модуля с результатами графического анализа данных по контрольным картам

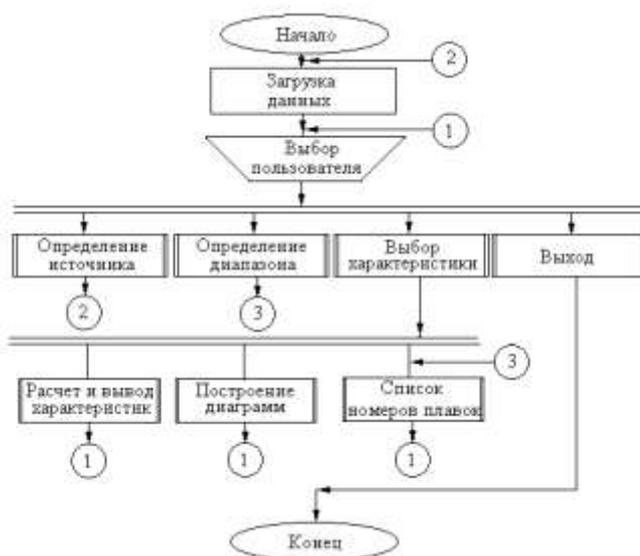


Рисунок 2.58 – Логическая схема модуля графического отображения контрольных карт

2.5.3 Сопоставление и обобщение результатов анализа научно-информационных источников и исследований

Предложены математическая модель и критерии распознавания объектов, характеризующих дефекты заготовки, на фоне изображения серного отпечатка с низкой контрастностью. Модель и критерии, в отличие от известных, учитывают нерегулярность и случайность расположения объектов, низкую контрастность изображения, что позволяет автоматизировать процесс получения экспертной информации, отвечающей требованиям отраслевого стандарта.

2.5.4 Оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем

Разработана эргатическая подсистема оценки качества заготовки, отличающаяся обработкой изображения с использованием предложенных моделей и критериев. Подсистема позволяет снизить влияние человеческого фактора на оценку качества заготовки, сформировать электронную библиотеку изображений отпечатков и получать расширенную информацию о свойствах изображения.

2.5.5 Рекомендации по использованию результатов проведенных НИР в АСУ ТП непрерывной разливки стали

Наличие системы автоматизированной оценки качества и математического моделирования теплового состояния заготовки позволили разработать методику исследования качественных зависимостей между значениями температурных полей в поперечном сечении заготовки и значениями поля вероятности нарушения ее сплошности. Задачей исследования является разработка методики для определения наличия качественной взаимосвязи для вероятности образования внутренних дефектов непрерывно-литой заготовки по серному отпечатку поперечного темплета и температурными полями заготовки по мере продвижения ее в зонах вторичного охлаждения.

В качестве исходных данных для исследования были выбраны:

- изображения серных отпечатков поперечных темплетов, которые прошли сканирование и оцифровку для определения вероятности образования внутренних дефектов по методологии автоматизированной оценки качества и соответствующей ОСТ 14–1–235–91 «Сталь. Метод контроля макроструктуры непрерывно-литых заготовок для производства сортового проката и трубных заготовок»;

- технические и технологические параметры непрерывной разливки стали инструкции непрерывной разливки стали в электросталеплавильном цехе ОАО «ММК»;

- результаты математического моделирования теплового состояния заготовки по модели.

Исследования проводились по схеме, включающей в себя:

- комплекс мероприятий по сбору экспериментальной информации на основе обработки оригинальных темплетов, изготовления серных отпечатков и их оцифровки;

- комплекс математического моделирования теплового состояния заготовки с помощью программного комплекса с использованием средств вычислительной техники;

- объединение результатов каждого из указанных комплексов в процессе определения качественной взаимосвязи между полем вероятности образования дефектов и температурными полями заготовки;

- графическое отображение результатов исследования в виде поверхностей уровня и коррелограмм качественных зависимостей.

2.5.6 Рекомендации по использованию результатов НИР при создании научно-образовательных курсов

С использованием результатов научного исследования подготовлены макеты учебных пособий и методических указаний к лабораторным работам для направления 230100 – Информатика и вычислительная техника по дис-

циплине «Теория распознавания образов» и «Человеко-машинное взаимодействие».

Выполнены исследования по выявлению приоритетов при принятии молодых специалистов различной квалификации (бакалавр, инженер, магистр) на работу.

Определена роль компетентностного подхода в построении образовательных программ согласно требованиям ФГОС III поколения. В связи с этим проект новой образовательной программы введен новый курс «Основы компьютерного зрения» и расширены рамки существующего курса «Человеко-машинное взаимодействие». Определена недостаточная потребность в знаниях выпускников по дисциплинам, направленным на научное обоснование технических разработок и математического моделирования процессов в металлургии.

В связи с этим рекомендуется расширять круг задач, решение которых основано на методах математического моделирования, и сформировать у студентов навыки научного обоснования полученных результатов.

3 ПУБЛИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР

3.1 Заключение экспертной комиссии по открытому опубликованию научных статей в изданиях, рекомендованных ВАК



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова»
государственный технический
университет им. Г.И.Носова
К.Н. Вдовин
«10» сентября 2009 г.

Экспертное заключение о возможности опубликования

Экспертная комиссия (руководитель-эксперт) Вечёркин М.В.
ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова» Министерства образования и науки РФ
(организация с указанием ведомственной принадлежности)

рассмотрев статью Знаков В.М., Воробей П.Т., Кузнецов Л.Б.
«Анализ обескисления для гидрометаллургических процессов в прокатном стане»
(Ф.И.О. автора, вид, название материала)

подтверждает, что в материале: не содержится информации
с ограниченным доступом
(содержится ли информация с ограниченным доступом)

На публикацию материалов не следует
(следует ли)

получить разрешение Министерства образования и науки РФ
(организации)

Заключение руководитель эксперт считает возможным опубликование данных
материалов в открытой печати

Председатель комиссии (руководитель-эксперт)

Зам. декана факультета АиВТ по научной работе Вечёркин М.В.
(должность, подпись, инициалы и фамилия)

«10» сентября 2009 г.



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ГОУ ВПО «Магнитогорский
государственный технический
университет им. Г.И.Носова»

К.Н. Вдовин

« 9 » февраля 2010 г.

**Экспертное заключение
о возможности опубликования**

Экспертная комиссия (руководитель-эксперт) Вечёркин М.В.
ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова» Министерства образования и науки РФ
(организация с указанием ведомственной принадлежности)

рассмотрев статью Лазурский В.С., Коромылов А.В. "Судебная
социальная работа переводов экзотических в много-
уровневой системе образования России"
(Ф.И.О. автора, вид, название материала)

подтверждает, что в материале: не содержится информации
с ограниченным доступом
(содержится ли информация с ограниченным доступом)

На публикацию материалов не следует
(следует ли)

получить разрешение Министерства образования и науки РФ
(организация)

Заключение руководитель эксперт считает возможным опубликование данных
материалов в открытой печати

Председатель комиссии (руководитель-эксперт)

Зам. декана факультета АиВТ по научной работе Вечёркин М.В.
(должность, подпись, инициалы и фамилия)

« 1 » февраля 2010 г.



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ГОУ ВПО «Магнитогорский
государственный технический
университет им. Г.И.Носова»

К.Н. Вдовин

« 6 » декабря 2009 г.

**Экспертное заключение
о возможности опубликования**

Экспертная комиссия (руководитель-эксперт) Вечёркин М.В.
ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова» Министерства образования и науки РФ
(организации с указанием ведомственной принадлежности)

рассмотрев статью Андреева Т.А., Егоровой М.Т., Лухта В.Б.,
Полгаренко Э.Т. "Термодинамическое обоснование низкотемпературного
массетического медведькожания температурных процессов
в массивных сварных швах"
(Ф.И.О. автора, вид, название материала)

подтверждает, что в материале: не содержится информации
с ограниченным доступом
(содержится ли информация с ограниченным доступом)

На публикацию материалов не следует
(следует ли)

получить разрешение Министерства образования и науки РФ
(организации)

Заключение руководитель эксперт считает возможным опубликование данных
материалов в открытой печати

Председатель комиссии (руководитель-эксперт)

Зам. декана факультета АиВТ по научной работе Вечёркин М.В. Вечёркин
(должность, подпись, инициалы и фамилия)

« 5 » декабря 2009 г.



УТВЕРЖДАЮ

Профессор по научной работе
ГОУ ВПО «Магнитогорский
государственный технический
университет им. Г.И.Носова»

К.Н. Вдовин

15 « января 2010 г.

Экспертное заключение о возможности опубликования

Экспертная комиссия (руководитель-эксперт) Вечёркин М.В.
ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова» Министерства образования и науки РФ
(организация с указанием ведомственной принадлежности)

рассмотрев статью Слахова И.М., Мухомовой О.С. "Уравнение
обобщенной эллипсоидальной сшивки в конне
рговых цепи косвенного тока"
(Ф.И.О. автора, вид, название материала)

подтверждает, что в материале: не содержится информации
с ограниченным доступом
(содержится ли информация с ограниченным доступом)

На публикацию материалов не следует
(следует ли)

получить разрешение Министерства образования и науки РФ
(организации)

Заключение руководитель эксперт считает возможным опубликование данных
материалов в открытой печати

Председатель комиссии (руководитель-эксперт)

Зам. декана факультета АиВТ по научной работе Вечёркин М.В.
(должность, подпись, инициалы и фамилия)

« 13 » января 2010 г.

Копии статей, опубликованных в журнале с обязательной ссылкой на проведение НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы

3.2.1 Копия статьи «Программное обеспечение для моделирования тепловых процессов в прокатном валке

программные продукты и системы		№ 1, 2010 г.
СОДЕРЖАНИЕ		
<i>Калесников Д.А., Симанков В.С.</i> Режимы работы ситуационного центра регионального уровня.....		3
<i>Власенко А.В., Марков В.Н.</i> Метод построения окрестности глобального оптимума NPS-задач на ранжированном дереве поиска решений.....		6
<i>Мишин А.А., Добрынин В.Н., Литвинцева Л.В.</i> Технология мягких вычислений в проектировании интеллектуальных систем управления.....		10
<i>Бушин С.А., Курейчик В.В.</i> Размещение узлов и блоков радиоэлектронной и электронно-вычислительной техники на основе бионических методов.....		12
<i>Керимов А.К., Давудова Р.И.</i> Программная реализация эволюционного алгоритма решения одной задачи автоматической классификации.....		15
<i>Еремев А.П., Митрофанов Д.Ю.</i> Методы удовлетворения временных ограничений в интеллектуальных системах поддержки принятия решений реального времени.....		18
<i>Посылкин М.А.</i> Решение задач глобальной оптимизации в среде распределенных вычислений.....		23
<i>Дрождин В.В., Володин А.М.</i> Синергетический подход к организации структур данных.....		29
<i>Белов А.Н., Масюков В.В.</i> Численно-аналитические исследования эволюции дискретных структур.....		34
<i>Ошемков А.А.</i> Опыт разработки программ для кластеров на механико-математическом факультете МГУ.....		37
<i>Рыльчиков А.Г.</i> Автоматизированная система поиска физических эффектов по запросу на естественном языке.....		40
<i>Дрождин В.В., Тобольченко В.М.</i> Операции преобразования грамматики.....		42
<i>Янюшкин В.В.</i> Кластеры распределенной системы тренажерно-моделирующего комплекса в задаче агрегации фракталов.....		46
<i>Мышев А.В.</i> Модели активной памяти на бинарных полях в технологиях виртуализации каналов передачи и хранения информации.....		54
<i>Ососков Г.А., Нечаевский А.В.</i> Методы хранения данных систем видеонаблюдения с использованием грид-технологий.....		58
<i>Белозеров А.С., Коробицын В.В.</i> Реализация вычислений на графическом процессоре с использованием платформы NVIDIA CUDA.....		62
<i>Мосин С.Г.</i> Маршрут тестопригодного проектирования электронных устройств в САПР компании Mentor Graphics.....		65
<i>Иващенко А.В.</i> Исследование свойств информационной среды с помощью интервально-корреляционных функций.....		68
<i>Зинченко Р.Е.</i> Системно-изоморфное динамическое соответствие концептуальной модели предметной области и схемы базы данных.....		71
<i>Антипин А.Ф.</i> Сравнительный анализ быстродействия дискретно-логического регулятора.....		75
<i>Янков И.А., Шибанов С.В., Шашков Б.Д.</i> Модель расписаний с древовидной структурой связей.....		77
<i>Логинов И.В., Лебедев Е.В.</i> Моделирование потока запросов в распределенных вычислительных системах.....		79
<i>Палюх Б.В., Бурдо Г.Б., Розозин Г.И.</i> Программные средства имитационного моделирования размерной структуры технологических процессов.....		82
<i>Баубаков С.В.</i> Система комплексной автоматизации технологической подготовки производства.....		85
<i>Ильясов Б.Г., Макарова Е.А., Паллова А.Н.</i> Интеллектуальная информационная система поддержки процедур управления воспроизводственным процессом.....		88
<i>Баин А.М.</i> Автоматизированная обучающая система в области технической диагностики.....		90

Ларин С.Н. Практическая реализация исследований в области оптимизации технологических процессов.....	93
Лихачев В.Е. Модель мультиагента прогнозирования автоматизированных систем управления.....	95
Костарев С.Н. Автоматизированное проектирование природно-технических систем утилизации отходов.....	98
Букреев А.Ю., Тутарова В.Д., Калитаев А.Н., Файнштейн С.И. Информационная система управления движением продукции на складах.....	101
Ячиков И.М., Егорова Л.Г., Кухта Ю.Б. Программное обеспечение для моделирования тепловых процессов в прокатном валке.....	103
Пятковский О.И., Авдеев А.С. Разработка программного комплекса адаптивного нейропрогнозирования.....	106
Григорьева М.А., Воронова Л.И. Реализация web-приложения для информационно-исследовательской системы «Шлаковые расплавы».....	109
Альмухамедов Р.Х., Поляничко М.А. Применение архитектуры одноранговых сетей в системах видеонаблюдения.....	112
Субботин С.А., Бойченко К.Ю. Автоматическая система обнаружения и распознавания автотранспортных средств на изображении.....	114
Альмухамедов Р.Х., Бобков А.И., Поляничко М.А. Устойчивость P2P систем видеонаблюдения.....	116
Аникеев Е.А. Математическая модель для расчета объема земляных работ на криволинейном участке автодороги.....	118
Симанков В.С., Колесников Д.А. Системная динамическая модель управления процессом ликвидации кризисных ситуаций с использованием сетей Петри.....	120
Левандовский В.И. Функция оптимизации затрат на рекламные услуги в информационной системе бухучета.....	123
Гусева А.И., Сидоренко Е.В., Тихомирова А.Н. Моделирование процесса принятия решений с использованием характеристического управления.....	126
Кудинов А.Н., Сажина О.И., Цветков В.П., Цветков И.В. Фрактальный анализ динамики цен на нефть.....	130
Кратович П.В. Нейросетевая модель прогнозирования временных рядов финансовых данных.....	132
Андреев В.В., Герова Н.В. Требования к информационной системе управления учебным процессом вуза.....	135
Анциферова В.И., Сербулов Ю.С., Зольников В.К. Управление образовательным процессом.....	138
Гусева А.И., Гаевилов С.И., Тихомирова А.Н. Модель управления качеством информационно-образовательных ресурсов.....	140
Панюшкин Н.Н. Внедрение компьютерных технологий в лабораторный практикум.....	143
Андреев В.В. Рейтинговая подсистема учета успеваемости студентов.....	145
Бондаренко А.В., Визильтер Ю.В., Горемычкин В.И., Клышинский Э.С. Формальный метод транскрипции иностранных имен собственных на русский язык.....	147
Зимин М.И. Программа для оценки ситуации в лавинном очаге.....	152
Глушков И.Н. Выбор математической схемы при построении модели боевых действий.....	154
Вакуленко Н.Н., Захаров М.К., Бачев А.Г. Математическая модель сети обмена данными с коммутацией пакетов.....	158
Сливак А. Применение метода расчета параметров электрических цепей для оценки безопасности маршрута следования информации.....	161
SUMMARY	164

Алгоритм отгрузки готовой продукции состоит из следующих блоков [1]:

- процедура отгрузки заказа;
- процедура набора веса верхними стопками без перекаладываний;
- процедура корректировки текущего решения (удаление из решения одной/двух пачек и замена их верхними неиспользованными пачками из других стопок);
- процедура набора веса верхними пачками (взятие со стопки верхней пачки и переход к следующей стопке).

Информационная система позволяет отслеживать текущее состояние склада по типу и количеству размещенной на нем продукции, информации по вновь размещенным заказам, поиск продукции на складе по заданным критериям и т.д. Результат работы программы по размещению и поиску продукции на складе листопрокатного цеха по заданному критерию (№ заказа) представлен на рисунке 3.

В основе разработанной информационной системы управления движением продукции на складах заложен эвристический алгоритм размещения и отгрузки готовой продукции, являющийся эффективным полиномиальным алгоритмом, который позволит складировать продукцию в режиме реального времени строго по типоразмеру и ГОСТу с малым количеством нарушений и набирать заданный вес с высокой степенью точности, отгружать его с минимальным числом перекаладываний и максимально высвободить рабочее про-



Рис. 3. Вид окна информационной системы для графического представления состояния склада

странство склада. Такой принцип складирования позволит повысить эффективность использования грузоподъемных механизмов [2] и существенно сократить время простоя транспорта при последующей отгрузке.

Литература

1. Оперативное планирование отгрузки готовой продукции со складов металлургических предприятий / В.Д. Тузарова [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 4. С. 36–40.
2. Дыбская В.В. Управление складированием в цепях поставок. М.: Альфа-Пресс, 2009. 720 с.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОКАТНОМ ВАЛКЕ

Работа выполняется при финансировании федеральной программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»

И.М. Ячигов, к.т.н.; А.Г. Егорова, к.т.н.; Ю.Б. Кухта, к.т.н.
(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
egorov-lyudmil@yandex.ru)

В данной работе предложена и описана математическая модель температурного поля в прокатном валке при термической обработке с помощью индукционного нагрева токами различных частот. На основе предложенной модели разработан и описан программный продукт, который позволяет определять распределение нестационарных температурных полей в прокатном валке и может использоваться для выбора рациональных режимов термической обработки осесимметричных деталей машиностроения.

Ключевые слова: математическая модель, температурное поле, термическая обработка, прокатный валок, режимы.

Высокая твердость, дисперсность закаленной фазы и отсутствие на поверхности бочки валка волоховидности и микротрещин являются условиями получения холоднокатаного листового проката высокого качества. Окончательная термическая обработка является важнейшей и наиболее ответственной операцией в производстве рабочих валков холодной прокатки, обеспечивающей необхо-

димый фазовый состав, распределение этих фаз по объему и допустимое распределение термических напряжений. Неправильный режим нагрева и заковки способствует выходу валка из строя иногда даже до начала эксплуатации.

Экспериментальные работы по выбору оптимальных режимов термообработки трудоемкие и дорогостоящие, так как каждый прокатный валок

представляет собой уникальную деталь. Программный продукт «Тепловые процессы в прокатном валке при индукционном нагреве» позволяет посредством численного эксперимента подбирать рациональные режимы предварительной и окончательной термической обработки, которые обеспечивали бы получение валка требуемой твердости, но не приводили к его разрушению вследствие термонапряжений.

Объектом моделирования является прокатный валок или цилиндрическая деталь, подлежащая термической обработке. При определении температурного поля в валке при нагреве решалась двухмерная осесимметричная задача нестационарной теплопроводности и принимался ряд допущений и ограничений. Считалось, что рассматриваемые процессы нестационарные и температура существенно меняется вдоль осей r и z . Нагрев цилиндрического тела происходит при постоянном напряжении U на зажимах индуктора за счет наведения токов электромагнитной индукции в зоне действия индуктора. В тепловом отношении это эквивалентно действию внутренних источников теплоты $q_v(r, z, \tau)$, мощность которых в общем случае зависит от координат и времени. Охлаждение валка происходит с его боковой поверхности и торцов посредством вынужденной конвекции от воздуха, который набегает на вращающийся валок. В период закалки охлаждение происходит только с боковой поверхности валка посредством вынужденного движения струй воды.

Распределение температуры в рассматриваемой области описывается уравнением теплопроводности с учетом выделения тепла от индуктора:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v(r, z), \quad (1)$$

где q_v – мощность внутренних источников тепла; c, ρ, λ – теплофизические свойства материала валка [1–3].

Для решения дифференциального уравнения (1) необходимо дополнить его краевыми условиями. При $\tau=0, T(r, z)=T_0$ на оси цилиндра $r=0,$

$z=0, \dots, L$ имеем условие симметрии $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$.

На боковой поверхности цилиндра $z=0, \dots, L; r=R$ имеем охлаждение окружающим воздухом (граничное условие третьего рода):

$$\alpha_{\text{вп}}(T(R, z) - T_{\text{вп}}) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}.$$

На торцевых поверхностях цилиндра теплоотдача в окружающую среду (граничные условия третьего рода):

– на левой границе $Z=0, r=0, \dots, R:$

$$\alpha_{\text{вп}}(T(r, 0) - T_{\text{вп}}) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z};$$

– на правой границе $Z=L, r=0, \dots, R:$

$$\alpha_{\text{вп}}(T(r, L) - T_{\text{вп}}) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}.$$

В зоне действия индуктора температура поверхности валка с учетом тепловыделения $Z=Z_{\text{нп}}, \dots, Z_{\text{зк}}; r=R: c\rho \cdot dT = \bar{q}_k dt$, где \bar{q}_k – среднее объемное тепловыделение в поверхностном слое.

Охлаждение струями воды действует только при режиме закалки $Z=Z_{\text{звп}}, \dots, Z_{\text{зк}}; r=R:$

$$\alpha_{\text{в}}(T(R, z) - T_{\text{в}}) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r},$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от струй воды; $Z_{\text{звп}}, Z_{\text{зк}}$ – левая и правая границы зоны охлаждения.

Мощность, передаваемая металлу, меняется во времени в связи с изменением физических свойств металла и его температуры. При расчете передаваемую мощность условно разбиваем на этапы: холодный (P_c), промежуточный (P_n) и горячий (P_g). Холодный этап заканчивается, когда поверхность тела нагревается до температуры магнитных превращений T_k . Промежуточный этап соответствует наиболее резкому изменению магнитной проницаемости ферромагнетиков. Он начинается в момент достижения температуры магнитных превращений на поверхности валка и заканчивается, когда до этой температуры нагреваются точки, отстоящие от поверхности заготовки на глубину проникновения тока в горячий (немагнитный) материал – δ . Далее нагрев осуществляется согласно горячему этапу.

Для решения уравнения (1) использовался метод конечных разностей. На расчетную рабочую область накладывали прямоугольную сетку и использовали симметричную аппроксимацию пространственных производных. При численной реализации расчета использовался метод расщепления [4], приводящий к безусловно устойчивой локально-одномерной схеме.

Для цилиндрической стенки получим уравнение в виде трехдиагональной матрицы:

$$T_{i-1}^{k+1/2} \cdot A - T_i^{k+1/2} \cdot B + T_{i+1}^{k+1/2} \cdot C = D, \quad (2)$$

где $A = Fo_z \left(1 - \frac{1}{2i}\right); B = 1 + 2Fo_z; C = Fo_z \left(1 + \frac{1}{2i}\right);$

$$D = -T_i^k - \frac{\Delta \tau \cdot q_{v, i}}{2c\rho}; Fo_z = \frac{1}{2} \frac{a \Delta \tau}{\Delta r^2}.$$

Для плоской стенки представим систему уравнений:

$$T_{i-1}^{k+1} \cdot A - T_i^{k+1} \cdot B + T_{i+1}^{k+1} \cdot C = D, \quad (3)$$

где $A = Fo_z; B = 1 + 2Fo_z; C = Fo_z;$

$$D = -T_i^{k+1/2} - \frac{\Delta \tau \cdot q_{v, i}}{2c\rho}; Fo_z = \frac{1}{2} \frac{a \Delta \tau}{\Delta z^2}.$$

Каждая из систем уравнений (2–3) решалась методом прогонки.

В качестве исходных данных в программном продукте «Тепловые процессы в прокатном валке при индукционном нагреве» вводятся следующие технологические и теплофизические характеристики: диаметр и длина валка, плотность материала валка, теплопроводность, теплоемкость и др. Кроме того, учитываются геометрические размеры закалочной установки: диаметр и высота индуктора, ширина зоны охлаждения водой, коэффициент мощности индуктора, ток и напряжение на индукторе, диаметр сопла распылителя воды, число сопел распылителей воды, диаметр водяного коллектора.

Для реализации методов решения поставленной задачи была выбрана операционная система Windows (98/NT/2000/XP). Программирование осуществлялось в интегрированной среде разработки VBA for MS Office. Созданный программный продукт имеет удобный интерфейс и позволяет вводить и редактировать любые исходные данные, проверять их корректность и получать результаты в удобном табличном и графическом видах. Работа программы начинается с ввода основных геометрических и технологических характеристик. Далее задаются теплофизические и магнитные свойства стали обрабатываемого валка (рис. 1).

Microsoft Excel - Валок_Закалка

Параметры исходных данных				ИТ	Планировка
1	Диаметр валка	2	200	мм	
2	Длина валка	1	1000	мм	
3	Диаметр индуктора	3	200	мм	
4	Высота индуктора	4	100	мм	
5	Ширина зоны охлаждения	5	100	мм	
6	Коэффициент мощности индуктора	6	100	Вт	
7	Ток индуктора	7	100	А	
8	Напряжение на индукторе	8	100	В	
9	Диаметр сопла распылителя	9	100	мм	
10	Число сопел распылителя	10	100	шт	
11	Диаметр водяного коллектора	11	100	мм	
12	Плотность материала	12	100	кг/м ³	
13	Теплопроводность	13	100	Вт/м·К	
14	Теплоемкость	14	100	Дж/кг·К	
15	Магнитная проницаемость	15	100	Тл/А·м	
16	Температура окружающей среды	16	100	°С	
17	Температура закалки	17	100	°С	
18	Время нагрева	18	100	с	
19	Шаг по времени	19	100	с	
20	Число интервалов	20	100	шт	
21	Шаг по диаметру	21	100	мм	
22	Число интервалов по диаметру	22	100	шт	
23	Шаг по длине	23	100	мм	
24	Число интервалов по длине	24	100	шт	

Рис. 1. Окно ввода основных параметров для расчета

Перед запуском расчетов необходимо определить параметры расчетной сетки: шаг по времени, число интервалов сетки в расчетной области по диаметру и по длине валка.

После расчета пользователь может просмотреть значения температуры в любой вертикальной и горизонтальной плоскости. На закладке «Распределение температур по сечению валка» можно просмотреть графическое отображение распределения температур на оси и поверхности валка, на заданных интервалах между ними за определенный интервал времени (рис. 2), а на закладке «Изотермические поверхности» – графическое отображение распределения температур по сечению валка (рис. 3) за заданный интервал времени.

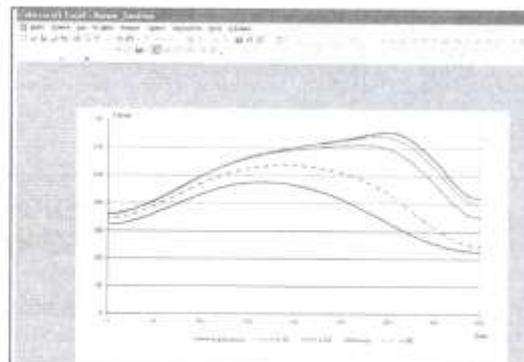


Рис. 2. Распределение температур по сечению валка

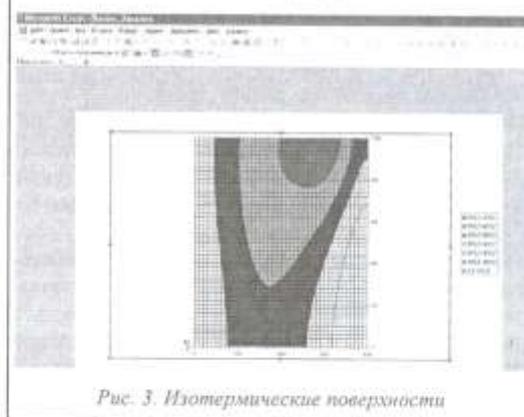


Рис. 3. Изотермические поверхности

Описанный программный продукт позволяет определять распределение нестационарных температурных полей в прокатном валке при индукционном нагреве токами различных частот двумя способами. Первый способ – одновременный нагрев, при котором индуктор охватывает всю поверхность детали, подлежащей термообработке. Второй – непрерывно-последовательный нагрев.

Программный продукт «Тепловые процессы в прокатном валке при индукционном нагреве» может использоваться для повышения технико-экономической эффективности работы действующих и проектируемых установок индукционного нагрева для термической обработки несимметричных деталей машиностроения. Его применение поможет в подборе рациональных режимов как предварительной, так и окончательной термической обработки деталей без проведения дорогостоящих экспериментов. Кроме того, данный программный продукт может использоваться как инструмент в научно-исследовательской работе студентов старших курсов металлургических специальностей, а также аспирантов и инженеров-исследователей.

Литература

1. Вдовин К.Н., Ячников И.М., Егорова Л.Г. Модель температурного состояния прокатного валка при многопроходном индукционном нагреве под закалку // Математика. Приложение

ние математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: сб. науч. тр. Магнитогорск, 2005.

2. Вафин Р.К., Покровский А.М., Лешковцев В.Г. Прочность термообрабатываемых прокатных валков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 264 с.

3. Лабейш В.Г. Жидкостное охлаждение высокотемпературного металла. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 172 с.

4. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 1967.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АДАПТИВНОГО НЕЙРОПРОГНОЗИРОВАНИЯ

О.И. Пятковский, д.т.н.; А.С. Авдеев

(Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, pol1952@mail.ru, ishimaet@bk.ru)

Предлагается комплексный подход к повышению качества нейросетевых моделей прогноза за счет использования методов предобработки временных рядов, контроля адекватности прогнозных моделей и их адаптации. Данный подход реализуется в разработанном аналитическом программном комплексе.

Ключевые слова: прогнозирование временных рядов, нейронные сети, адаптивные модели прогнозирования.

Эффективное управление предприятием невозможно без решения задач прогнозирования различных технико-экономических показателей. Существует большое количество математических моделей временных рядов, решающих задачу прогнозирования, в том числе на базе аппарата искусственных нейронных сетей [1]. При использовании данных моделей возникает необходимость в адаптивном прогнозе. В связи с этим актуальной является разработка новых методов, алгоритмов и программно-математических инструментариев на их основе, делающих возможным получение эффективных прогнозных моделей с механизмом адаптации.

Цель работы – разработка программного комплекса адаптивного нейропрогнозирования вре-

менных рядов на примере объемов продаж автомобилей. Общая структура информационных систем (ИС), использующих интеллектуальные аналитические модули, показана на рисунке 1. Интеллектуальные модули представлены в виде гибридных экспертных систем {ГЭС₁, ГЭС₂, ..., ГЭС_n}, в которых используются нейросетевые адаптивные блоки {НС₁, НС₂, ..., НС_G} с модулями датчиков {МД₁, МД₂, ..., МД_n} [2]. На вход датчиков поступают измеряемые показатели процесса, на основе которых рассчитываются коэффициенты {K₁, K₂, ..., K_m}; значения коэффициентов используются модулями принятия решений {МПРД₁, МПРД₂, ..., МПРД_n}. Далее они поступают в блок принятия решения более высокого уровня для управления работой интеллектуального блока.

Представленная система позволяет осуществлять контроль за следующими этапами создания прогнозной нейросетевой модели: проверка однородности данных, фильтрация ряда, повышение информативности данных, погружение ряда, формирование комитета сетей. На рисунке 2 представлена модель нейросетевого блока с адаптивными датчиками.

В состав каждого контролирующего блока входят модуль датчика, перечень рассчитываемых коэффициентов, а также модуль принятия решений, в котором в виде правил продукции заложен алгоритм действий в зависимости от значений коэффициентов.

С помощью методов фильтрации снижается размерность ряда, отделяются трендовые изменения от нетрендовых. В модели используются следующие методы фильтрации: скользящее среднее, экспоненциальное сглаживание, вейвлет-преобразование. Ал-

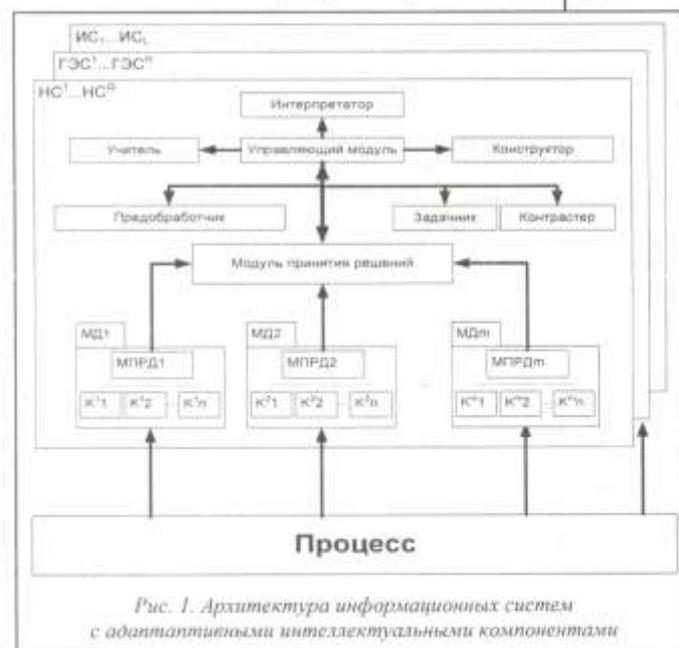


Рис. 1. Архитектура информационных систем с адаптивными интеллектуальными компонентами

3.2.2 Копия статьи «Оценка социального заказа подготовки специалистов в многоуровневой системе образования России»



КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ

8 Николай Плотников

Ресурсная теория изменений и организационные реформы
Исследуются возможности для приложения теории катастроф к описанию изменений в организованных формах деятельности. Предлагается соответствующая модель.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ

19 Елена Юшина

Принципы муниципального управления в условиях социального государства

Рассматривается сущность муниципального управления. Приводятся основные принципы муниципального управления как одного из важнейших элементов местного самоуправления.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

26 Владислав Мартынов

Компания SAP:
ориентир на эффективность

Описываются направления деятельности SAP – крупной компании, специализирующейся в области программного обеспечения для автоматизации бизнеса. Показаны конкретные задачи, решаемые с помощью продуктов SAP в России.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ

33 Александр Костюк, Екатерина Кондрунина

Кодексы корпоративного управления в странах Европейского союза и СНГ

Анализируется опыт формирования наилучших практик корпоративного управления в странах ЕС и СНГ. Определены основные этапы эволюции кодексов корпоративного управления. Систематизированы важные проблемы их создания и внедрения в странах ЕС, России, Украине и Казахстане.

УПРАВЛЕНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ

43 Валентина Королева, Оксана Логунова, Петр Макарычев

Оценка социального заказа на подготовку кадров
в многоуровневой системе образования России

Рассматриваются аспекты социального заказа по подготовке кадров, проблемы его реализации и предлагается качественно новая методика исследования в области анкетирования разнотипных слоев общества. Приведены результаты применения методики, которые продемонстрировали необходимость активизации работы с населением.

УПРАВЛЕНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ

ОЦЕНКА СОЦИАЛЬНОГО ЗАКАЗА НА ПОДГОТОВКУ КАДРОВ В МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ¹



ВАЛЕНТИНА КОРОЛЕВА
кандидат педагогических
наук, доцент кафедры
«Информатика и
информационные технологии»

Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова*



ОКСАНА ЛОГУНОВА
доктор технических наук,
профессор кафедры
«Вычислительная техника
и прикладная математика»



ПЕТР МАКАРЫЧЕВ
доктор технических наук,
заведующий кафедрой
«Математическое обеспе-
чение и применение ЭВМ»
Пензенский
государственный
университет

*455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 38
logunova66@mail.ru

ключевые слова: многоуровневая система образования, социальный заказ, аспекты, проблемы, методика исследования

- Сложность и структурированность системы высшего образования в России во многом усложняют реализацию социального заказа на подготовку кадров
- Предлагаемая методика исследования социального заказа является качественно новой в области анкетирования различных слоев общества
- В настоящее время существует социальный заказ на подготовку бакалавров и магистров наук

Социальный заказ в сфере подготовки кадров является многоаспектным, охватывает требования общества, интегрирующие субъективные и объектив-

ные потребности личности и семьи, оказывает управляющее воздействие на развитие образовательной системы в России (рис. 1).

¹ Работа выполняется в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по государственному контракту № П2402.



Рис. 1. Аспекты социального заказа на подготовку кадров в России

Указанные аспекты не вступают между собой в противоречия. Личность, реализующая себя в обществе, способна согласовывать субъективные требования с потребностями государства.

Реализация субъективного аспекта в области подготовки высококвалифицированных кадров опирается на информированность личности о состоянии сферы высшего образования, ее структурном преобразовании в историческом развитии и перспективах построения в обозримом будущем.

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ В РОССИИ

Для прогрессивного развития общества необходимо развивать и совершенствовать систему аттестации кадров в России. За время своего существования эта система претерпела ряд изменений и преобразований, которые не всегда были последовательными и конструктивными. До 80-х годов XIX века была принята структура аттестации кадров, приведенная на рис. 2.

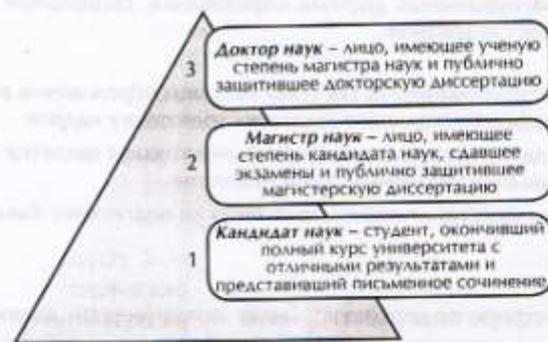


Рис. 2. Структура ученых степеней в России до 80-х годов XIX века

В конце XIX века, точнее, в 1884 г. был принят университетский устав, в котором ученая степень «кандидат наук» была упразднена. В октябре 1918 г. были упразднены все ученые степени и звания, и только в январе 1934 г. Совет Народных Комиссаров СССР принял постановление «Об ученых степенях и званиях», утвердившее ученые степени «кандидат наук» и «доктор наук». Содержание и статус новой степени «кандидат наук», несмотря на созвучие с первой ученой степенью дореволюционного периода, стали качественно иными [1].

Наиболее существенные структурные преобразования высшей школы России были проведены в первой половине 90-х годов прошлого века в результате принятия Комитетом по высшей школе постановления от

13.03.92 г. № 13 «О введении многоуровневой структуры высшего образования в Российской Федерации». Этим постановлением были утверждены временное положение «О многоуровневой структуре высшего образования Российской Федерации» и положение «О порядке реализации государственными высшими учебными заведениями образовательно-профессиональных программ». Документы явились нормативной основой для введения многоуровневой системы высшего образования, реализуемой преемственными образовательными программами трех уровней (табл. 1). Для ее построения наряду с такой традиционной единицей формирования программ, как «специальность», была введена новая структурная единица – «направление обучения» [2].

Таблица 1

УРОВНИ ОБРАЗОВАНИЯ И ИХ ЦЕЛИ

Уровень	Цель	Продолжительность обучения
Образовательно-профессиональные программы первого уровня	Дипломы о неполном высшем образовании с присвоением квалификации согласно перечню специальностей среднего профессионального (специального) образования	3–3,5 года
Базовое высшее образование второго уровня	Овладение системой научных знаний о человеке и обществе, истории и культуре, получение фундаментальной естественно-научной подготовки и основ профессиональных знаний по направлениям обучения	Не менее 4 лет
Образовательно-профессиональные программы третьего уровня Единая программа	Реализуется на основе общего среднего образования с присвоением квалификации «дипломированный специалист»	5–6 лет
Магистерская программа	Реализуется на основе базового высшего образования с присвоением квалификации «дипломированный специалист»	2–3 года

Предполагалось, что все выпускники, освоившие любую образовательно-профессиональную программу третьего уровня, имеют право поступления в аспирантуру. Структура аспирантуры осталась без изменений (с трехлетним

сроком по очной форме обучения как для магистров, так и для дипломированных специалистов).

В 1996 г. вступил в силу Федеральный закон от 28.08.96 г. № 125-ФЗ «О высшем и послевузовском профес-

сиональном образовании» (в ред. от 21.12.09 г.). Новым законом были установлены ступени высшего профессионального образования, определяемые в соответствии с присваиваемой после их успешного освоения квалификацией (степенью): «бакалавр», «дипломированный специалист» или «магистр».

На Всероссийском совещании по проблемам развития многоуровневой системы подготовки специалистов в Российской Федерации (25–26 ноября 2002 г.) было отмечено, что в настоящее время реализуются две образовательные подсистемы [2, 3]:

одноступенчатые основные образовательные программы подготовки дипломированных специалистов по специальностям или группам родственных специальностей – направлениям подготовки дипломированного специалиста;

двухступенчатые основные образовательные программы по направлениям подготовки бакалавра и магистра с присуждением выпускникам соответствующей степени (квалификации).

После присоединения России к Болонскому процессу в сентябре 2003 г. все положения Декларации, включая положение об использовании в национальных системах образования «однозначно воспринимаемых и сопоставимых квалификаций», приняли характер международных обязательств, подлежащих исполнению.

Созданная к настоящему времени в Российской Федерации многоуровневая структура профессионального высшего образования по многим параметрам достаточно органично соответствует положениям Болонской декларации, и существующие ступени высшего образования (бакалавр → дипломированный специалист и магистр) могут быть приняты за основу рекомендуемой Болонской декларацией структуры квалификаций.

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ СОЦИАЛЬНОГО ЗАКАЗА

Сложность и структурированность системы высшего образования в России во многом усложняют реализацию социального заказа на подготовку кадров. К таким проблемам можно отнести:

сохранение и развитие достижений и традиций российской высшей школы как принципа государственной политики, зафиксированной законом (п.п. 3 п. 1 ст. 2 Закона № 125-ФЗ);

устранение противоречий структуры степеней и квалификаций российского высшего образования с установками Болонского процесса;

преодоление порогов стереотипного мышления населения России по уровням подготовки кадров в высшей школе;

недостаточную информированность населения об изменениях структуры многоуровневого образования по требованиям Болонского процесса;

сохранение фундаментальных знаний на всех уровнях образования с добавлением фактора профессиональных компетенций.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СОЦИАЛЬНОГО ЗАКАЗА ОБЩЕСТВА НА ПОДГОТОВКУ КВАЛИФИЦИРОВАННЫХ КАДРОВ

Для изучения социального заказа общества на подготовку кадров в многоуровневой системе образования была использована методика анкетирования для различных групп населения. Структура состава респондентов представлена на рис. 3 и 4.

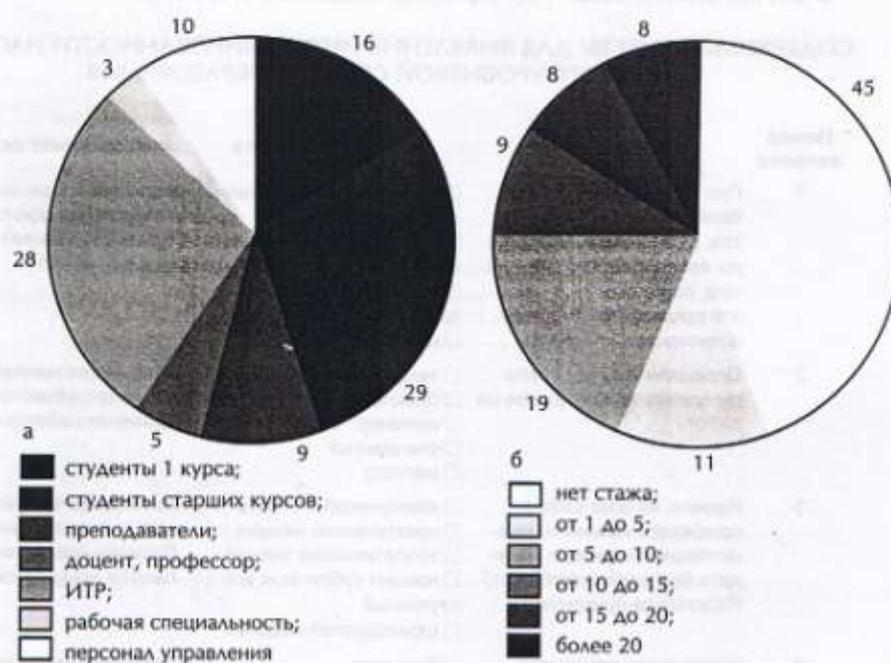


Рис. 3. Структура состава респондентов: а – по занимаемым должностям; б – по стажу работы на предприятиях и в организациях

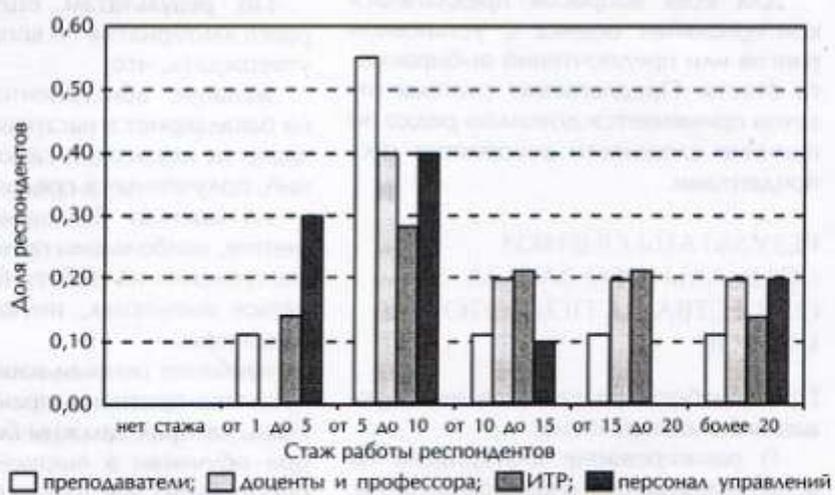


Рис. 4. Диаграмма стажевых групп по занимаемым должностям

В состав анкеты вошли вопросы, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

СОДЕРЖАНИЕ АНКЕТЫ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ИНФОРМИРОВАННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ
О МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ

Номер вопроса	Вопрос	Варианты ответов	Назначение вопроса
1	При формировании групп бакалавров и специалистов, как правило, бакалавры оказываются слабее. С чем, по Вашему мнению, это связано? Установите возможные приоритеты	<input type="checkbox"/> заниженные требования при поступлении <input type="checkbox"/> заниженная самооценка абитуриентов <input type="checkbox"/> рекомендации работодателей <input type="checkbox"/> социальная среда	Выяснение основных причин уровня подготовки абитуриентов при поступлении на бакалавриат
2	Определите приоритеты выпускников при приеме на работу	<input type="checkbox"/> техник <input type="checkbox"/> бакалавр <input type="checkbox"/> инженер <input type="checkbox"/> специалист <input type="checkbox"/> магистр	Учет общественного мнения о потребностях и требованиях работодателей
3	Какими, на Ваш взгляд, профессиональными компетенциями должен обладать будущий специалист? Расставьте приоритеты	<input type="checkbox"/> коммуникабельность <input type="checkbox"/> практические навыки <input type="checkbox"/> теоретические знания <input type="checkbox"/> навыки публичных выступлений <input type="checkbox"/> стрессоустойчивость	Выяснение профессиональных компетенций для будущих специалистов являются первостепенными
4	У кого выше приоритет продолжить свою деятельность в науке?	<input type="checkbox"/> бакалавр <input type="checkbox"/> специалист <input type="checkbox"/> инженер <input type="checkbox"/> магистр	Определение ступеней подготовки специалистов наиболее подготовленных для научной деятельности

Для всех вопросов предлагалась критериальная оценка с установкой рангов или предпочтений выбираемого ответа. Предлагаемая система ответов применяется довольно редко по причине сложности восприятия респондентами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ
СОЦИАЛЬНОГО ЗАКАЗА
ОБЩЕСТВА НА ПОДГОТОВКУ
КАДРОВ

При обработке результатов анкетирования было выполнено:

1) *ранжирование альтернатив по всем респондентам в каждом вопросе.* Результаты ранжирования приведены на рис. 5 и в табл. 3.

По результатам оценки общего ранга альтернатив по вопросам можно утверждать, что:

желание абитуриентов поступить на бакалавриат в настоящее время вызвано их невысокой самооценкой знаний, полученных в средней школе;

по мнению большинства респондентов, наибольшим приоритетом при поступлении на работу будет пользоваться выпускник, имеющий степень бакалавра;

наиболее ценным навыком для выпускника признаны практические навыки, которые должны быть получены при обучении в высшей школе. Это обусловлено тем, что на производстве требуется практически подготовленный специалист;

выпускники, имеющие степень магистра наук, должны ориентироваться на дальнейшую научно-исследовательскую деятельность. Это связано с тем, что данная степень фиксирует образовательный уровень, направленность полученного образования на научно-исследовательскую и научно-педагогическую деятельность, наличие умений и навыков, необходимых начинающему научному работнику

или преподавателю. Выпускник магистратуры, освоивший шестилетнюю основную образовательную программу – это широко эрудированный профессионал с фундаментальной научной подготовкой, владеющий методологией научного и педагогического творчества, современными информационными технологиями, подготовленный к научной и педагогической работе;

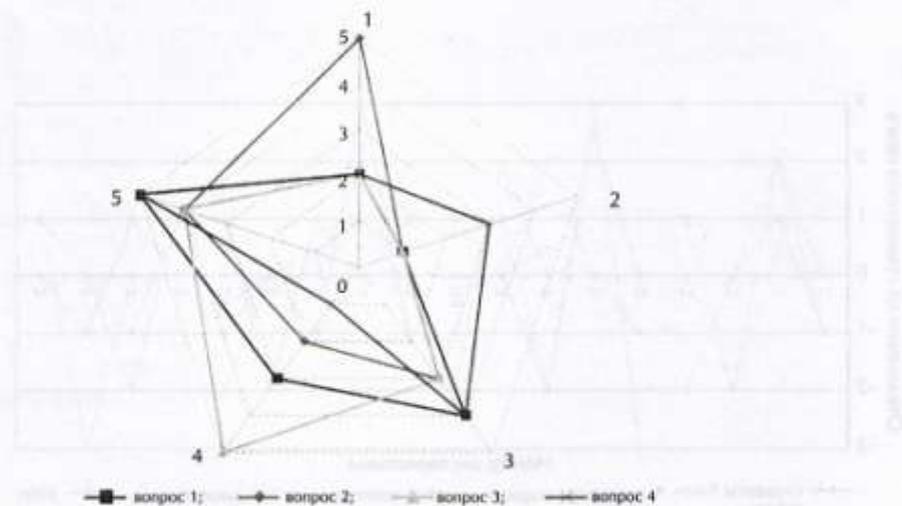


Рис. 5. Диаграмма ранжирования ответов по вопросам анкеты

РАНЖИРОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВ ПО ОТВЕТАМ РЕСПОНДЕНТОВ*

Таблица 3

Номер вопроса	Ранжирование ответов
1	$a_2 > a_1 > a_4 > a_3$
2	$a_2 > a_4 > a_3 > a_5 > a_1$
3	$a_2 > a_1 > a_3 > a_5 > a_4$
4	$a_4 > a_1 > a_2 > a_3$

2) ранжирование альтернатив по группам респондентов в каждом вопросе.

* В табл. 3 и ниже введено обозначение вариантов ответов (альтернатив) a_j , $j = 1, k$ – количество ответов в выбранном вопросе.

Результаты ранжирования приведены в табл. 4. На рис. 6 представлена графическая оценка отклонения групповых рангов альтернатив от общего ранга всех респондентов.

РАНЖИРОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВ ПО ГРУППАМ РЕСПОНДЕНТОВ

Группа	Номер вопроса			
	1	2	3	4
Студенты 1-го курса	$a_1 > a_2 > a_4 > a_3$	$a_2 > a_4 > a_3 > a_5 > a_1$	$a_2 > a_1 > a_2 > a_3 > a_5$	$a_2 > a_1 > a_3 > a_2$
Студенты старших курсов	$a_1 > a_3 > a_2 > a_4$	$a_2 > a_4 > a_3 > a_1 > a_5$	$a_2 > a_3 > a_1 > a_5 > a_4$	$a_1 > a_2 > a_1 > a_3$
Преподаватель	$a_1 > a_2 > a_4 > a_3$	$a_3 > a_4 > a_2 < a_5 > a_1$	$a_1 > a_2 > a_3 < a_5 > a_4$	$a_1 > a_1 > a_2 > a_3$
Доцент, профессор	$a_1 > a_2 > a_3 > a_4$	$a_2 > a_4 > a_3 > a_1 > a_5$	$a_2 > a_3 > a_3 > a_1 > a_4$	$a_3 > a_4 > a_1 > a_2 > a_1$
ИТР	$a_2 > a_1 > a_4 > a_3$	$a_2 > a_4 > a_3 < a_5 > a_1$	$a_1 > a_3 > a_5 > a_2 > a_4$	$a_4 > a_1 > a_3 > a_2$
Рабочая специальность	$a_4 > a_1 > a_2 > a_3$	$a_3 > a_4 > a_4 > a_2 > a_3$	$a_1 > a_3 < a_5 < a_4 > a_1$	$a_2 > a_4 > a_1 > a_3$
Персонал управлений	$a_2 > a_1 > a_4 > a_3$	$a_2 > a_3 > a_3 > a_4 > a_1$	$a_1 > a_2 > a_3 > a_3 > a_4$	$a_4 > a_2 > a_1 > a_3$



Рис. 6. Диаграмма отклонений групповых рангов от общего ранга, установленного всеми респондентами

По результатам оценки ранжировки альтернатив по группам в каждом вопросе было выявлено следующее:

большинство респондентов (студенты 1-го курса, студенты старших курсов, преподаватели, доценты и профессора) считают, что желание абитуриентов поступать на бакалавриат вызвано заниженными требованиями

ми при поступлении, плохой информированностью о перспективах, которые будет иметь бакалавр по окончании обучения;

по мнению абсолютного большинства респондентов (студенты 1-го курса, студенты старших курсов, доценты и профессора, ИТР, персонал управлений), преимуществом при поступлении

на работу будет пользоваться специалист со степенью бакалавра; наиболее ценным качеством для специалиста признана коммуникабельность (преподаватели, ИТР, персонал управлений, рабочие специальности); выпускники, получившие степень магистра, имеют больше шансов продолжить научную деятельность (студенты 1-го курса, студенты старших курсов, преподаватели, ИТР, персонал управлений);

3) оценка согласованности респондентов в их общем объеме и по группам. Оценка согласованности экспертов проводилась на основе коэффициента конкордации Кендалла:

$$W = \frac{D}{D_{\max}}$$

где $D = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m D_j$, $D_j = (r_j - \bar{r})^2$, $r_j = \sum_{i=1}^m r_{ij}$,
 $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m r_j$, $D_{\max} = \max_{j=1, \dots, m} \{D_j\}$ и приняты обозначения: m – количество экспертов; n – количество альтернатив в вопросе; r_j – ранг, установленный i -м экспертом для j -й альтернативы. Была выдвинута гипотеза о том, что ответы экспертов на каждый из вопросов согласованы. Значения коэффициентов конкордации по общему составу респондентов и по группам приведены в табл. 5.

Таблица 5

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНКОРДАЦИИ ПРИ ОЦЕНКЕ СОГЛАСОВАННОСТИ РЕСПОНДЕНТОВ

Группа	Вопрос 1	Вопрос 2	Вопрос 3	Вопрос 4
Все респонденты	0,53	0,41	0,61	0,35
Студенты 1-го курса	0,64	0,50	0,35	0,35
Студенты старших курсов	0,38	0,32	0,32	0,51
Преподаватель	0,43	0,29	0,26	0,39
Доцент, профессор	0,35	0,41	0,34	0,55
ИТР	0,40	0,36	0,36	0,34
Рабочая специальность	0,55	0,52	0,40	0,68
Персонал управлений	0,43	0,39	0,36	0,38

При заданном объеме выборки коэффициенты конкордации значительно отличаются от 0, и, следовательно, нет оснований отвергать гипотезу о согласованности респондентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование информированности населения о системе многоуровневого образования показало, что в состав респондентов включены студенты и работники высшей школы и высших

образовательных учреждений. Выбор такого состава обусловлен контингентом людей, связанных с перспективой самореализации в обществе и потенциальными способностями.

При анализе ранжирования альтернатив по ответам респондентов установлено существенное противоречие между сокращением часов производственной практики и качеством получаемых практических навыков при обучении, что вызвано реструктуризацией высшего образования.

Что касается изменений приоритетов по группам, то было выявлено следующее:

желание абитуриентов поступить на бакалавриат в настоящее время вызвано не только их невысокой самооценкой знаний, полученных в средней школе, но и заниженными требованиями при поступлении;

наиболее ценными навыками для специалиста считаются коммуникабельность и практические навыки, полученные при обучении, так как выпускники по окончании университета, как правило, нацелены на руководящие должности.

Согласованность коэффициента конкордации показывает, что мнение разнотипных слоев общества можно принять за экспертную оценку.

Предлагаемая методика исследования социального заказа является ка-

чественно новой в области анкетирования разнотипных (различных) слоев общества.

Анализируя субъективные и объективные аспекты социального заказа в сфере подготовки кадров в России, можно сделать вывод о том, что в настоящее время существует социальный заказ на подготовку бакалавров и магистров наук. Это связано с политикой государства и подписанием Болонской декларации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сенашенко В.С. Участие в Болонском процессе//Советский физик. – 2004. – № 3(39).
2. Смирнов С. Болонский процесс: перспективы развития в России//Высшее образование в России. – 2004. – № 1.
3. Пузанков Д., Федоров И., Шадрин В. Двухступенчатая система подготовки специалистов//Высшее образование в России. – 2004. – № 2.

1	2	3	4
0,1	0,2	0,3	0,4
0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,4	0,5	0,6
0,4	0,5	0,6	0,7
0,5	0,6	0,7	0,8
0,6	0,7	0,8	0,9
0,7	0,8	0,9	1,0

3.2.3 Копия статьи «Программное обеспечение для математического моделирования тепловых процессов в слоистых структурах»

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ		ISSN 2073-2597
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ		Федеральное государственное университетное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации — федеральный информационно-аналитический центр оборонной промышленности" Открытое акционерное общество «ГСКБ "Алмаз-Антей" им. академика А. А. Расплеткина»
№ 2 2010		Основан в 1976 г.
СОДЕРЖАНИЕ		
<p>Инновационные технологии в решении комплексных задач управления и проектирования</p> <p><i>Цыркюв А. В., Цыркюв Г. А.</i> Система управления технологическими данными 3</p> <p><i>Чеботарёв В. Г., Грамов А. И.</i> От процессно-жесткого к сетевому рефлексивному управлению 10</p> <p><i>Козыцов А. П., Решетников Н. С.</i> Современные способы организации обмена данными с системами управления 17</p> <p><i>Решетников Н. С., Козыцов А. П.</i> Стандарты и технологии интеграции производственных информационных систем 24</p> <p><i>Слуцкий В. В.</i> Комплексная оценка качества интегрированной системы библиотечно-информационного обеспечения научной и образовательной деятельности 30</p>		
<p>Инновационные технологии в решении комплексных задач моделирования и проектирования</p> <p><i>Еликин Ю. М.</i> Структура САПР ГРИФ-4, база данных и техпроцессы проектирования 37</p> <p><i>Еликин Ю. М.</i> Синтаксис и семантика описания ячейки на базе печатных плат в САПР P-CAD 2000 45</p> <p><i>Ракумовский А. Н.</i> Система автоматизированного проектирования GPPlotter 56</p> <p><i>Герасимова В. В.</i> Автоматизированное проектирование процессов технического обслуживания 60</p> <p><i>Рыльникова А. Г.</i> Автоматизированная система поиска физических эффектов по запросу на естественном языке 65</p> <p><i>Храменко А. А.</i> Имитационное моделирование процесса управления многоэкономиктурными распределенными запасами 69</p> <p><i>Дубский Г. А., Егорова Л. Г., Кузнецов Ю. Б., Бондаренко Е. Г.</i> Программное обеспечение для математического моделирования теплофизических процессов в слоистых структурах 76</p> <p><i>Львов А. С., Полянский А. В.</i> Алгоритмы многопараметрического контроля металлургических процессов вычислителями разных конфигураций 80</p> <p><i>Волобий А. Г., Галактионов В. А., Еринов С. В., Потемин Н. С., Шатило Л. Э., Жданов Д. Д.</i> Анализ точности компьютерного моделирования обеспечения сложных сцен 83</p> <p><i>Новосельцева М. А., Карташов В. Я.</i> Структурно-параметрическая идентификация характеристик стохастических процессов на примере системы регулирования компрессорной станции 94</p> <p><i>Авдеев С. А., Итальский Н. И.</i> Структура дорожной сети при агентно-ориентированном моделировании дорожного движения 100</p> <p><i>Ульянов А. В.</i> Идентификация математических моделей динамических систем методом цифрового преобразования Лапласа 105</p>		
<p>Главный редактор Ю. Х. Вершинин, д-р техн. наук, профессор аспирантуры ОАО «ГСКБ "Алмаз-Антей"»</p> <p>Заместители главного редактора А. В. Иванов, академик Международной академии транспорта, директор ФГУП "ВНИИ"; В. П. Грядин, д-р техн. наук, проф., директор ЦИТИ РАН</p> <p>Ответственный секретарь Л. М. Романюкина, вед. инженер ФГУП "ВНИИ"</p> <p>Редакционный совет: В. Р. Ануфриев, канд. техн. наук, ОАО «ГСКБ "Алмаз-Антей"»; Ф. М. Аронов, канд. техн. наук, ОАО «ГСКБ "Алмаз-Антей"»; Е. П. Бронин, канд. техн. наук, ОАО «ГСКБ "Алмаз-Антей"»; В. С. Глазков, ФГУП "ВНИИ"; В. В. Галактион, д-р техн. наук, ОАО "НИИАА"; А. И. Грамов, канд. техн. наук, ООО "ОДВОИ-АСТ"; Ю. В. Давыдов, канд. техн. наук, ОАО "НИИ АСК"; Ю. Н. Кофанов, д-р техн. наук, проф., МНЭМ; Д. А. Лапачевский, канд. техн. наук, ОАО «ГСКБ "Алмаз-Антей"»; В. Д. Лысков, ФГУП "ВНИИ"; В. Б. Муравин, канд. техн. наук, Госбюроавиа; Е. В. Суринов, д-р техн. наук, НИИ САЭС-созвездный "Присадная летательная"; В. В. Ульянов, д-р техн. наук, проф., СЕАНВНИ; А. П. Палажак, ФГУП "ВНИИ";</p> <p>Журнал зарегистрирован в Роспатенте. Рег. № 018668. E-mail: office@vniim.ru http://infproc.vniim.ru/main_infproc</p> <p>Информационные технологии в проектировании и производстве Науч.-техн. журн./ФГУП "ВНИИ", 2010, № 2. С. 1 — 112.</p> <p>Редакторы: Л. Е. Андреев, Г. А. Павлова Корректор Н. С. Кузьмина Компьютерная верстка: Н. В. Сивилан, Н. А. Жданова</p> <p>Надано в печать 21.05.2010. Формат 60-84 1/8. Бумага офсетная. Уч. л. 12,0. Уч. изд. л. 14,5. Литая 1621. Тираж 500 экз. Отпечатано в ФГУП "ВНИИ". 125083, Москва. Надпись 7878. 17 листов.</p> <p>Журнал зарегистрирован в Роспатенте. Рег. № 018668. Статьи рецензированы.</p> <p>© Федеральное государственное университетное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации — федеральный информационно-аналитический центр оборонной промышленности" (ФГУП "ВНИИ"), 2010</p>		

проводить реальные эксперименты, не прибегая к использованию сложного математического аппарата. При этом появляется возможность варьирования входных данных и получения новых результатов.

Предложенная схема совместного использования блоков обработки заявок и блоков учета состояний пакета Matlab Simulink позволяет получить наглядные графические и табличные результаты, не прибегая к разработке специализированных и программных средств.

Литература

1. Левин А. И., Хроменко А. А. Управление распределенными многономенклатурными запасами: состояние про-

блемы и пути ее решения // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2008. № 4. С. 7–11.

2. Sherbrooke C. C. Optimal Inventory Modeling of Systems Multi-echelon techniques. Second edition. 2004. Kluwer Academic Publishers. Boston.

3. Muckstadt J. A. Model for a Multi-Item, Multi-Echelon, Multi-Indenture Inventory System. — Management Science 20. 1973.

4. Hillestad R. J., Carrillo M. J. Models and Techniques for Recoverable Item Stockage When Demand and the Repair Process are Nonstationary — Part I: Performance Measurement. RAND Corporation, N-1482-AP, Santa Monica, 1980. CA.

5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Издание 4-е. — М.: Наука, 1969. — 576 с.

6. Имитационное моделирование в среде Matlab Simulink. http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/simulink/sl_gs.pdf

SIMULATION MODELING OF MULTI-ITEM MULTI-ECHELON INVENTORY MANAGEMENT SYSTEMS

A. A. Khromenko

Joint Stock Company "Experimental Scientific Research Institute of Metal-Cutting Machine Tools, Moscow, Russia

Multi-echelon inventory management system for repairable items of complex technical objects simulation model is described. Simulation model can be used for stock level optimization by the minimum backorders criteria, which provide required availability factor and storage and downtime costs decreasing. Model was implemented in Matlab Simulink environment. Simulation modeling results agree well with published results of METRIC mathematical model used by US Air Forces.

Keywords: inventory, inventory management, backorders, simulation modeling, METRIC, Simulink.

Хроменко Алексей Александрович, аспирант.
E-mail: alexrk6@gmail.com



ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ

Г. А. Дубский, канд. техн. наук; Л. Г. Егорова, канд. техн. наук;
Ю. Б. Кухта, канд. техн. наук; Е. Г. Бондаренко
ГОУ ВПО "Магнитогорский государственный технический университет",
г. Магнитогорск, Россия

Представлено физико-математическое моделирование теплофизического процесса системы "расплав металла—покрытие—стенка кристаллизатора" в момент заливки стали. Для математического моделирования разработан программный продукт, позволяющий проследить характер установления температурного поля в покрытии при тепловом ударе в момент заливки стали; провести анализ температурного поля в покрытии и стенке кристаллизатора в зависимости от времени и определить максимальную величину температуры. Полученные результаты были использованы для выбора технологии напыления модифицирующих покрытий из никеля и плакированного никеля на рабочую стенку кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Ключевые слова: температурное поле, модифицирующее покрытие, стенка кристаллизатора, программный продукт, математическое моделирование.

При производстве кристаллизаторов для сортовых, блюмовых и слябовых МНЛЗ используется толстолистовая медь, из которой изготов-

ляют плиты необходимых размеров с последующей доработкой их рабочих поверхностей до требуемых технологических и технических ус-

ловий. Кристаллизаторы, собранные из таких листов, как правило, показывают низкую производительность из-за быстрого износа рабочих стенок, что сокращает время межремонтных периодов и увеличивает текущие расходы, повышая тем самым себестоимость единицы продукции.

Для увеличения срока работы кристаллизаторов в настоящее время все чаще прибегают к определенным технологическим модификациям их рабочих стенок. Экспериментально установлено, что наиболее перспективным методом модификации является газотермический метод напыления тугоплавких и тяжелых металлов и сплавов на рабочую медную стенку кристаллизатора. Одной из разновидностей этого метода является газодетонационный метод напыления. Достоинством этого метода является то, что при детонации рабочих газов напыляемые порошки приобретают очень высокие скорости (~800—1300 м/с), сгустки выстреливаемых порошков имеют хорошую локализацию в пространстве, могут использоваться порошки любого сорта и фракции.

При разработке технологии напыления покрытий необходимы точные знания о поведении теплофизических характеристик самого покрытия, модифицированной стенки и системы "покрытие—стенка кристаллизатора".

Как показывают экспериментальные исследования [1, 2], температуро-, теплопроводность и теплоемкость напыленных покрытий очень сильно зависят от температуры и характера ее применения в пространстве и времени.

Кристаллизатор МНЛЗ, с введенной в него затравкой и заполненный расплавом стали, представляет собой сложную термодинамическую систему, в которой развиваются в пространстве и времени сложные теплофизические процессы, приводящие к формированию "корки" слитка, термонапряжений в покрытии и медной стенке, на границе "покрытие—стенка". Прочность сцепления покрытия со стенкой кристаллизатора во многом зависит от характера поведения температурного поля в покрытии и на границе "покрытие—стенка кристаллизатора". Схема описываемой термодинамической системы приведена на рис. 1.



Рис. 1. Термодинамическая система "расплав металла—покрытие—стенка кристаллизатора"; Θ_0 ; Θ_1 , a_1 , λ_1 ; Θ_2 , a_2 , Θ_{02} ; λ_2 , l , L — см. ниже по тексту

Для описания этой термодинамической системы воспользуемся нестационарным уравнением теплопроводности, учитывающим сильную зависимость теплопроводности материалов покрытия и стенки от температуры и выбранными крайевыми условиями.

Для двухслойной задачи математическая модель может быть представлена в следующем виде:

$$c_i \rho_i \frac{\partial \Theta_i(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_i \Theta \frac{\partial^2 \Theta_i(x_i, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial \Theta} \left(\frac{\partial \Theta_i(x_i, \tau)}{\partial x} \right)^2 \quad (i = 1, 2); \quad (1)$$

$$\Theta_1(x, 0) = \Theta_{01}; \quad (2)$$

$$\Theta_2(x, 0) = \Theta_{02}; \quad (3)$$

$$\Theta_1(l, \tau) = \Theta_2(l, \tau); \quad (4)$$

$$q_1 = \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1(l, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2(l, \tau)}{\partial x} = q_2; \quad (5)$$

$$\lambda_1 = \lambda_{01} [1 - k_1 \Theta_1(x, \tau) + k_2 \Theta_2(x, \tau)]; \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{02} (1 - k_3 \Theta_2(x, \tau)), \quad (7)$$

где Θ_{01} — температура расплава;
 Θ_{02} — температура охлаждающей жидкости;

a_1 — температуропроводность покрытия;

a_2 — температуропроводность материала стенки кристаллизатора;

$\Theta_1(x, \tau)$ — переменная температура покрытия;

$\Theta_2(x, \tau)$ — переменная температура стенки кристаллизатора;

λ_{01} — теплопроводность покрытия при 0 °С;

λ_{02} — теплопроводность материала стенки кристаллизатора при 0 °С;

k_1, k_2, k_3 — коэффициенты пропорциональности, определяемые из эксперимента.

Толщина покрытия (l) много меньше толщины

стенки кристаллизатора (L), т. е. $\frac{l}{L-l} \ll 1$.

На начальном этапе решения данной задачи проведен оценочный характер поведения температурного поля в пространстве и времени для термодинамической системы, состоящей из ограниченного и полуограниченного тел: $\Theta_1(0 \leq x \leq l)$; $\Theta_2(l \leq x \leq L)$, у которых в заданном температурном интервале будем считать, что $\lambda_1 = \lambda_{cp1} = \lambda_{01}$ и $\lambda_2 = \lambda_{cp2} = \lambda_{02}$, т. е. постоянными величинами, тогда система уравнений (1)–(7) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial x^2} \end{cases}$$

$$\Theta_1(x, 0) = \Theta_2(x, 0) = 20 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\Theta_1(l, \tau) = \Theta_2(l, \tau),$$

$$\lambda_{01} \frac{\partial \Theta_1(l, \tau)}{\partial x} = \lambda_{02} \frac{\partial \Theta_2(l, \tau)}{\partial x},$$

$$\Theta_1(0, \tau) = \Theta_{01} = 1530 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\Theta_2(L, \tau) = \Theta_{02} = 80 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$a_1 = \frac{\lambda_{01}}{c_1 \rho_1}, \quad a_2 = \frac{\lambda_{02}}{c_2 \rho_2}.$$

Толщина покрытия составляет $l = 150$ мкм. Численное решение дифференциальных уравнений с заданными краевыми условиями, соответствующими тепловому удару в момент заливки стали, выполнялось с использованием неявной разностной схемы. Для математического моделирования изменения теплофизических процессов в системе "покрытие—стенка кристаллизатора" при различных начальных исходных данных был разработан программный продукт, который позволяет выполнить:

- ввод и изменение исходных данных для коррекции модели;
- математический расчет результатов моделирования;
- графическое отображение результатов математического моделирования.

Для реализации программного продукта был выбран язык программирования C++ и интегрированная среда программирования Borland C++ Builder 6.0.

В программном продукте можно выделить три основных модуля: подготовка исходных данных (рис. 2), реализация математической модели теплового состояния покрытия, графическая визуализация данных.

Результатом работы модуля реализации математической модели является таблица со значениями температуры покрытия, рассчитанная с учетом толщины покрытия и количества интервалов разбиения.

Модуль графической визуализации данных предназначен для отображения результатов реализации математической модели. По результатам математического моделирования получены следующие зависимости:

- зависимость температуры покрытия по толщине и времени (рис. 3);
- поверхность температур в координатах (l, Θ, τ) для точек по толщине покрытия;
- поверхность линий уровня для температурного поля во времени и пространстве;
- зависимость температуры покрытия в каждой точке по времени;
- зависимость температуры границы покрытия с металлом и стенкой кристаллизатора.

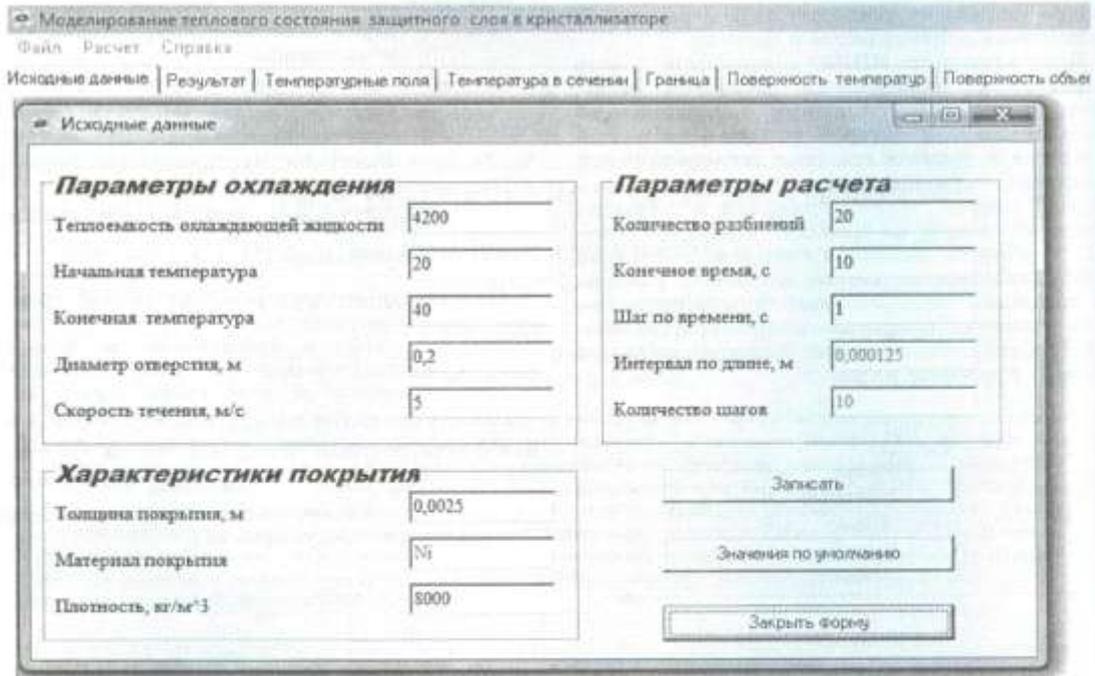


Рис. 2. Модуль ввода данных

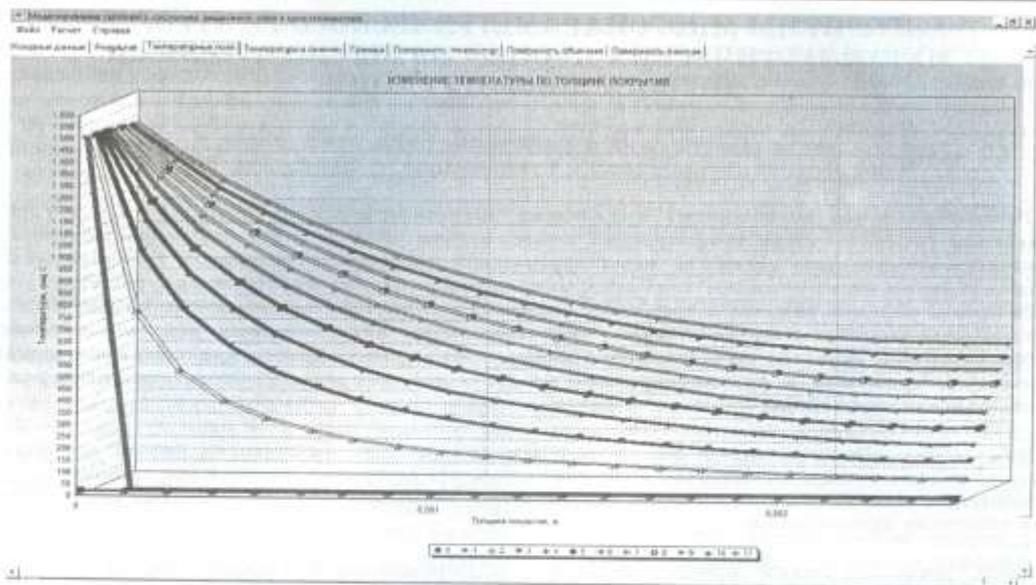


Рис. 3. Зависимость температуры покрытия по толщине и времени

Заключение

Использование представленного программного продукта позволило проследить характер установления температурного поля в покрытии при тепловом ударе в момент заливки стали; проанализировать температурное поле в покрытии и стенке кристаллизатора в зависимости от времени и определить максимальную величину температуры. Полученные результаты были использованы для выбора технологии напыления модифицирующих покрытий из никеля и плакированного никеля на рабочую стенку кристаллизатора, способных противостоять возможному их отслаиванию за счет возникающих касательных тепловых напряжений при тепловом ударе.

Работа выполняется при финансировании федеральной программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России".

Литература

1. Вдовин К. Н., Дубский Г. А., Нефедьев А. А. Теплофизические свойства детонационно напыленного никеля на медные пластины кристаллизаторов МНЛЗ // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2008. № 2. С. 57–60.
2. Дубский Г. А., Бутаков С. А., Нефедьев А. А. Теплофизические свойства детонационно напыленной меди при заданных технологических условиях // Сб. докл. 66 НТК МГТУ. — Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2008. С. 118–121.

THE SOFTWARE FOR MATHEMATICAL SIMULATION OF ENGINEERING PROCESSES IN LAMINATED STRUCTURE

G. A. Dubskiy, L. G. Egorova, G. B. Kukhta, E. G. Bondarenko
Magnitogorsk State University named by G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

Physical and mathematical simulation of thermal process of system "metal melt—a coating—a crystallizer pan wall" at the moment of steel priming is presented in this article. For mathematical simulation the software product is developed. The using of it allows to trace character of determination of temperature pattern in a coating at a heat shock at the moment of steel priming, to analyze temperature pattern from time in a coating and a wall of a crystallizer pan and to specify the max rate of temperature. The obtained effects have been used for technology option of a spraying of inoculating coatings from a neakel and a metal-clad neakel on a working wall of crystallizer pan installation for continuous casting.

Keywords: the temperature pattern, an inoculating coating, a crystallizer pan wall, software product, mathematical simulation.

Дубский Геннадий Алексеевич, доцент кафедры физики. Тел. 8-3519-29-84-70.
Егорова Людмила Геннадьевна, доцент кафедры вычислительной техники и прикладной математики. Тел. 8-3519-29-85-63. E-mail: egorov-lyudmil@yandex.ru
Кухта Юлия Борисовна, старший преподаватель кафедры вычислительной техники и прикладной математики. Тел. 8-3519-29-85-63.
Бондаренко Елена Геннадьевна, бакалавр. Тел. 8-3519-29-85-63.

3.2.4 Копия статьи «Управление объемными электромагнитными силами в ванне дуговой печи постоянного тока»

	
Ежемесячный научно-технический и производственный журнал № 7 2010	
<h1>АВТОМАТИЗАЦИЯ</h1> <h2>В ПРОМЫШЛЕННОСТИ</h2>	
Учредители: Университет новых информационных технологий управления при Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской Академии наук, ООО Издательский дом "ИнфоАвтоматизация"	
Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций Свидетельство о регистрации ПИ № 77-13085 Входит в список научных журналов ВАК Министерства образования РФ.	
Подписные индексы: каталог "Роспечать" – 81874 Объединенный каталог "Пресса России" – 39206	
Главный редактор АРИСТОВА Н.И.	
Редакционная коллегия: Аблин И.Е., Алексеев М.А., Аристова Н.И., Власов С.А., Григорьев П.И., Дерягина Е.В., Дозорцев В.М., Егоров Е.В., Жиров М.В., Захаров Н.А., Зинков М.О., Исаев Э.Л., Катанов Г.Н., Крошкин А.Н., Маринина Г.М., Мухомов Д.В., Павлов Б.В., Перидеский М.И., Сивяко О.В., Троицкая И.И., Уваров А.В., Хоразов В.Г., Цухерман Ю.Д., Чадур В.М., Яковен П.М.	
Художественный редактор Каменистая Е.А.	
Материалы, опубликованные в настоящем журнале, не могут быть полностью или частично воспроизведены без письменного разрешения редакции. Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов материалов. За достоверность сведений, представленных в журнале, ответственность несут авторы статей и рекламодатели.	
Адрес редакции: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, ИТУ РАН, офис 360. Телефоны: (926) 212-60-97, (495) 334-91-30. Факсы: 334-91-30, 334-87-59. E-mail: avtprom@pi.ru info@avtprom.ru http://www.avtprom.ru ISSN 1819-5962	
Подписано в печать 07.07.10 Формат 60x88 1/8. Бумага кк-журн. Печать офсетная Заказ 7/07 Оценочно в типографии "Юнион Пресс"	
СОДЕРЖАНИЕ	
Обсуждаем тему... <i>Имитационное моделирование для промышленной автоматизации</i>	
Введение	3
<i>Дискретно-событийное моделирование в системах массового обслуживания</i>	
<i>Раскин Е.М., Денисова Л.А., Ситицын В.П., Нестеров Ю.В.</i> Математическая модель системы питания парогенератора энергоблока АЭС	3
<i>Власов С.А., Деятков В.В., Усанов Д.И.</i> Использование имитационных моделей для оценки производственной мощности при управлении металлургическим производством	8
<i>Нижеступные системы управления ТП</i>	
<i>Сурниченко А.А.</i> Повышение надежности работы кирпичноделательного комплекса СМК-350 с помощью модернизации АСУТП	13
<i>Грызов В.К., Корольков В.Г.</i> Модель преобразователя сигналов для проектирования гибридных систем управления в среде VISSIM	17
<i>Ячиков И.М., Логунова О.С.</i> Управление объемными электромагнитными силами в ванне дуговой печи постоянного тока	20
<i>Макуйлова Е.В., Федоров В.И., Лисицын Н.В.</i> Оптимизация процесса получения фракции суммарных ксилолов	24
<i>Ведерников В.А., Лысова О.А., Лапатын Р.Р.</i> Исследование влияния продолжительности действия управляющего воздействия на величину динамического момента электродвигателя при расклинивании погружного насоса	27
<i>Чистякова Т.Б., Шлыко Ю.И., Новожилова И.В.</i> Система имитационного моделирования тренажерного комплекса для управления гибкими сорбционно-каталитическими производствами	31
<i>Чистякова Т.Б., Полосин А.Н.</i> Система имитационного моделирования для управления экструдерами в гибких производствах полимерных материалов	35
<i>Системы поддержки принятия решений</i>	
<i>Пискажова Т.В.</i> Программа – имитатор для поддержки принятия технологических решений при получении алюминия	41
<i>Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю.</i> Система имитационного моделирования динамики состояний сложных технических систем на основе агентного подхода	45
<i>Настройка и проверка систем нечеткого управления</i>	
<i>Немцев Б.С., Кирик В.В.</i> Виртуальный датчик концентраций вредных веществ в выбросах вредных веществ котельной установки	50
<i>Вялых И.А., Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н.</i> Нечеткое управление реакторным блоком установки каталитического крекинга	53
<i>Благодарный Н.С., Кривов М.В., Колмогоров А.Г., Кобзев В.Ю.</i> Критерий адекватности тренажерной модели	59
Применение средств автоматизации	
<i>Абросимов М.Б., Гильман Е.А., Кривонос А.А., Ерхов А.В.</i> О разработке и внедрении тренажера для установки дегидрирования изобутана	66

Discussing a Subject... Simulation for industrial automation

Introduction

Raskin E.M., Denisov L.A., Sibitsin V.P., Nesterov Yu.V. A mathematical model for feedwater system of a steam generator at a power unit of an A-plant. The paper presents a mathematical model for feedwater system of a steam generator at a power unit of an A-plant with variable transfer function coefficients. The model is implemented in MATLAB/Simulink/Stateflow event-driven simulation environment. **Keywords:** steam generator's feedwater system model, event-driven simulation, transfer functions with variable coefficients, regulatory control system.

Vlasov S.A., Deryatkov V.Y., Usanov D.I. Application of simulation models for productive capacity evaluating in metallurgical production control. With a case study from metallurgical industry, the paper shows the expediency of applying simulation technique for ensuring the required production performance. Simulation models used for this purpose describe temporal and economic relationships in a process system subject to probability distribution of work execution time. **Keywords:** simulation technique, production facilities, metallurgy, queuing systems, performance indices.

Surichenko A.A. Improving the reliability of SMK-350 brick-making complex through process controls modernization.

The paper offers an approach to improving the reliability of brick-making process through controls improvement. The proposed system is based on SIMATIC PCS7 platform which automates performance and quality data acquisition and analysis and includes a set of new mathematical models comprising reliability dynamics prediction, optimal service, backup components quantity, and the evaluation of maintenance and revamping cost effectiveness. **Keywords:** process control system, reliability, brick-making complex, failure rate, reliability model, optimal service, cost effectiveness, long-term observation.

Grzybov V.K., Korotkov V.G. Signal converter model for hybrid control system design in VisSim environment.

A novel method for converting discrete impulse signals into continuous in VisSim environment is offered. A step-by-step description of the method is presented. Operation principle, algorithm, and converter diagram are included. The opportunity of converter application in control systems is shown. **Keywords:** automatic control systems, digital controller, interpolator, delta-function, quantization step, discrete impulse signal.

Vachilov I.M., Legusova O.S. Controlling volumetric electromagnetic forces in the bath of a DC arc furnace

A new control strategy for the currents passing through the 2 bottom electrodes of a DC arc furnace is offered. The new strategy enables better electric vortex flow rejection at the furnace bottom at constant arc power. The paper shows the opportunity of controlling the melt intensity and flow direction in the bath of a DC arc furnace by adjusting phase displacement between the pulsating currents. **Keywords:** plasma furnaces, volumetric electromagnetic forces, pulsing intensity, currents control strategy, electric vortex melt flows.

Mamulova E.V., Fedorov V.I., Lisitsyn N.V. Optimization of total xylenes recovery

The paper discusses total xylenes recovery process and proposes the ways to improve its efficiency. A soft sensor was developed for predicting the product quality and advising on the optimal values of process control variables. The results were tested at an operating plant where the validity of the inferential model developed was proved. **Keywords:** total xylenes, soft sensor, optimal process control.

Valerichuk V.A., Iyasa O.A., Lopatin R.I.C. Investigating the influence of the control action duration on the submersible electrical motor's torque in pump wedging

The paper investigates the influence of the duration of control impact change time at the input of the frequency converter control system on submersible electrical motor's torque during the wedging of impellers of a centrifugal pump. A preventive pump wedging algorithm is offered. **Keywords:** centrifugal pump, control, submersible electrical motor, pinching.

Chistyakova T.L., Shlyagin Yu.L., Novobikhova I.V. Simulation model of an operator training system for flexible sorbent and catalyst factories

A model structure for simulating complex physicochemical processes of sorption-catalytic manufacturing is offered. The model allows to investigate these processes and to train the skills of safe and effective operation of sorbent and catalyst factories whose products are utilized in life sustenance and environmental systems. **Keywords:** training simulator design, mathematical modeling and simulation, numerical techniques, software suites, flexible multi-product chemical processes, sorbents, catalysts.

Chistyakova T.L., Palatin A.N. A simulation system for controlling extruders in flexible fabrication of polymer materials

A problem-oriented simulation system is presented. Its kernel is a library of dynamic models of standard sections of various type extruder screws used in flexible polymer material fabrication. The system allows to synthesize the models emulating hydrodynamic processes in various extruders; these models are intended for calculating residence time and the quality indices of extrudate, investigating extrusion process in various operation modes, and controlling the quality of polymers used in food and pharmaceutical industries. **Keywords:** simulation, typical hydrodynamic models, residence time, numerical techniques, software suites, extrusion, polymer materials.

Pokazhova T.V. Simulation software for process decision-making support in aluminum production

Mathematical model-based software is developed which makes it possible to calculate and display the changes of process variables under various disturbances through a special interface. The software is intended for selecting the best control decisions and strategies. **Keywords:** process model, virtual electrolytic cell.

Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I., Yarin A.Yu. Simulation of complex engineering system dynamics based on agent approach

A simulation system for the dynamics of complex engineering systems comprising unique mechanical components is discussed. Agent model and state classes representing the stages of state change process from original flow to failure are presented. System dynamics simulation is based on a logic-mathematical model combining expert knowledge and analytical models for implementing the behavior of agents. Simulation results underlie the decision-making support for ensuring the safety at all stages of industrial plant's lifecycle. **Keywords:** automation of safety investigation, complex engineering system, unique mechanical system, agent-based modeling, production, procedure.

Vyalikh I.A., Shumikhin A.G., Kostezhikov S.N. Fuzzy control of catalytic cracker reactor section

Process control strategy at a cat cracker unit of LUKOIL - Perm Refinery is examined. A mathematical model of the reactor section is selected, and its parameters are identified. A method for creating the membership function and the rule base of process operator's actions in various situations is offered. The results of simulation-based evaluation of the fuzzy control algorithm's efficiency are presented which prove the expediency of applying this control strategy. **Keywords:** catalytic cracking unit, process, mathematical modeling, fuzzy logic, fuzzy control.

Blagodarov N.S., Krivos M.V., Kaluzhnikov A.G., Kobuzev V.Yu. Fidelity criterion for simulation model

An approach to the problem of process model validation is offered. The solution is based on the correctness of how the training simulation model represents real-life process situations described by experts. A model validation criterion is offered and the validation procedure is described. An example is included. **Keywords:** operator training simulator, simulation model, validity, fuzzy logic, situational model.

Abramov M.B., Ghitman E.A., Krivosanov A.A., Yekhtov A.V. On the development and implementation of an operator training simulator for isobutene dehydrogenation unit

In 2010, INTUS JSC has commissioned an operator training simulator for IF-2-3-4 isobutene dehydrogenation and isobutene/isobutylene recovery unit of Sibor - Uralvyspeyaz JSC (Chaikovsky, Russia). The paper describes the structure and featured properties of the training system. **Keywords:** operator training system, DCS, hazardous plant, simulation, virtual space of a process unit.

Список основных сокращений, используемых в журнале "Автоматизация в промышленности"

АРМ – автоматизированное рабочее место	МРВ – монитор реального времени
АСУЭЗ – автоматизированная система контроля и учета энергоресурсов	ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
АСУ – автоматизированная система управления	ОС – операционная система
АСУП – АСУ производство	ПАЗ – противопожарная защита
АСУПП – АСУ технологическими процессами	ПЗУ – постоянное запоминающее устройство
БД – база данных	ПИ регулятор – пропорционально-интегральный регулятор
ДП – диспетчерский пункт	ПИД регулятор – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор
ИВК – информационно-вычислительный комплекс	ПК – персональный компьютер
ИВС – информационно-вычислительная система	ПЛК – программируемый логический контроллер
ИМ – исполнительный механизм	ПО – программное обеспечение
ИУ – исполнительное устройство	ПТК – программно-технический комплекс
КУ – контрольный пункт	ПЭВМ – персональная ЭВМ
КЭС – комплекс технических средств	РВ – реальное время
ЛВС – локальная вычислительная сеть	РМВ – реальный масштаб времени

РСУ – распределенная система управления
САПР – система автоматизированного проектирования
СУБД – система управления БД
ТЗ – техническое задание
ТИ – телеизмерение
ТМ – телемеханика
ТП – технологический процесс
ТЭК – технико-экономический комплекс
ТЭП – технико-экономический показатель
УПД – устройство передачи данных
УСО – устройство связи с объектом
УСПД – устройство сбора и передачи данных
ЦАП – центральный ЦП
ЧМИ – человеко-машинный интерфейс
ЭС – экспертная система

УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕМНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ СИЛАМИ В ВАННЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА¹

И.М. Ячиков, О.С. Логунова (ГОУ ВПО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова")

Предложена новая схема управления токами, протекающими через два подовых электрода дуговой печи постоянного тока, позволяющая усилить подавление электровихревых течений в районе подины при постоянной мощности дуги. Показана потенциальная возможность управления интенсивностью и направлением течения расплава в ванне дуговой печи постоянного тока за счет изменения сдвига фаз между пульсирующими токами.

Ключевые слова: плазменные печи, объемные электромагнитные силы, интенсивность перемешивания расплава, схема управления токами, электровихревые течения расплава.

Перемешивание расплава в дуговой печи постоянного тока (ДППТ) применяют для выравнивания химического состава и температуры по объему ванны с целью облегчения скачивания шлака, для транспортировки шлакообразующих и легирующих добавок, для улучшения переработки шихты на откосах печи. При перемешивании улучшаются условия теплообмена в

печи, в результате чего уменьшается перепад температуры металла по глубине ванны, а это является одним из важных условий для осуществления автоматического регулирования температурного режима плавки.

Современные ДППТ являются довольно сложными устройствами с точки зрения управления. Наиболее интенсивное перемешивание металла требуется в период плавления шихты и рафинирования расплава. При этом на границе металл-шлак, в области пятна дуги скорость расплава должна быть максимальной, а в области подовых электродов и футеровки – минимальной. В качестве показателей эффективности управления ТП выплавки металлов в дуговых печах можно указать однородность химического состава расплава и отсутствие очагов его перегрева и охлаждения.

Одной из российских разработок является способ перемешивания расплава в ванне ДППТ путем установки одного осевого графитированного катода, а в подине – не менее двух подовых анодов, смещенных от ее оси симметрии [1]. Электропитание ДППТ осуществляется через два независимых источника постоянного тока, плюсовые провода которых подводятся к подовым электродам, а минусовые подключены к расходоному графитированному электроду. Это приводит к сложному движению расплава в вертикальной и в горизонтальной плоскостях. Циркуляция расплава в ДППТ с несимметрично расположенными подовыми электродами осуществляется за счет возникновения электровихревых течений (ЭВТ), вызываемых объемными электромагнитными силами (ОЭМС), которые существенно зависят от силы токов, так как обусловлены взаимодействием электрических токов, подводимых к расплаву от сторонних источников ЭДС, с собственными магнитными полями [2].

На основе математических моделей, предложенных в работах [3-5], проведен анализ составляющих ОЭМС в области подового электрода. Имитационное моделирование ОЭМС при одном подовом электроде (рис. 1, а) показало, что в горизонтальной плоскости над его поверхностью образуются два противоположно вращающихся вихря (рис. 1, б), кроме того, в меридиональной плоскости вблизи подового электрода малого диаметра возникают интенсивные вихри (рис. 1, в – д).

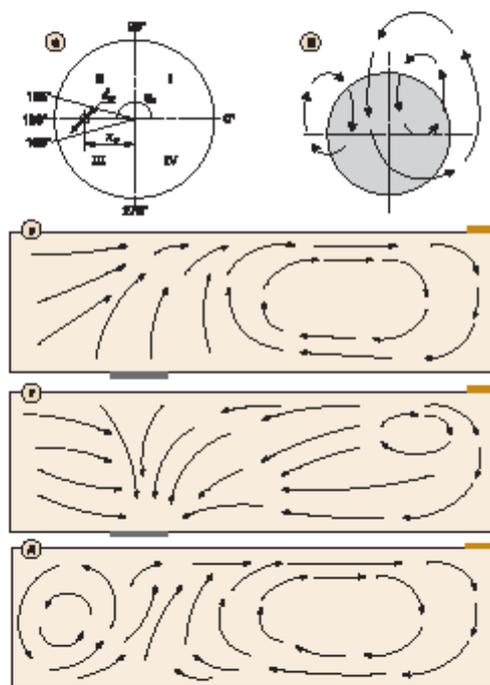


Рис. 1. Характер течения расплава в вертикальных плоскостях при одном подовом электроде, ось которого не совпадает с осью ванны:

а) схема секций вертикальных плоскостей; б) характер течения над поверхностью подового электрода в горизонтальной плоскости; в) $\varphi = 165^\circ$; г) $\varphi = 180^\circ$ (координата оси подового электрода); д) $\varphi = 195^\circ$

¹ Работа выполняется в рамках Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" по государственному контракту № П2402

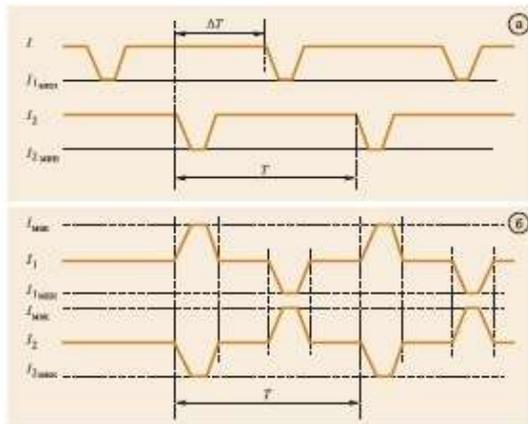


Рис. 2. Характер изменения токов через два подовых электрода: а – существующий режим управления; б – предлагаемый режим управления ($I_{1\max} = I_{2\max}$; $T = 2\Delta T$)

Таким образом, в дуговой печи постоянного тока ЭВТ являются основным фактором, приводящим к "вымыванию" подового электрода и футеровки вокруг него. Они становятся причиной разрушения подины и приводят к частым ремонтам печи.

При наличии в печи только одного анода повлиять на электровихревые течения без отключения тока дуги не предоставляется возможным, однако при двух анодах появляется возможность "сброса" или "размытия" вихрей в районе подины посредством изменения токов, протекающих через подовые электроды.

Целью работы является выявление и обоснование основных принципов управления объемными электромагнитными силами в ванне ДППТ за счет изменения токов, проходящих через два подовых электрода.

В настоящее время на промышленных печах управление токами, протекающими через подовые электроды, реализуется с помощью тиристорных источников, регулируемых микроконтроллером. Для "размытия" вихрей в районе подовых электродов на большинстве ДППТ используется периодическое уменьшение тока через каждую ветку до некоторого минимального значения I_{\min} с периодом $T \approx 100$ с (рис. 2, а).

В работе [4] установлено, что при размещении подового электрода со смещением относительно оси ванны наблюдается осевая симметрия электрических и магнитных полей относительно оси, проходящей через центры подового электрода и пятна дуги (ось тока). Осевая проекция плотности тока $J_z(r)$ и азимутальная напряженность магнитного поля $H_\phi(r)$ в цилиндрической системе координат, связанной с осью тока (Oz) определяются по регрессионным зависимостям:

$$J_z(r) = i_1 (a|r|^5 + br^2 + c|r| + d),$$

$$H_\phi(r) = 10i_1 \operatorname{sgn}(r) \left(\frac{a}{5} r^4 + \frac{b}{4} |r|^3 + \frac{c}{3} r^2 + \frac{d}{2} |r| \right),$$

где a, b, c, d – функции, зависящие от z .

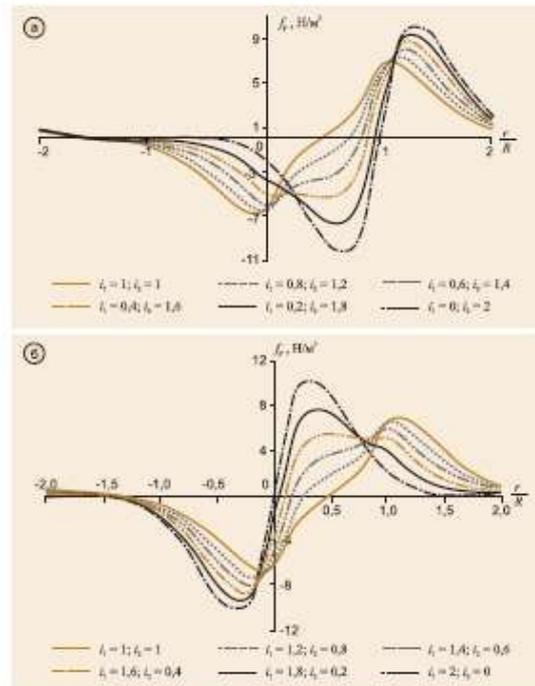


Рис. 3. Зависимость ОЭМС от безразмерного расстояния между электродами при разном соотношении токов ($i_1 + i_2 = 2 \text{ кА} = \text{const}$): а – при уменьшении i_1 ; б – при уменьшении i_2 ($R = 300 \text{ мм}$)

При двух подовых электродах введем две оси тока, которые пересекаются в центре пятна дуги. Результирующие магнитные и электрические поля определяли по принципу суперпозиции, а ОЭМС как

$$\vec{j} = \frac{\mu_0}{\sigma} \vec{J} \times \vec{H},$$

где μ_0 магнитная постоянная, σ – проводимость расплава.

На рис. 3 приведена зависимость ОЭМС в секторе между осями тока от соотношения токов при условии, что их сумма остается постоянной ($i_1 + i_2 = \text{const}$). Расчеты проводились для трехтонной сталеплавильной печи, коэффициенты аппроксимации плотности тока при расстоянии между электродами $R = 300$ мм при $z = 200$ мм выбирались равными $a = -5,68 \cdot 10^{-9}$; $b = 9,98 \cdot 10^{-6}$; $c = -0,00568$; $d = 1,05$.

На рис. 3, а показан случай, когда ток i_1 уменьшается от 1 кА до 0 при этом i_2 увеличивается соответственно в диапазоне 1...2 кА, а на рис. 3, б наоборот i_2 уменьшается при увеличении i_1 . При этом видно, что между токовыми осями (при $r/R = 0-1$) при изменении соотношения токов i_1/i_2 ОЭМС меняют знак.

Таким образом, меняя соотношение токов, проходящих через подовые электроды можно управлять интенсивностью и направлением ОЭМС, а значит и ЭВТ расплава.

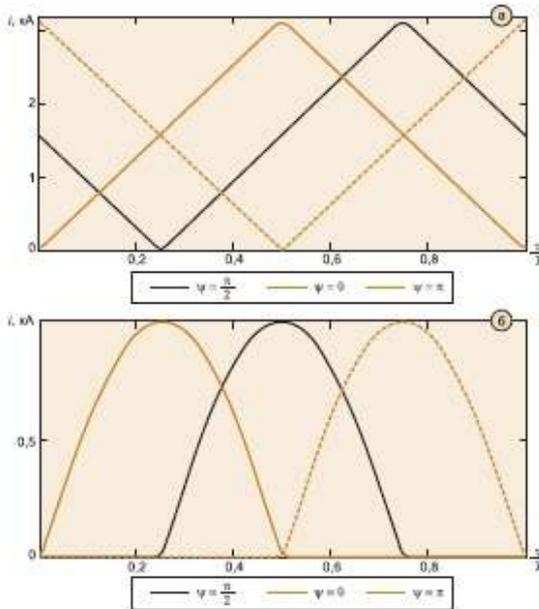


Рис. 4. Зависимость токов от времени при разной начальной фазе ψ : а) для функции (4); б) для функции (5)

На основе компьютерных исследований ОЭМС было установлено, что можно существенно усилить подавление вихрей в районе подового электрода, меняя токи по схеме, показанной на рис. 2, б. Дополнительным преимуществом данного управления является то, что сумма токов, проходящих через подовые электроды, а значит и тепловая мощность дуги остается постоянной.

Для подавления вихрей в районе подового электрода предлагается использование токов, меняющихся по заданному периодическому закону со сдвигом фаз ψ . При прохождении через ванну пульсирующих токов $i_2 = f(\tau)$, $i_1 = f(\tau - \psi)$ ($i_1 i_2 > 0$), подчиняющихся периодическому закону $f(\tau)$ со сдвигом фаз ψ и периодом T , в каждой ее точке будет наблюдаться периодическое изменение электрического и магнитного поля. Посредством компьютерного моделирования было установлено, что если $i_2 = 0$, то напряженности электрического и магнитных полей меняются во времени пропорционально току i_1 , причем это изменение происходит одновременно (синфазно) во всех точках жидкого расплава [3 – 5]. Значение отдельных проекций электрического и магнитного поля в каждой точке ванны: $E_n \sim i_1$, $H_n \sim i_1$.

Выполним оценку мгновенного значения электромагнитной силы в данной точке ванны в зависимости от времени. Считая по принципу суперпозиции, что при изменении обоих токов результирующая напряженность электрического и магнитного полей:

$$E_n = k_1 f(\tau) + k_2 f(\tau - \psi),$$

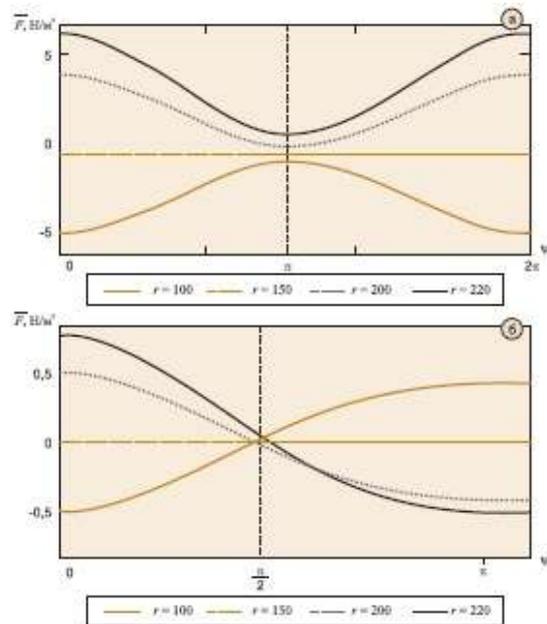


Рис. 5. Поведение средней радиальной ОЭМС от сдвига фаз в разных точках между подовыми электродами при пульсирующих токах: а) по функции (4); б) по функции (5) ($R=300$ мм)

$$H_n = k_3 f(\tau) + k_4 f(\tau - \psi),$$

получим характер зависимости проекции ОЭМС:

$$f_n(\dot{I}) = c_0 f^2(\tau) + b_0 f^2(\tau - \psi) + a_0 f(\tau) f(\tau - \psi), \quad (1)$$

где $k_1, k_2, k_3, k_4, a_0, b_0, c_0$ – функции, зависящие от рассматриваемой проекции и координаты точки.

Используя эту оценку мгновенного значения объемной электромагнитной силы в зависимости от протекающих токов через подовые электроды, для произвольной точки ванны определяем проекцию среднеинтегральной ОЭМС как

$$\bar{f}(\psi) = \frac{c}{T} \int_0^T i^2(\tau) d\tau + \frac{b}{T} \int_0^T i^2(\tau - \psi) d\tau + \frac{a}{T} \int_0^T i(\tau) i(\tau - \psi) d\tau, \quad (2)$$

где a, b, c – функции, зависящие от рассматриваемой проекции и координаты точки.

Первое и второе слагаемые этого выражения – величины постоянные, поэтому зависимость $f(\psi)$ обуславливается только третьим членом. Таким образом, в зависимости среднеинтегральной ОЭМС от сдвига фаз между токами основную роль играет функция

$$\bar{F}(\psi) = \int_0^{2\pi} i(\tau - \psi) i(\tau) d\tau. \quad (3)$$

В качестве примера рассмотрим T -периодическую функцию изменения токов

$$i(\tau, \psi) = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\left((2n-2)\left(\frac{2\pi\tau}{T} - \psi\right)\right)}{(2n-1)^2}, \quad (4)$$

ее график показан на рис. 4, а, причем среднее и действующее значение тока $i = 1,57$ кА и $I_d = 1,81$ кА соответственно.

На рис. 5, а приведена зависимость среднеинтегрального значения радиальной проекции ОЭМС в зависимости от сдвига фаз. Видно, что на половинном расстоянии между осями тока ($r = R/2 = 150$ мм) сила равна нулю. При изменении сдвига фаз сила изменяется в 2...3 раза, а ее направление в данной точке ванны остается одним и тем же. Минимум среднеинтегральной силы наблюдается при $\psi = \pi$. Неизменность направления силы f_r в данной точке между подовыми электродами можно объяснить тем, что токи пульсирующие, а не знакопеременные.

Однако существуют и такие функции изменения тока (не знакопеременные), при использовании которых $F(\psi)$ меняет знак, например

$$i(\tau, \psi) = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin(\omega\tau - \psi) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\left((2n)\left(\frac{2\pi\tau}{T} - \psi\right)\right)}{(2n-1)(2n+1)}. \quad (5)$$

График функции (5) приведен на рис. 4, б, причем среднее и действующее значение тока $i = 0,25$ кА и $I_d = 0,5$ кА, соответственно. Особенностью этой функции является то, что часть периода она имеет нулевое значение. На рис. 5, б для функции изменения токов (5) приведена зависимость среднеинтегрального значения радиальной проекции ОЭМС в зависимости от сдвига фаз. Видно, что в данной точке между подовыми электродами направления силы f_r меняется на противоположное. Использование на практике аналогичных функций и наложение на них дополнительного условия $i_1 + i_2 = \text{const}$ позволяет управлять не только интенсивностью течения расплава,

но и его направлением при неизменной полезной электрической мощности печи.

Таким образом, обоснована теоретическая возможность управления течением расплава в ванне ДППТ с двумя подовыми электродами. Установлен качественный характер зависимости объемной электромагнитной силы в произвольной точке ванны ДППТ от значения токов, протекающих через подовые электроды. Показана возможность управления интенсивностью и направлением течения расплава между подовыми электродами, а значит, и во всей ванне ДППТ за счет изменения соотношения постоянных токов и сдвига фаз между пульсирующими токами, проходящими через подовые электроды. Даны рекомендации к выбору пульсирующих токов.

Представленные в работе рекомендации целесообразно использовать в плазменных и дуговых печах постоянного тока с двумя подовыми электродами для перемешивания ванны расплава (без использования внешних индукторов). Это, прежде всего, печи по выплавке стали, искусственного чугуна и металлов группы железа на следующих предприятиях: ОАО "Курганмашзавод" (г. Курган), ОАО "Ижсталь" (г. Ижевск), ОАО "Тяжпрессмаш" (г. Рязань), ОАО "Южуралникель" (г. Орск), ОАО "Мечел" (г. Челябинск).

Список литературы

1. Афонякин А.В., Андреев И.Д., Власов Н.С. и др. Результаты первого этапа освоения дугового плавильного агрегата постоянного тока нового поколения на ОАО "Курганмашзавод" // *Электротехнология*. 2002. № 4.
2. Бояршич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И., Шербинин Э.В. *Электровихревые течения*. Рига: Зинатне, 1985.
3. Ячиков И.М., Портнова И.В. *Электромагнитные процессы в ванне ДППТ при произвольном расположении подового электрода* // *Электротехнология*. 2006. № 11.
4. Ячиков И.М., Карандаева О.И., Ларина Т.П. *Моделирование электровихревых течений в ванне дуговой печи постоянного тока*. Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ". 2008.
5. Ячиков И.М., Манагаров В.Н. *Моделирование объемных электромагнитных сил в ванне расплава ДППТ* // *Вестник Самарского государственного университета*. 2008. № 6 (65).

Ячиков Игорь Михайлович – канд. техн. наук, проф.,

Логунова Оксана Сергеевна – д-р техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова".

Контактный телефон (3519) 29-85-63. E-mail: Jachikov@mail.ru / logunova66@mail.ru

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Областью применения полученных результатов является автоматизированные информационные системы на агрегатах металлургического комплекса. Кроме этого, полученные новые алгоритмы и знания о технологических процессах могут быть использованы при проведении дальнейших исследований и совершенствования процессов в металлургии.

К основным результатам научно-исследовательской работы относится следующее:

1. Проведен аналитический обзор существующих алгоритмов сбора и оценки информации с агрегатов металлургического цикла и способов обработки информации при ее зашумленности и влиянии реальной колеблемости показателей.
2. Получены алгоритмы выработки корректирующих воздействий на процесс производства чугуна.
3. Разработаны алгоритмы и компьютерные программы поведения электровихревых течений и тепломассообмена в ваннах дуговых печей постоянного и переменного токов. Эти результаты могут быть использованы в качестве управляющего комплекса в автоматизированной системе электровихревого перемешивания расплава в ванне.
4. Получены инструменты в виде программных продуктов для проектировщиков, дающие возможность прогнозировать поведение электровихревых течений и тепломассообменных процессов в ванне расплава при использовании того или иного конструктивного или технического решения и выбрать из набора возможных вариантов оптимальный.
5. Разработаны алгоритмы для подсистем сбора, регистрации, обработки и хранения данных для прогнозирования теплового состояния и качества непрерывнолитой слябовой заготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дембовский В.В. Компьютерные технологии в металлургии и литейном производстве / учебное пособие. Л.: СЗПИ, 2003. – 145 с.
2. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спиринов, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов, В.А. Краснобаев, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, В.С. Швыдкий, С.А. Загайнов, О.П. Онорин. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 617 с.
3. Компьютерные методы моделирования доменного процесса/ Под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с.
4. Тихонов О.Н. Решение задач по автоматизации процессов обогащения в металлургии. Л.: Недра, 1968. – 430 с.
5. Хьюбер Дж.П. Робастность в статистике. М: Мир, 1984, 304с.
6. Кашьян Р.Л., Рао А.Р. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. - М: Наука, 1983, 384с.
7. Тихонов А.Н. и др. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. - М: Наука, 1983, 200с.
8. Несенюк А.П. Неопределенные величины в задачах управления с неполной информацией. - Автоматика, N 2, 1979, с.55-64.
9. Дюбуа Д., Прад А. К анализу и синтезу нечетких отображений. В сб.: Нечеткие множества и теория возможностей. - М: Радио и связь, 1986, с.229-240.
- 10.Кандель А., Байатт У.Дж. Нечеткие множества, нечеткая алгебра, нечеткая статистика. Труды американского общества инженеров-радиоэлектроников, т. 66, 1978, N12, с.37-61.
- 11.Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М: Радио и связь, 1982, 432с.
- 12.Магомедов И.А. и др. Применение теории нечетких множеств к задачам управления нестационарными процессами. В сб.: Методы и системы принятия решений. - Рига: РПИ, 1984, с.60-65.

13. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. - М.: Радио и связь, 1986, 408 с.
14. Лисиенко В.Г., Самойлович Ю.А. Теплотехнические основы технологии и конструирования машин непрерывного литья заготовок. Издательство Красноярского университета: Красноярск, 1986. 120 с.
15. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. – М.: Металлургия, 1985. 280 с.
16. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 320 с.
17. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей. М.: МИСиС, 2000. 272 с.
18. Огороков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971, 344с.
19. Никольский Л.Е., Зинуров И.Ю. Оборудование и проектирование электросталеплавильных цехов. Учеб. Пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1993. – 272с.
20. ГОСТ 805-95. Межгосударственный стандарт. Чугун передельный. Технические условия.
21. Металлургия чугуна: Учебник для вузов. 3 – е изд., перераб. и доп. / Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
22. Назаров А.В., Лоскутов А.И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем – СПб.: Наука и Техника, 2003. – 384 с.
23. Девятов Д.Х., Кочержинская Ю.В., Прохоров Е.В. Применение нейросетевой модели для формирования экспертной оценки технологии аглодомного комплекса // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации. Сборник трудов Российской научно – технической конференции – Магнитогорск, 2007. Вып. 2. С 12 – 14.

- 24.Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / Под ред. В.М. Курейчика. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.
- 25.Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1998. – 239 с.
- 26.Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для вузов. Изд. 5-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1977. – 479 с.
- 27.Дюльдина Э.В., Кочержинская Ю.В. Физикохимия доменных шлаков // Известия Челябинского научного центра, вып. 4 (21), 2003, С. 96-104.
- 28.Гольдштейн Н.Л. Краткий курс теории металлургических процессов. — Свердловск: Metallurgizdat, 1961. -334 с.
- 29.Темкин М.И. Смеси расплавленных солей, как ионные растворы // Ж.Ф.Х., 1946. Т. 20. Вып. 1. С. 105—110.
- 30.Кожеуров В.А. К термодинамике основных металлургических шлаков // Ж.Ф.Х., 1949. Т. 23. Вып. 4. С. 484—497.
- 31.Кожеуров В.А. Термодинамика металлургических шлаков. — Свердловск: Metallurgizdat, 1955. 164с.
- 32.Есин О.А. Электрохимическая природа жидких шлаков. — Свердловск: Изд-во Дома техники Уральского индустриального института им. С.М. Кирова, 1946. 40 с.
- 33.Жило Н.Л., Большакова Л.И., Остроухов М.Я., Сагайдак И.И., Шпарбер Л.Я. Физико-химические свойства конечных доменных шлаков заводов СССР/ Сб. Шлаковый режим доменных печей. - М.: Изд-во «Металлургия», 1967. С. 149-169.
- 34.Есин О.А. К полимерной модели жидких металлов // Металлы, 1976. № 5. С. 45—48.

- 35.Есин О.А. О полимерной модели расплавленных силикатов и других окислов // Сталь. 1978. № 7. С. 497—500.
36. Топорищев Г.А., Брук Л.Б. Вязкость и полимеризация в силикатных расплавах // Металлы, 1977. № 6. С. 63—68.
- 37.Брук Л.Б., Топорищев Г.А. О связи физико–химических свойств с полимерной структурой силикатных расплавов / Сб. Исследования структуры магматических расплавов. — Свердловск: Изд–во УНЦ АН СССР, 1981. С. 16—21.
- 38.Новиков В.К. Развитие полимерной модели силикатных расплавов // Расплавы, 1987. Т. 1. Вып. 6. С. 21—33.
- 39.Сабирзянов Т.Г. К термодинамике расплавов $\text{CaO—SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ // Изв. Вузов. Черная металлургия, 1989. №9. С. 1-3.
- 40.Приходько Э.В. Физико–химическая модель структуры шлаковых расплавов // Сталь, 1990. № 10. С. 14—21.
- 41.Жмойдин Г.И., Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Лихачев Ю.М. О паспортизации экспериментальных материалов для банка данных «Металлургия» // Изв. Вузов. Черная металлургия, 1988. № 8. С. 136—138.
- 42.Тогобицкая Д.Н., Хамхотько. А.Ф., Варивода О.И., Лихачев Ю.М. Моделирование на ЭВМ свойств оксидных систем.// Изв. Вузов. Черная металлургия, 1991. № 12. С. 41—45.
43. Басов А.В., Жмойдин Г.И., Магидсон И.А., Смирнов Н.А., Нечаев С.Ю. Вязкость расплавов системы $\text{CaO—Al}_2\text{O}_3\text{—CaF}_2\text{—Na}_2\text{O}$ и CaO –криолит // Расплавы, 1992. № 4. С. 34—39.
- 44.Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Белькова А.И. Информационное, алгоритмическое и программное обеспечение для решения задач оптимизации доменной шихты // Металлург, 1999. № 6. С. 42—44.
45. Жмойдин Г.И., Тогобицкая Д.Н. Приходько Э.В. Информационные технологии в науке о металлургических расплавах: Труды X Российской

- конференции «Строение и свойства шлаковых расплавов» / Теоретическое изучение металлических и оксидных расплавов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. Т. 1. С. 29—32.
46. Хайкин С.Э. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд., испр.: Пер. с англ. — М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. — 1104 с.
47. Назаров Л.Е., Томашевич Н.С., Балухто А.Н. Нейросетевые методы обнаружения, классификации и распознавания объектов на изображениях // Журнал «Нейрокомпьютеры», выпуск 11-12 (2006). — М.: Радиотехника, 2006. — С. 25-43.
48. Прикладные нейросетевые системы обработки изображений / А.А. Буянов, А.И. Власов, А.В. Загоскин // нейрокомпьютеры в системах обработки изображений. Книга 7: Коллективная монография. — М.: Радиотехника, 2003. — С. 56-96.
49. Logunova O.S., Zaretsky M.V., Azarova O.A. Continuous-casting template defect recognition by means of hybrid neural network // The 10th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2008), Antalya, Turkey. Proceedings of the International Workshop. — Ufa: Ufa State Aviation Technical University. — 2008. — V. 1. — P. 49 – 50
50. Нейросетевые методы в диагностике ишемической болезни сердца / Немкова А.В., Необутов И.В., Зарецкий М.В., Каплан А.И. // «Информационные технологии и математическое моделирование»: Сборник научных трудов — Томск, Изд-во Томского университета, 2009. — Ч. 2. — 306 с. ISBN 978-5-7511-1930-0. — С. 245-251.
51. Применение систем искусственного интеллекта в диагностике ишемической болезни сердца / Немкова А.В., Необутов И.В., Зарецкий М.В. // «Актуальные вопросы развития современной науки, техники и технологий»: Сборник научных трудов, — М.: г. Москва, Издательско-полиграфический комплекс НИИРРР, 2009. — 132 с. ISBN 978-5-903967-12-4. — С. 89-92.

52. Ячиков И.М., Логунова О.С., Кочержинская Ю.В., Ларина Т.П., Зарецкий М.В., Егорова Л.Г., Кухта Ю.Б., Ячиков М.И., Суханова М.Н., Азарова О.А. Совершенствование методов сбора, регистрации, обработки, хранения, передачи и защиты информации для повышения эффективности управления металлургическими агрегатами, направленного на повышение производительности, качества продукции и экологических показателей. Создание информационного и математического обеспечения новых комплексных информационных технологий и систем для повышения эффективности управления металлургическими агрегатами (ГК № П2402 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России») // Научно-технический отчет о выполнении I этапа Государственного контракта № П2402 от 18.11.2009. – М.: ВНИИЦ, 2009. – № 01200963958.
53. Цаплин А.И. Теплофизика в металлургии: учеб. пособие. Из-во Пермского гос. техн. Ун-та, 2008. – 230 с.
54. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет /Под общей ред. Г.А. Шалаева. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2003. – 320 с.
55. Самойлович Ю.А., Крулевецкий С.А., Горяинов В.А., Кабаков З.К. Тепловые процессы при непрерывном литье стали. М. Металлургия, 1982 – 152 с.
56. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. Минск: Наука и техника, 1976. – 144 с.
57. Грязнов В.Л., Полежаев В.Н. Исследование некоторых разностных схем и аппроксимаций граничных условий для численного решения уравнений тепловой гравитационной конвекции. М.: Наука, 1974. 71с. (Препринт № 40 Института проблем механики АН СССР).
58. Берковский Б.М., Полевиков В.К. Вычислительный эксперимент в конвекции // Мн.: Университетское. 1988. – 167с.

59. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. 1984. М.: Энергоатомиздат. - 150 с.
60. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука, - 1967.
61. Моделирование электровихревых течений и тепломассопереноса в ванне расплава ДППТ /И.М. Ячиков //– М.: ВНИИЦ, 2009. - № 50200901032.
62. Госмен А.Д., Пан В.М., Панчел А.К. и др. Численные методы исследования течений вязкой жидкости. М.: Мир, 1972. – 323 с.
63. Ерохин А.А. Плазменно-дуговая плавка металлов и сплавов. М.: Наука, 1975. – 188 с.
64. Ерохин А.А. Закономерности плазменно-дугового легирования и рафинирования металлов. М.: Наука, 1984. – 185 с.
65. Смитлз К. Дж. Металлы. М.: Металлургия. 1980. - 447 с.
66. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. – М.: Металлургия, 1974. – 496 с.
67. Электровихревые течения / В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин. Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.
68. Егоров А.В. Современная дуговая сталеплавильная печь// Труды III Международной научно-практической конференции «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова». М. МИСиС, 2006. - С. 279-286.
69. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. Минск: Наука и техника, 1976. – 144 с.
70. Госмен А.Д., Пан В.М., Панчел А.К. и др. Численные методы исследования течений вязкой жидкости. М.: Мир, 1972. – 323 с.
71. Самарский А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 567 с.
72. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 489 с.

- 73.Самойлович, Ю.А. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю.А. Самойлович [и др.] – М.: Metallurgy, 1982. – 152 с.
- 74.Гладков, Д.И. Статистический поиск при обучении автоматических систем / Д.И. Гладков // Проблемы статистической оптимизации. – Рига: Зинатне, 1968. – С. 42 – 59.
- 75.Гладков, Д.И. Неградиентные методы случайного поиска / Д.И. Гладков // Вопросы кибернетики и вычислительной математики. – Ташкент: Фан, 1969. – С. 22 – 41.
- 76.Казаков, И.Е. Статистическая теория систем управления в пространстве состояний / И.Е. Казаков. – М.: Наука, 1975. – 432 с.
- 77.Логунова, О.С. Алгоритмизация расчета и выбора схемы и режимов охлаждения непрерывно-литой заготовки прямоугольного сечения / О.С. Логунова, В.А. Обрезков // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: тр. V Всерос. науч.-практ. конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – С. 245 – 249.
- 78.Логунова, О.С. Методика выбора режимов вторичного охлаждения непрерывно-литой заготовки в многокритериальной среде / О.С. Логунова, В.В.Павлов // Metallurgical heat engineering: history, modern state, future. To the centenary of the birth of M.A. Glinka: sb. tr. III International. pract. conference. – М.: МИСиС, 2006. – С. 417 – 421.
- 79.Логунова, О.С. Структура программного обеспечения для реализации алгоритма неградиентного случайного поиска в задачах металлургического направления / О.С. Логунова, Е.Г. Тетюшина, И.В. Осипов // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конференции / под ред. Девятова Д.Х. – Магнитогорск: ИПЦ ООО Профпринт, 2005. – Вып. 1. – С. 117 – 121.
- 80.Логунова, О.С. Алгоритм неградиентного метода случайного поиска для решения многокритериальной задачи выбора режимов вторичного охла-

- ждения непрерывно-литой заготовки / О.С. Логунова; под ред. С.И. Лукьянова // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – Вып. 11. – С. 154 – 161.
81. Логунова, О.С. Блочный алгоритм неградиентного метода случайного поиска с операторами адаптации для оптимизации вторичного охлаждения непрерывно-литой заготовки: свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 4202 – М.: ВНИИЦ, 2005. – № 50200500020.
82. Казаков, И.Е. Статистическая теория систем управления в пространстве состояний / И.Е. Казаков. – М.: Наука, 1975. – 432 с.
83. Казаков, И.Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой / И.Е. Казаков. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
84. Сеа, Ж. Оптимизация. Теория алгоритмов / Ж. Сеа. – М.: Мир, 1973.
85. Васильев, Ф.П. Лекции по методам решения экстремальных задач / Ф.П. Васильев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. – 375 с.
86. Автоматизированные информационные технологии в экономике: учебник / под ред. проф. Г.А. Титоренко. – М.: ЮНИТИ, 2001. – 399 с.
87. Романов, В.П. Интеллектуальные информационные системы в экономике: учеб. пособие / В.П. Романов ; под ред. Н.П. Тихомирова. – М.: Изд-во «Экзамен», 2003. – 496 с.
88. Логунова, О.С. Программное обеспечение автоматизированной системы распознавания изображения на серном отпечатке темплета непрерывно-литой заготовки – “Q&S” / О.С. Логунова, Х.Х. Нуров // Новые программные средства для предприятий Урала : сб. тр. регион. науч.-техн. конференции. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – Вып. 2. – С. 126 – 131.
89. Логунова, О.С. Структура и алгоритмы программного обеспечения для автоматизированной оценки качества непрерывно-литого слитка / О.С. Логунова, Х.Х. Нуров // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГТУ, 2004. – С. 168 – 174.

90. Логунова, О.С. Программное обеспечение для математического описания изображения серного отпечатка / О.С. Логунова, Х.Х. Нуров // Современные информационные технологии в управлении : тез. докл. Всерос. науч.-техн. конференции. – Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2003. – С. 67 – 70.