

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»)

УДК: 621.3:62-50

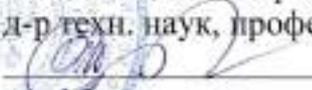
№ гос. регистрации: АААА-А20-120092890044-7

Инв.:



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
и инновационной работе,
д-р техн. наук, профессор

 Тулупов О.Н.

« 13 » 12 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ
(промежуточный)

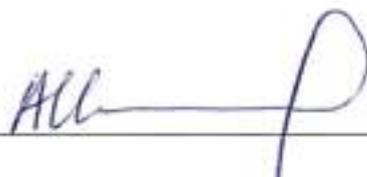
по годовому этапу проекта № 2020-07 ГЗ в рамках
базовой части государственного задания в сфере
научной деятельности (научный проект № FZRU-2020-0011)
по теме:

**«РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИ-
ЧЕСКИМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»**

Этап 2

Руководитель проекта:

ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук, доцент



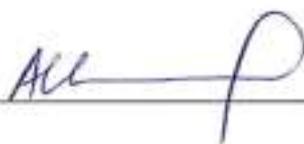
А.А. Николаев

Магнитогорск 2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель:

ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук, доцент

 А.А. Николаев

Ответственные исполнители:

ведущий научный сотрудник,
д-р техн. наук, доцент

 Р.Р. Дема

ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук, доцент

 И.А. Гришин

Исполнители:

Главный научный сотрудник,
д-р техн. наук, профессор

 Г.П. Корнилов

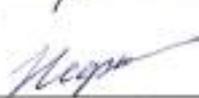
Главный научный сотрудник,
д-р техн. наук, профессор

 С.И. Платов

Старший научный сотрудник,
канд. техн. наук, доцент

 М.В. Харченко

Старший научный сотрудник,
канд. техн. наук

 С.П. Нефедьев

Младший научный сотрудник

 П.Г. Тулупов

Младший научный сотрудник

 А.С. Денисевич

Младший научный сотрудник

 М.В. Буланов

Младший научный сотрудник

 В.С. Ивекеев

Младший научный сотрудник

 И.А. Ложкин

Младший научный сотрудник

 М.С. Колкова

Младший научный сотрудник

 А.В. Масалимов

Инженер

 О.Р. Латыпов

Инженер

 Н.В. Урцев

Инженер

 Д.А. Назаров

РЕФЕРАТ

Отчет: 233 стр., 128 рис., 50 табл., 134 библиограф. источников

Ключевые слова: автоматизированные системы управления, электротехнические системы и комплексы, механическое оборудование горно-металлургических предприятий

В соответствии с программой проведения работ в рамках 2 этапа проекта №FRZU-2020-0011 государственного задания в научном отчете представлены результаты продолжающихся комплексных исследований, направленных на повышение эффективности технологических и электротехнических комплексов горно-металлургической отрасли. Исследования проводились по трем научным направлениям, связанным между собой общими целями и задачами. В рамках первого направления исследований разработаны усовершенствованные алгоритмы и системы управления электрическими режимами и перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь, обеспечивающие улучшение энергетических, временных и технологических показателей энергоемких электросталеплавильных агрегатов. В рамках второго направления разработаны новые математические модели контактного взаимодействия процесса листовой горячей прокатки, позволяющие с высокой достоверностью выдавать практические рекомендации по загрузке клетей прокатных станов, а также определять эффективность процесса листовой горячей прокатки по предложенному критерию эффективности. Также реализованы новые модели теплового состояния прокатываемой полосы и рабочих валков, учитывающие основные технологические особенности процесса листовой горячей прокатки. В рамках третьего направления выполнена разработка научно обоснованных технических решений по совершенствованию режимов работы установок физико-механических свойств и элементного анализа движущегося материала. В частности, выполнена оптимизация конструктивных и технологических параметров работы установок определения физико-механических свойств и элементного анализа движущегося материала в зависимости от параметров потока, а также разработано программного обеспечение и основные элементы автоматизации для внедрения в существующие АСУ ТП горно-обогатительных и металлургических предприятий.

Результаты исследований по 2 этапу ГЗ опубликованы в 20 научных статьях в журналах и сборниках научных трудов конференций, индексируемых наукометрической системой Scopus, из них 4 статьи в журналах с квартилем Q1,2, также дополнительно в 10 научных статьях в изданиях, входящих в ядро РИНЦ. По результатам исследований опубликована 1 рецензируемая монография и получены 1 патент РФ на изобретение, а также 9 свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ. Научные результаты апробированы на 16 научно-технических конференциях международного и национального уровня. По результатам работы подготовлено 5 диссертаций, из них: 1 – на соискание ученой степени д-ра техн. наук, 4 – на соискание ученой степени кандидата технических наук.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 7 |
| 1. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА И МОЩНОСТИ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ВРЕМЕННЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ..... | 10 |
| 1.1. Разработка универсальных способов и алгоритмов обработки измеряемых электрических сигналов электрического контура электродуговой печи при использовании различных типов измерительных устройств..... | 11 |
| 1.1.1. Трансформатор тока на первичной стороне ПТ при соединении обмоток по схеме $\Delta/\Delta-0$ | 13 |
| 1.1.2. Использование поясов Роговского на вторичной стороне печного трансформатора при соединении обмоток по схеме $\Delta/\Delta-0$ и $Y/\Delta-11$ | 14 |
| 1.1.3. Использование трансформаторов тока, встроенных в трёхфазную первичную обмотку печного трансформатора при группах соединения $\Delta/\Delta-0$ и $Y/\Delta-11$ | 15 |
| 1.1.4. Разработка функциональной схемы универсального алгоритма обработки сигналов с датчиков тока..... | 19 |
| 1.2. Разработка усовершенствованного адаптивного регулятора импеданса, обеспечивающего лучшее качество регулирования полного сопротивления электрического контура электродуговой печи по сравнению с существующими решениями, используемыми в зарубежных и отечественных аналогах..... | 21 |
| 1.2.1. Анализ недостатков существующих систем управления гидроприводом перемещения электродов..... | 21 |
| 1.2.2. Описание структуры усовершенствованного нелинейного адаптивного П-регулятора импеданса..... | 24 |
| 1.3. Разработка усовершенствованных алгоритмов диагностики стадий плавок и автоматического управления электрическими режимами электродуговых печей с использованием информации о гармоническом составе токов и напряжений электрических дуг..... | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 1.4. Реализация усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами электрических режимов ДСП и УКП на действующем оборудовании АСУ ТП электросталеплавильных агрегатов металлургических предприятий..... | 43 |
| 1.4.1 Оценка эффективности работы адаптивного нелинейного П-регулятора импеданса на примере УКП..... | 45 |
| 1.4.2 Оценка эффективности разработанной усовершенствованной системы управления электрическим режимом с применением информации о гармоническом составе напряжений дуг на примере ДСП шахтного типа.. | 49 |
| 1.4.3 Реализация алгоритма управления электрическим режимом по коэффициенту шлака на примере двухпозиционной УКП..... | 57 |
| 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ИНСТРУМЕНТ – ЗАГОТОВКА» ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ ПОВЫШАЮЩИХ КАЧЕСТВО ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ И РЕСУРС ОБОРУДОВАНИЯ | 61 |
| 2.1. Разработка и численная реализация модели контактного взаимодействия в технологической системе «заготовка - горячая прокатка - горячекатаная полоса»..... | 61 |
| 2.1.1. Моделирование контактного взаимодействия в системе «рабочий валок - опорный валок»..... | 61 |
| 2.1.2 Математическое моделирование контактного взаимодействия в системе «рабочий валок –полоса» при листовой горячей прокатке»..... | 68 |
| 2.2. Разработка универсальной математической модели на примере непрерывных листовых станов горячей прокатки, позволяющей исследовать технологические процессы при прокатке заготовки в черновой и чистовой группах клетей стана | 78 |
| 2.2.1. Разработка модели характеризующей процесс нагружения главного привода рабочих клетей листового стана горячей прокатки..... | 79 |
| 2.2.2. Математическое моделирование процесса изнашивания рабочих валков листовых станов горячей прокатки..... | 85 |
| 2.2.3 Оценка влияния смазывания опорных валков стана горячей прокатки на изменение основных технологических параметров при прокатке..... | 95 |
| 2.3. Проведение дополнительных экспериментальных и теоретических исследований теплового состояния системы «инструмент-заготовка» и | 101 |

| | |
|--|------------|
| процессов окалинообразования при горячей прокатки заготовки для уточнения граничных условий разработанной модели контактного взаимодействия..... | |
| 2.3.1. Дифференциальное уравнение теплопроводности..... | 101 |
| 2.3.2. Численное исследование сложного теплообмена при контактном взаимодействии горячего листа с валками при горячей прокатке..... | 110 |
| 2.3.3. Численная реализация математической модели и исследование теплового состояния рабочих валков..... | 127 |
| 2.3.4. Исследование процесса окалинообразования в технологии горячей прокатки..... | 131 |
| 2.4. Моделирование узла системы гидромеханического удаления окалины и выявление закономерностей влияния конструктивных особенностей на количество удаляемой окалины..... | 141 |
| 2.5. Исследование влияния технологических режимов горячей прокатки на отсортировку по дефекту «вкатанная окалина», на примере широкополосного стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК»..... | 143 |
| 3. РАЗРАБОТКА НАУЧНО ОБОСНОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ДВИЖУЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА..... | 155 |
| 3.1. Источники ошибок анализа и методы повышения качества элементного анализа рентгенофлуоресцентным методом..... | 155 |
| 3.2. Испытания и апробация методики деконволюции, проведение лабораторных и промышленных испытаний с внедрением результатов в существующие АСУ ТП горно-обогатительных и металлургических предприятий..... | 164 |
| ВЫВОДЫ ПО ЭТАПУ..... | 214 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 221 |

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с планом реализации научного проекта государственного задания №FRZU-2020-0011 на 2021 год в рамках 2 этапа работы были продолжены теоретические и экспериментальные научные исследования, направленные на повышение эффективности технологических и электротехнических комплексов горно-металлургической отрасли с целью поддержания конкурентоспособности отечественных производителей металлургической продукции на мировом рынке. Исследования проводились в рамках трех основных направлений, связанных между собой общими целями и задачами, а именно: 1) разработка усовершенствованных алгоритмов и систем автоматического управления энергоемкими электросталеплавильными комплексами на базе дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП), обеспечивающих улучшение энергетических и временных показателей работы электросталеплавильных агрегатов по сравнению с известными системами управления ведущих зарубежных фирм Danieli, Primetals Technologies, SMS Siemag и др.; 2) создание и реализация комплексных подходов для модификации контактных поверхностей трения, подбора и применения эффективных смазочных материалов и способов подачи смазочных материалов, а также алгоритмов и систем управления режимами подачи смазочного материала применительно к тяжело нагруженным узлам трения горно-металлургического оборудования, в том числе станов горячей прокатки, а также ДСП и УКП; 3) разработка методов непрерывного контроля физических свойств и элементного состава сыпучего материала в потоке на основе рентгенофлуоресцентного анализа и инфракрасной спектроскопии для применения в системах управления технологическими процессами обогащения минерального сырья и агломерации концентратов, а также загрузки в ДСП.

Согласно содержанию технического задания научного проекта, в рамках 2 этапа работы были поставлены следующие задачи:

1) разработка новых алгоритмов и систем автоматического управления электрическими режимами, в основе которых лежит анализ гармонического состава токов и напряжений дуг; применение усовершенствованных алгоритмов и систем управления должно обеспечивать улучшение энергетических, временных и техно-

логических показателей работы ДСП и УСП (времени работы под током и цикла плавки, удельного расхода электроэнергии, удельного расхода электродов) за счет своевременного переключения ступени РПН печного трансформатора, реактора (при наличии), а также номера рабочей кривой, определяющего положение рабочей точки на электрических характеристиках агрегата, в течение цикла плавки в ДСП или обработки жидкой стали в УСП;

2) разработка усовершенствованной системы автоматического управления перемещением электродов электродуговой печи на базе усовершенствованного нелинейного адаптивного регулятора импеданса с функцией полной компенсации нелинейных свойств гидропривода и электрического контура дуговой печи; применение усовершенствованной системы управления должно обеспечивать уменьшение колебаний импеданса и токов дуг на различных стадиях плавки в ДСП и обработки жидкой стали в УСП с целью дополнительного улучшения энергетических и технологических показателей ДСП и УСП;

3) разработка универсального алгоритма обработки сигналов для различных способов измерения токов электрических дуг; данный алгоритм должен быть интегрирован в состав новой системы управления электрическим режимом, внедряемой в производство; алгоритм должен обеспечивать возможность функционирования системы управления ДСП и УСП при различных конфигурациях системы измерения токов дуг, а также при различных группах соединения обмоток печного трансформатора;

4) разработка программного обеспечения для головных программируемых логических контроллеров (ПЛК) в составе АСУ ТП ДСП и УСП, реализующее усовершенствованные алгоритмы управления электрическими режимами электросталеплавильных агрегатов;

5) разработка конечно-элементная модель контактного взаимодействия процесса листовой горячей прокатки, позволяющей на этапе формирования производственного задания высокой с достоверностью выдавать практические рекомендации по загрузке клетей стана, в том числе и определять эффективность процесса листовой горячей прокатки по предложенному критерию эффективности;

6) разработка алгоритма аналитического определения объема изношенной поверхности рабочего валка, учитывающего различные формы профилировок рабочих валков и отличающегося от известных способностью определения объема изношенного материала путем замера только по двум контрольным точкам: диаметр бочки валка в центре и диаметру бочки валка на расстоянии;

7) разработка и численная реализация математической модели теплового состояния прокатываемой полосы; в модели должно быть учтено влияние следующих технологических особенностей процесса листовой горячей прокатки: теплообмен полосы с валками; объемное тепловыделение при пластической деформации полосы; изменение теплового состояния полосы с учетом работы технологических систем: гидроудаления окалины; межклетевого охлаждения, а также принудительного охлаждения полосы, перед входом ее в очаг деформации;

8) разработана математическая модели тепловое состояние рабочих валков листового стана горячей прокатки для определения максимальной точки нагрева на бочке рабочего валка; проведение экспериментальных исследований по оценке достоверности разработанной модели на примере на двух листовых станах горячей прокатки: 2500 и 2000 ПАО «ММК»;

9) разработка научно обоснованных технических решений по совершенствованию режимов работы установок физико-механических свойств и элементного анализа движущегося материала; выполнение оптимизация конструктивных и технологических параметров работы установок определения физико-механических свойств и элементного анализа движущегося материала в зависимости от параметров потока, а также разработано программного обеспечение и основные элементы автоматизации для внедрения в существующие АСУ ТП горно-обогатительных и металлургических предприятий;

10) проведение теоретических и экспериментальных исследований интенсивности характеристических линий элементов, а также линий когерентного и некогерентного рассеяния линий рентгеновской трубки для железорудной смеси (ЖРС), агломерата и различных железосодержащих материалов (ЖСМ); разработка математической модели учета и компенсации колебаний расстояния между спектрометром и материалом;

11) промышленное испытание разработанной методики обработки спектров с целью оценки эффективности разработанной методики в плане определения химического состава ЖРС, агломерата и ЖСМ.

Выполнение вышеуказанных задач позволит перейти к выполнению работ по промышленному испытанию разработанных научно обоснованных технических решений по трем научным направлениям на действующих металлургических предприятиях России. Проведение данных исследований запланировано в рамках 3 этапа работы на 2022 год.

1. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА И МОЩНОСТИ С ЦЕЛЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ВРЕМЕННЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

В настоящее время электрометаллургия является быстроразвивающейся отраслью современной промышленности. При этом основными агрегатами электросталеплавильных цехов (ЭСЦ) предприятий черной металлургии являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП) и установки ковш-печь (УКП). Неотъемлемым элементом ДСП и УКП является система управления электрическим режимом, включающая в себя системы задания профиля плавки и управления положением электродов. С их помощью осуществляется изменение вторичного напряжения печного трансформатора и поддерживается длина электрической дуги, при которой достигается значение заданного электрического параметра ДСП (полного сопротивления, полной проводимости, тока или напряжения дуги).

В рамках предыдущего этапа исследований было выявлено, что подавляющее большинство существующих систем управления электрическим режимом обладают следующими существенными недостатками:

1. Отсутствие применения универсальных алгоритмов обработки измеряемых сигналов тока и напряжения при использовании различных типов измерительных устройств (катушки Роговского на вторичной стороне ПТ, трансформаторы тока на первичной стороне ПТ);

2. Отсутствие полной линеаризации параметров электрического контура ДСП (УКП) и регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов и отсутствие применения адаптивного нелинейного регулятора с возможностью подстройки коэффициентов усиления регулятора при изменении стадий плавки в ДСП и стабильности нагрева металла в УКП.

3. Отсутствие возможности диагностики стадий плавки в ДСП (оценка стабильности нагрева стали в УКП) и интеллектуальное управление процессом переключения ступеней РПН трансформатора, реактора и изменения рабочих кривых.

Таким образом, в рамках данной главы разработан комплекс технических решения, направленных на устранение обозначенных недостатков. Данные решения ложатся в основу новых, усовершенствованных алгоритмов управления электрическим режимом ДСП и УКП, позволяющих обеспечить улучшение их энергетических, временных и технологических показателей.

1.1. Разработка универсальных способов и алгоритмов обработки измеряемых электрических сигналов электрического контура электродуговой печи при использовании различных типов измерительных устройств

Опыт эксплуатации систем управления электрическим режимом ДСП и УКП различного класса и мощности показывает, что на практике, как правило, используются три основные конфигурации системы измерения токов электрических дуг, предусматривающие использование: 1) измерительных трансформаторов, включенных на первичной стороне ПТ для измерения линейных токов; 2) поясов Роговского на вторичной стороне ПТ; 3) трансформаторов тока, включенных непосредственно трёхфазную первичную обмотку ПТ. Также могут применяться комбинации из двух различных конфигураций. При этом используются следующие группы соединения обмоток ПТ: $Y/\Delta-11$ и $\Delta/\Delta-0$ [1.1]. Для наглядности, все возможные варианты сочетания соединения обмоток и конфигураций систем измерения токов дуг приведены на рис.1.1. Более подробные схемы, в свою очередь, приведены на рис. 1.2.

Отметим, что использование сигналов с системы измерения токов дуг напрямую без дополнительной обработки не во всех обозначенных случаях представляется возможным. Для наглядности, особенности каждого случая приведены в таблице 1.1.

Особенности использования различных устройств измерения величины тока дуги в составе системы управления электрическим режимом ДСП (УКП)

| Конфигурация измерительной системы токов | Соединение $\Delta/\Delta-0$ | Соединение $Y/\Delta-0$ |
|---|---|---|
| Трансформаторы тока, установленные на первичной стороне ПТ | Требуется приведение к току вторичной стороны через КТ для текущей ступени ПТ | Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму |
| Трансформаторы тока, включенные в обмотку на первичной стороне ПТ | Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму | Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму |
| Пояса Роговского, установленные на вторичной стороне ПТ | Требуется интегрирование сигнала для восстановления реальных осциллограмм токов дуг | Требуется интегрирование сигнала для восстановления реальных осциллограмм токов дуг |

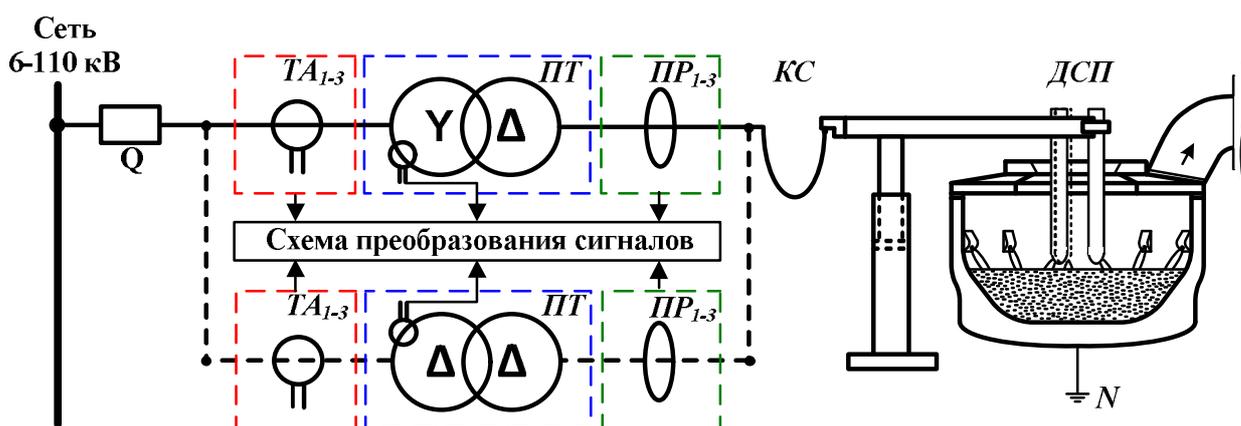


Рис. 1.1. Возможные типы систем измерения токов электрических дуг и соединения обмоток печного трансформатора (ТА₁₋₃ - измерительные трансформаторы тока в фазах «1», «2» и «3»; ПТ – печной трансформатор со встроенными в обмотку трансформаторами тока; ПР₁₋₃ - пояса Роговского в фазах «1», «2» и «3»; КС – короткая сеть, Q – оперативный вакуумный выключатель)

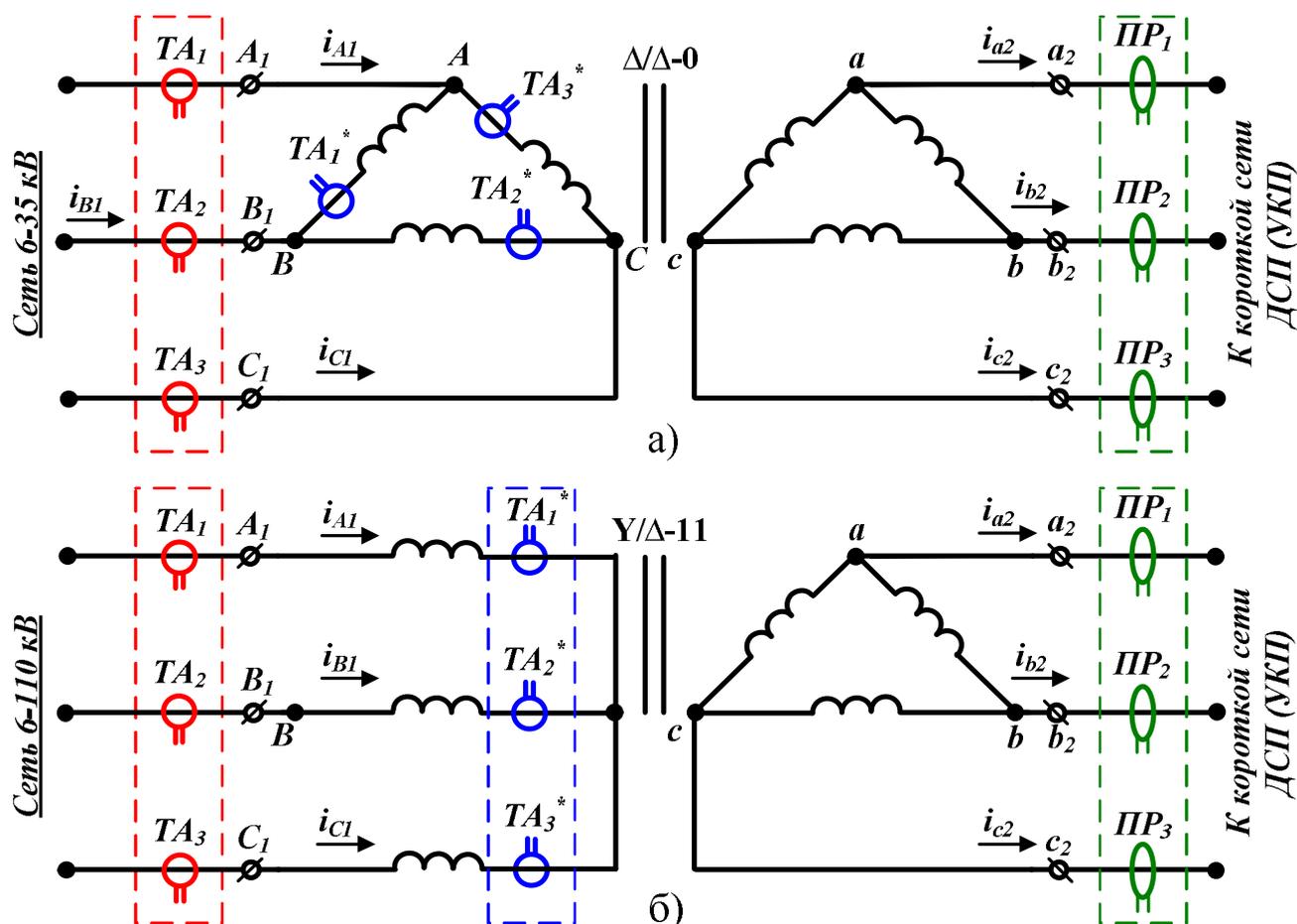


Рис. 1.2. Варианты включения устройств измерения тока дуги в схему электрического контура ДСП при соединении обмоток печного трансформатора по схеме: а) $\Delta/\Delta-0$; б) Y/ Δ -11 (i_{A1} , i_{B1} , i_{C1} – токи на первичной стороне печного трансформатора; i_{a1} , i_{b1} , i_{c1} – токи на вторичной стороне печного трансформатора; TA1, TA2, TA3 – внешние измерительные трансформаторы тока на первичной стороне ПТ; TA1*, TA2*, TA3* – встроены в ПТ измерительные трансформаторы тока)

1.1.1. Трансформатор тока на первичной стороне ПТ при соединении обмоток по схеме $\Delta/\Delta-0$

Данный случай является наиболее простым, поскольку приведение величины тока на вторичную сторону ПТ производится в соответствии с формулой:

$$i_D(t) = i_{TA}(t) \cdot K_{TA} \cdot K_T, \quad (1.1)$$

где $i_{TA}(t)$ – мгновенное значение тока в измерительной обмотке трансформатора тока; K_{TA} – коэффициент трансформации измерительного устройства;

В большинстве случаев преобразование в соответствии с формулой (1.1) может быть реализовано с использованием инструментальной базы, доступной в большинстве современных систем управления электрическим режимом. Тем не менее, в устаревших системах иногда отсутствует возможность учёта изменения величины K_T в зависимости от ступени печного трансформатора $N_{ТР}$. Вследствие этого, на аппаратном уровне приходится прибегать к использованию дополнительных трансформаторов тока, коэффициент трансформации которых изменяется при переключении РПН печного трансформатора, благодаря чему достигается неизменная величина коэффициента трансформации $K_{TA1} \cdot K_{TA2} \cdot K_T = const$.

1.1.2. Использование поясов Роговского на вторичной стороне печного трансформатора при соединении обмоток по схеме $\Delta/\Delta-0$ и $Y/\Delta-11$

При использовании поясов Роговского, выходной сигнал с катушки $U_{ПР}$ пропорционален производной тока i_D . По этой причине в системе измерения тока используются интегрирующие цепи, восстанавливающие осциллограмму тока за счёт операции интегрирования:

$$u_{ПР}(t) = L_{ПР} \frac{di_D(t)}{dt}, \quad (1.2)$$

$$i_D(t) = K_{ПР} \cdot \int u_{ПР}(t), \quad (1.3)$$

где $K_{ПР}$ – величина коэффициента пропорциональности пояса Роговского, равная индуктивности катушки $L_{ПР}$; $u_{ПР}(t)$ – напряжение на выходе пояса Роговского.

Как правило, в современных системах управления электрическим режимом предусмотрено наличие аппаратных цепей интегрирования для восстановления реальной осциллограммы тока дуги. При этом выходной сигнал цепей

интегрирования нормируется до значения 20-40 мА или 1-5 А в зависимости от параметров входных датчиков тока, используемых в СУ ДСП (УКП). В этом случае в выражениях (1.2;1.3) учитываются дополнительные коэффициента трансформации интегрирующих цепей $K_{ИЦ}$.

1.1.3. Использование трансформаторов тока, встроенных в трёхфазную первичную обмотку печного трансформатора при группах соединения $\Delta/\Delta-0$ и $Y/\Delta-11$

Необходимо отметить, что при подключении обмоток по схеме $Y/\Delta-11$ сигналы с трансформаторов тока, встроенных в обмотку, и внешних трансформаторов тока, установленных перед трансформатором, по очевидным причинам дают эквивалентные результаты. Вследствие этого, дальнейшее рассмотрение для соединения $Y/\Delta-11$ будет проведено только для встроенных трансформаторов тока.

Также отметим, что данный вариант является наиболее сложным в применении вследствие того, что характер изменения тока в измерительных обмотках трансформаторов при их соединении в схему «полная звезда» не совпадает с характером изменения тока на вторичной стороне ПТ из-за неодинакового соединения обмоток ПТ. Для исследования взаимосвязи между токами на первичной и вторичной сторонах ПТ была разработана вспомогательная математическая модель электрического контура ДСП с применением библиотеки SimPowerSystems, функциональная схема которой представлена на рис.1.3 [1.1-1.2]. Параметры модели были приняты исходя из расчёта, выполненного в главе 2, для $N_{TP}=8$. При этом для оптимизации быстродействия модели, электрическая дуга была представлена по методу С.И. Тельного.

Изначально, рассмотрим осциллограммы (рис.1.4), полученные с помощью математической модели при различных режимах работы печи (симметричный режим, однофазный обрыв дуги, однофазное КЗ дуги) для случая соединения обмоток ПТ по схеме $Y/\Delta-11$ (рис. 1.4.а-г).

На рис. 1.4.а и 1.4.б показаны сигналы i_{TA} и i_{TA}^* , соответствующие сигналам с внешних и встроенных в обмотку ПТ трансформаторов тока. Как уже отмечалось ранее, для случая $Y/\Delta-11$ полученные сигналы идентичны. Отметим, что здесь и далее для удобства анализа принимается в качестве допущения, что коэффициент трансформации всех измерительных устройств равен 1.

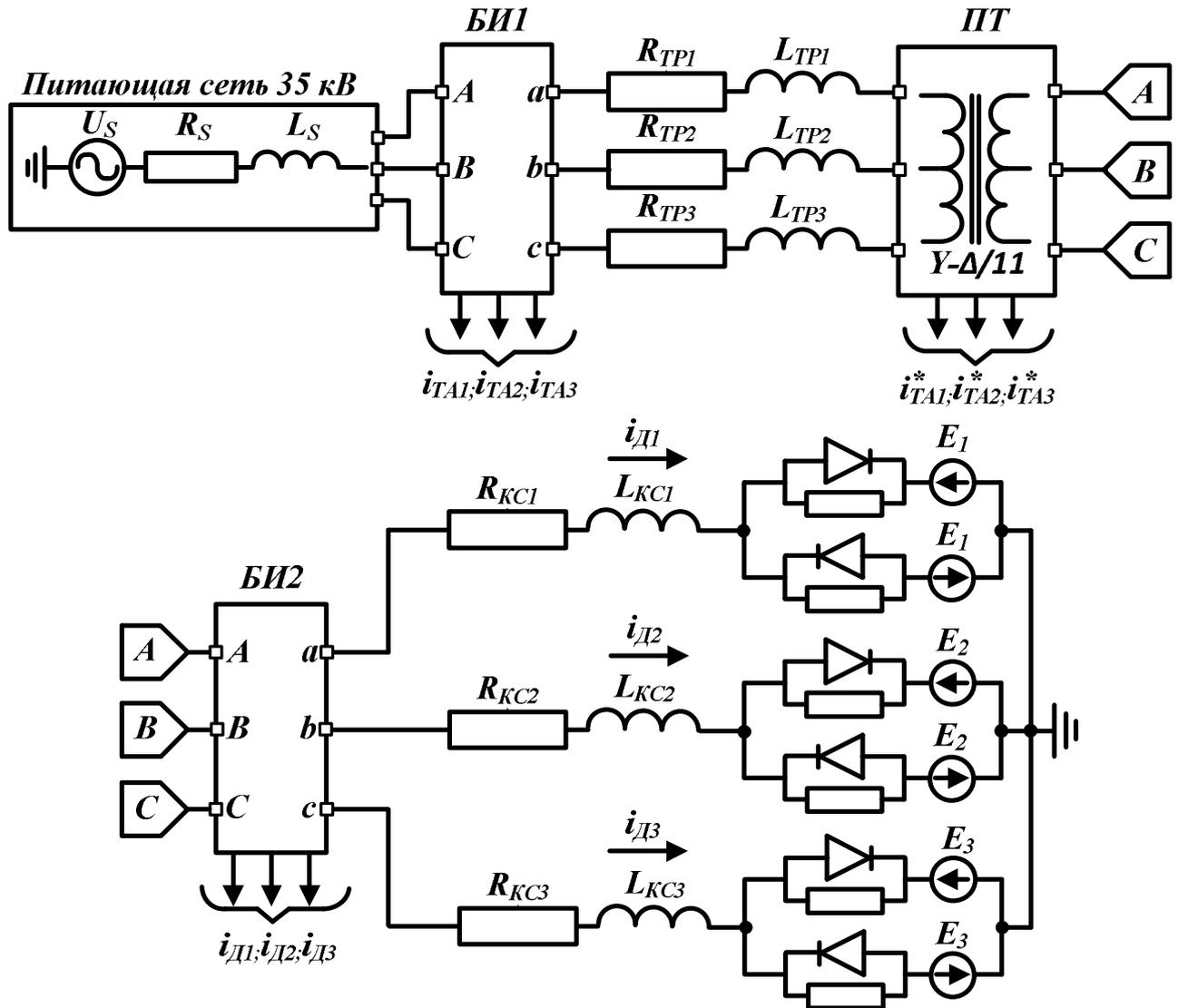


Рис. 1.3. Функциональная схема математической модели электрического контура ДСП с различными вариантами измерения сигнала тока дуги (БИ1 – блок измерения №1, моделирует внешние трансформаторы тока на первичной стороне; БИ2 – блок измерения №2 для определения фактического значения тока дуги; E_1, E_2, E_3 – противо-ЭДС электрической дуги)

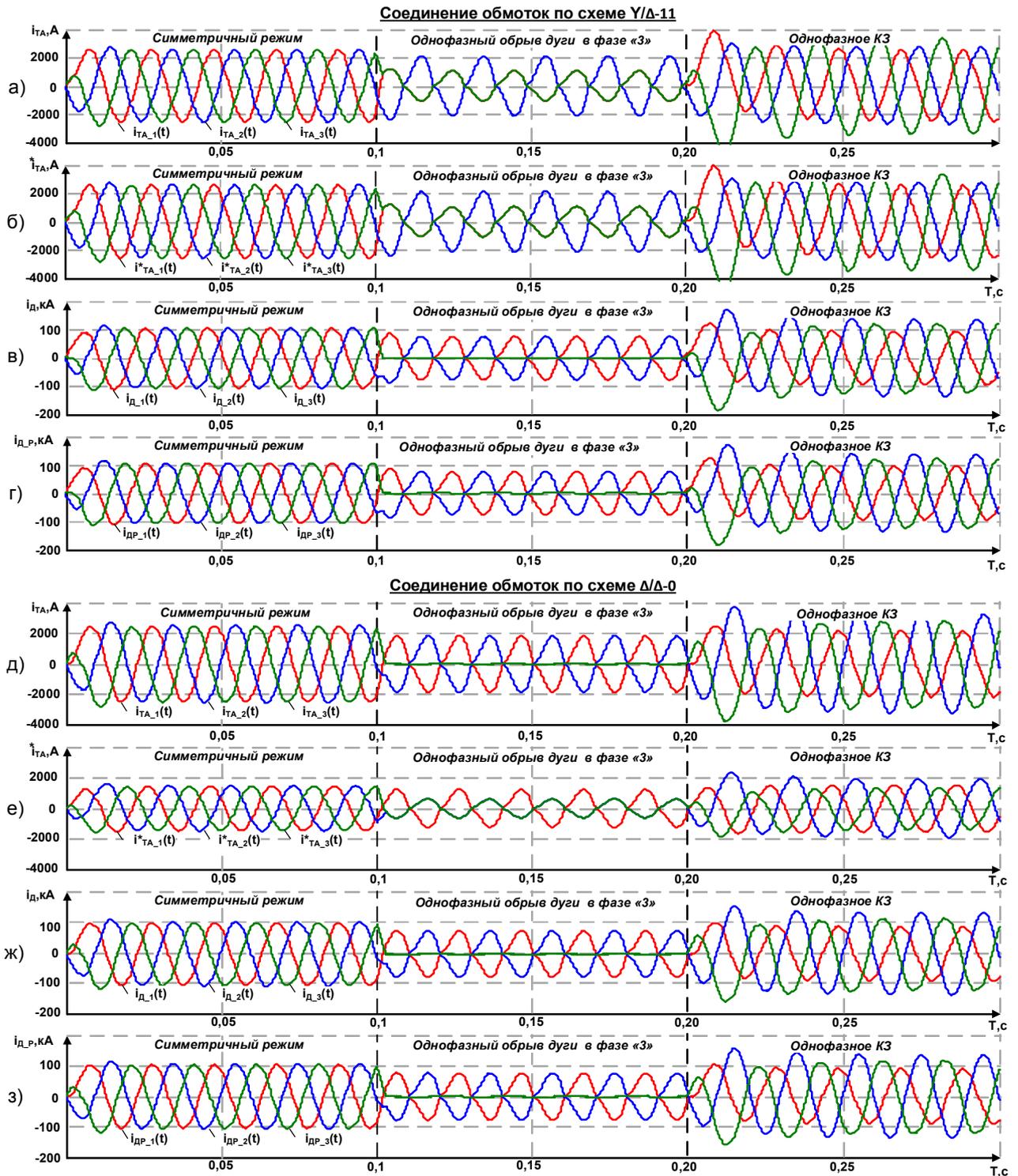


Рис. 1.4. Осциллограммы, демонстрирующие особенности применения встроенных в обмотку трансформаторов тока при различных способах соединения обмотки ПТ (а, д – осциллограммы сигналов с внешних трансформаторов тока; б, е – осциллограммы сигналов с внутренних трансформаторов тока, в, ж – осциллограммы фактического значения тока дуги; г, з – осциллограммы восстановленного значения тока дуги)

На рис. 1.4.в приведены осциллограммы фактических значений токов электрических дуг $i_{Д}$. Очевидно, что сигналы $i_{ТА1,2,3}$ и $i_{ТА1,2,3}^*$ являются идентичными по форме и амплитуде только в симметричном режиме. В режиме однофазного обрыва и однофазного КЗ имеет место значительное расхождение как по амплитуде, так и по фазе сигнала. Для того, чтобы получить корректные осциллограммы токов дуг $i_{Д_P}$ на основании сигналов $i_{ТА1,2,3}$ и $i_{ТА1,2,3}^*$, необходимо использовать следующее преобразование:

$$\begin{cases} i_{Д1_P} = K_T (i_{ТА_1}^* - i_{ТА_2}^*) \\ i_{Д2_P} = K_T (i_{ТА_2}^* - i_{ТА_3}^*) \\ i_{Д3_P} = K_T (i_{ТА_3}^* - i_{ТА_1}^*) \end{cases}, \quad (1.4)$$

где $i_{Д1_P}$, $i_{Д2_P}$, $i_{Д3_P}$ – расчётные значения сигнала тока электрической дуги; $i_{ТА_1}^*$, $i_{ТА_2}^*$, $i_{ТА_3}^*$ – сигналы с трансформаторов тока на первичной стороне ПТ.

Выражения (1.4) получены на основании векторных диаграмм, представленных на рис.1.5, показывающих взаимосвязь токов на первичной и вторичной стороне ПТ. Корректность преобразования (1.4) также подтверждается результатом моделирования, поскольку расчётный сигнал тока дуги $I_{Д_P}$ (рис.1.4.г) идентичен фактическому (рис.1.4.в).

Случай для осциллограмм при схеме соединения обмоток $\Delta/\Delta-0$ (рис.1.4.д-з) в целом аналогичен. Основное отличие заключается в том, что сигналы с внешних и встроенных в обмотку ПТ трансформаторов тока не идентичны (рис.1.4.д и 1.4.е). Здесь очевидно, что сигнал с внешних трансформаторов тока пропорционален фактическому значению тока дуги, и может быть рассчитан с использованием параметра K_T , о чём говорилось ранее. При этом для сигналов с встроенных в обмотку трансформаторов тока, согласно векторной диаграмме на рис.1.5, также необходимо прибегнуть к преобразованию:

$$\begin{cases} i_{Д1_P} = \sqrt{3}K_T (i_{ТА_1}^* - i_{ТА_3}^*) \\ i_{Д2_P} = \sqrt{3}K_T (i_{ТА_2}^* - i_{ТА_1}^*) \\ i_{Д3_P} = \sqrt{3}K_T (i_{ТА_3}^* - i_{ТА_2}^*) \end{cases}. \quad (1.5)$$

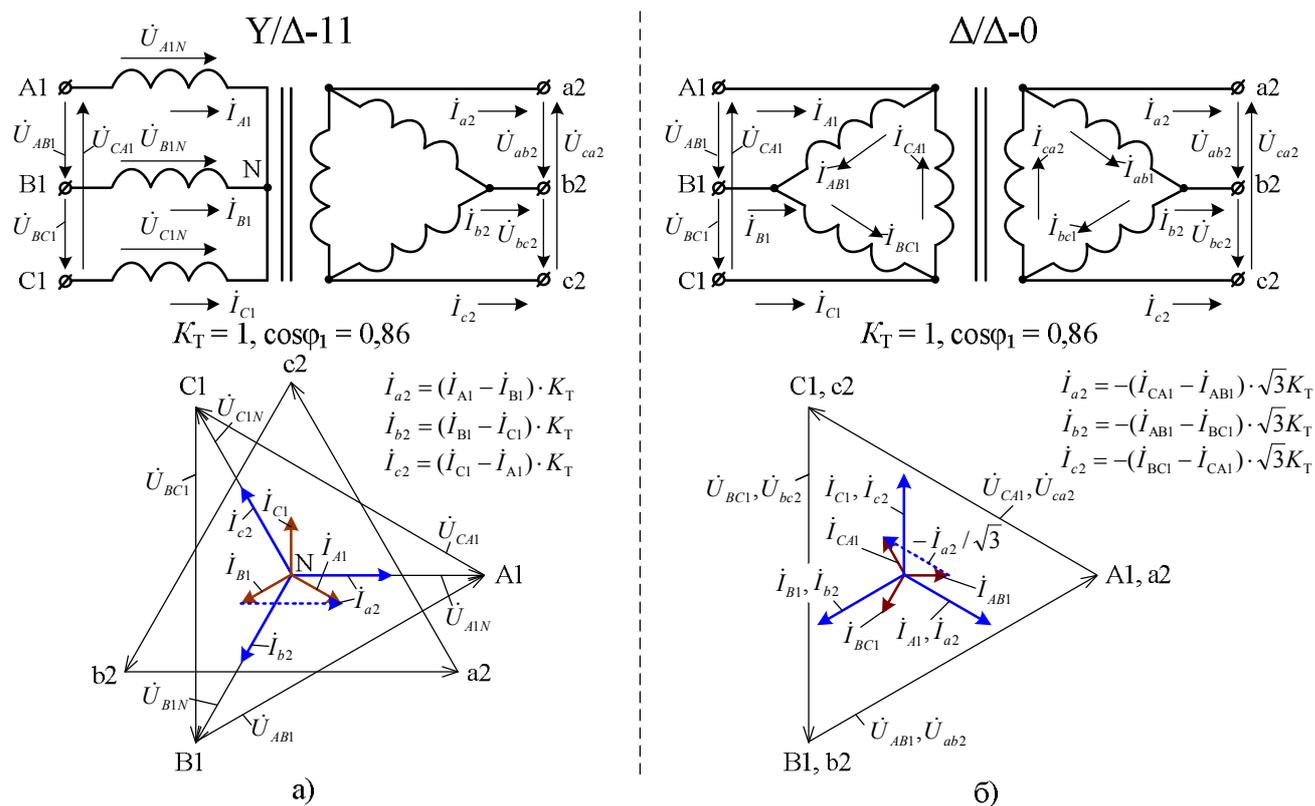


Рис. 1.5. Векторные диаграммы, показывающие взаимосвязь токов на первичной и вторичной сторонах печного трансформатора при различных группах соединения обмоток (а – группа соединения Y/Δ-11; б – группа соединения Δ/Δ-0)

1.1.4. Разработка функциональной схемы универсального алгоритма обработки сигналов с датчиков тока

Универсальный алгоритм обработки токовых сигналов, реализуемый на базе контроллера системы автоматического управления электрическими режимами ДСП (УКП), должен обеспечивать простую интеграцию существующих систем измерения токов на базе ТТ или поясов Роговского со встроенными датчиками тока системы управления, обеспечивающими нормирование и гальваническую изоляцию сигналов.

В случаях, когда в составе электрооборудования ДСП (УКП) применяются встроенные или внешние трансформаторы тока, устанавливаемые на первичной стороне ПТ, использование данного алгоритма позволяет исключить применение дополнительных аппаратных устройств для формирования сигналов обратных связей по току с постоянным коэффициентом трансформации,

например, дополнительных трансформаторов тока с изменяемым коэффициентом трансформации с функцией синхронизации с РПН ПТ. Вследствие этого, предлагается на практике использовать алгоритм, функциональная схема которого представлена на рис.1.6.

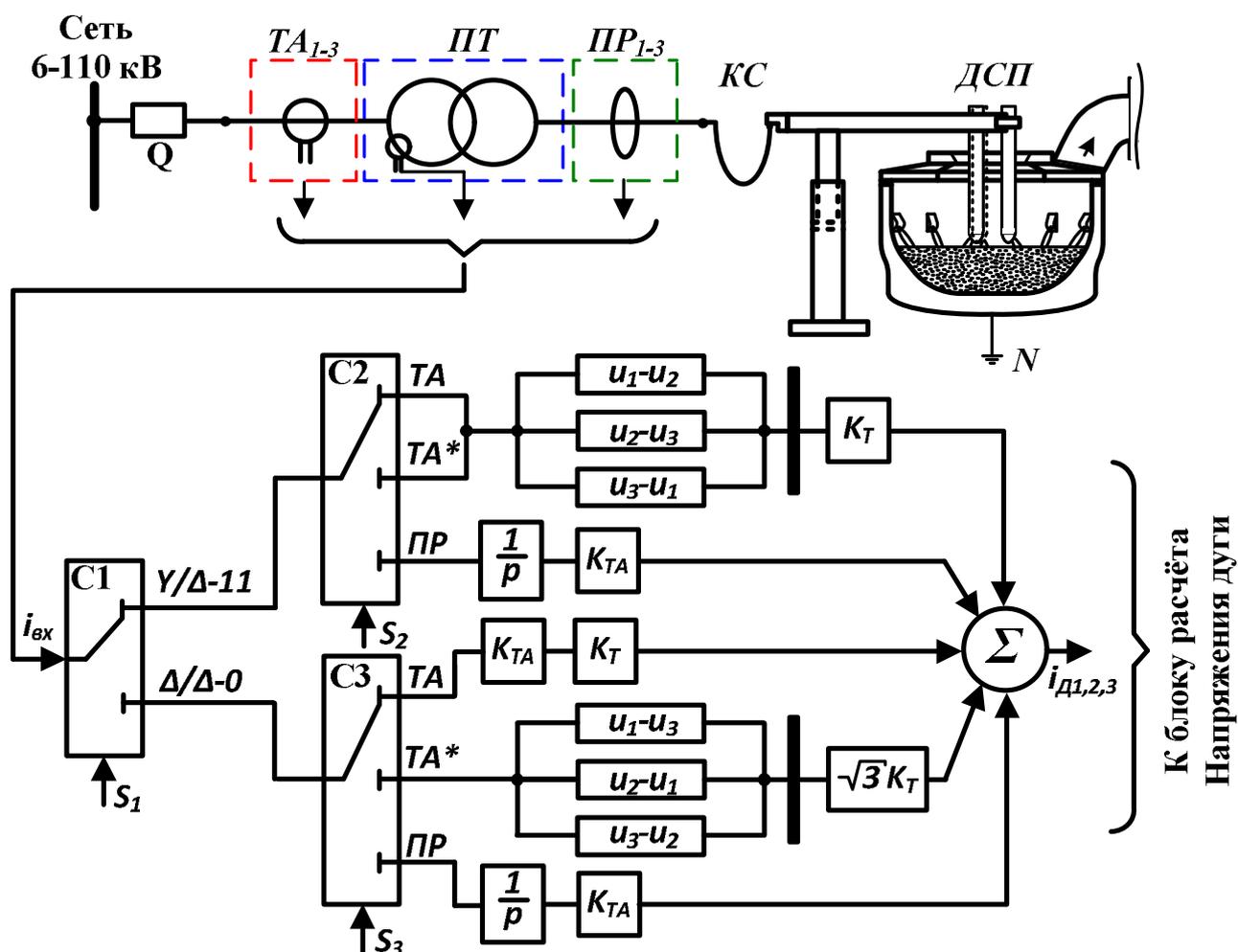


Рис. 1.6. Функциональная схема универсального алгоритма обработки сигналов для различных способов измерения тока дуги (C_1, C_2, C_3 – селекторы №1,2,3; S_1, S_2, S_3 – сигналы управления селекторами №1,2,3 соответственно)

Данный алгоритм функционирует следующим образом. Изначально на вход селектора C_1 подаётся сигнал i_{BX} с системы измерения тока ДСП (УКП). В зависимости от величины сигнала управления S_1 , данный сигнал поступает либо на вход селектора C_2 (случай соединения обмоток ПТ по схеме $Y/\Delta-11$), либо на вход селектора C_3 (случай соединения обмоток ПТ по схеме $\Delta/\Delta-0$).

Величины управляющих сигналов S_2 и S_3 определяют, какое устройство измерения тока дуги используется на данный момент. После прохождения через селекторы, входной сигнал подвергается преобразованиям, которые были подробно описаны ранее. Конечным результатом работы алгоритма является восстановленное значение сигнала тока электрической дуги на вторичной стороне ПТ, которое поступает непосредственно в систему управления электрическим режимом для дальнейшего расчёта действующего значения тока дуги I_{RMS} , полного импеданса фазы $Z_{2\phi}$ или полного адмитанса фазы $Y_{2\phi}$, активной, реактивной и полной мощности на вторичной стороне ПТ P_2 , Q_2 , S_2 соответственно.

1.2. Разработка усовершенствованного адаптивного регулятора импеданса, обеспечивающего лучшее качество регулирования полного сопротивления электрического контура электродуговой печи по сравнению с существующими решениями, используемыми в зарубежных и отечественных аналогах

1.2.1. Анализ недостатков существующих систем управления гидроприводом перемещения электродов

Как уже отмечалось ранее, подавляющее большинство современных систем управления электрическим режимом имеют ряд недостатков, связанных со структурой системы управления гидравлическим приводом перемещения электродов, приводящих к невозможности полной линеаризации контура регулирования и его настройки на технический оптимум на всём диапазоне рабочих длин дуг.

Рассмотрим данный вопрос более подробно на примере наиболее распространённой системы управления ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия), функциональная схема которой приведена на рис.1.7 [1.3].

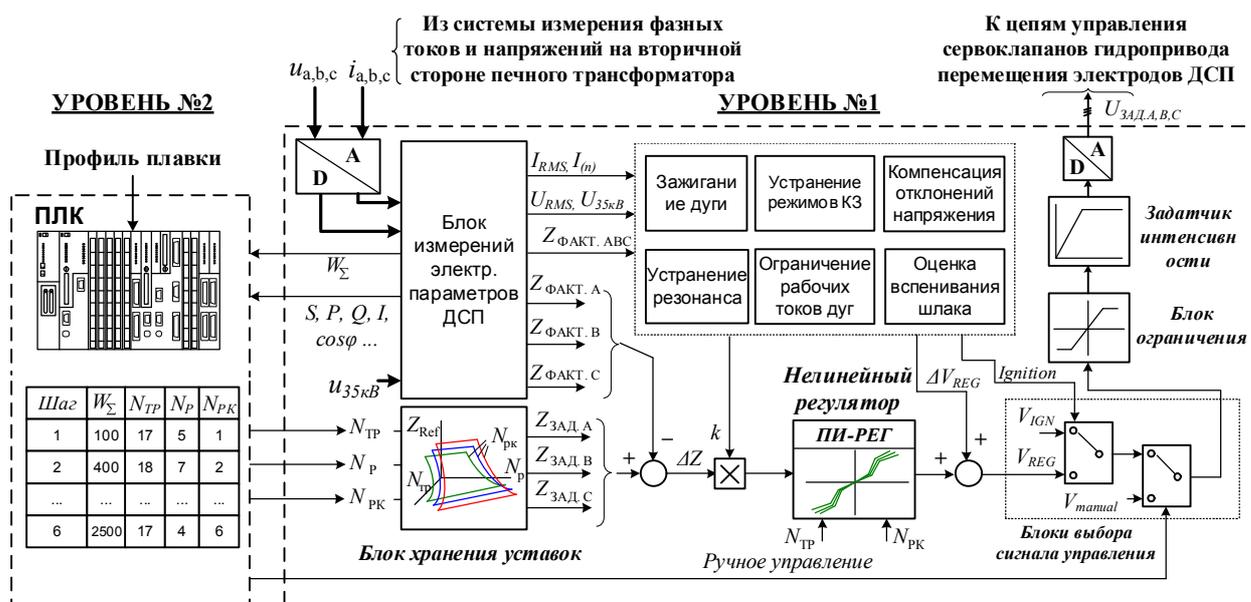


Рис. 1.7. Упрощенная функциональная схема системы управления электрическим режимом ДСП и УКП ARCOS

В системе ARCOS поддержание заданной величины полного импеданса фазы $Z_{2\phi.Зад}$ осуществляется за счёт поддержания относительной ошибки регулирования ΔZ^* на нулевом уровне. Величина ΔZ^* рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$\Delta Z^* = \frac{Z_{2\phi.Зад} - Z_{2\phi.Факт}}{Z_{2\phi.Зад}}, \quad (1.6)$$

где $Z_{2\phi.Зад}$ – заданное значение полного импеданса фазы, $Z_{2\phi.Факт}$ – фактическое значение полного импеданса фазы. При этом регулятор имеет пропорционально-интегральную структуру с нелинейной пропорциональной частью. Упрощённая функциональная схема регулятора в системе ARCOS представлена на рис.1.8. Отметим, что структура нелинейного блока в данном случае позволяет определять коэффициент усиления пропорциональной части для 8 зон ошибки регулирования. Помимо основных блоков, на выходное значение регулятора также оказывают влияние вспомогательные блоки, осуществляющие зажигание электрической дуги, контроль уровня тока, выявление и устранение длительных эксплуатационных коротких замыканий, коррекцию уставки регулятора в функции отклонения напряжения, устранение резонансных колебаний консолей с электродами и т.д.

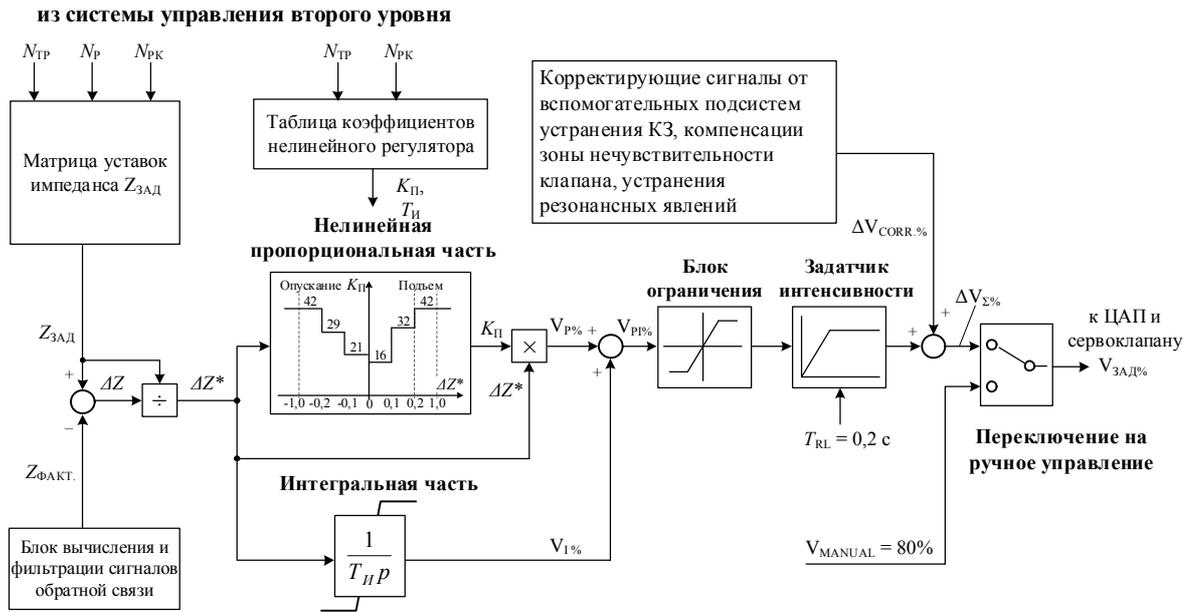


Рис. 1.8. Упрощенная функциональная схема нелинейного регулятора импеданса в системе ARCOS

У такой структуры регулятора есть ряд существенных недостатков. Первый недостаток связан с использованием результирующей нелинейной зависимости коэффициента усиления пропорциональной части $K_{\Pi} = f(\Delta Z^*)$, что значительно усложняет расчет коэффициентов регулятора при изменении параметров гидравлической системы, а также параметров электрического контура, поскольку в ней совмещены функции линеаризации регулировочных характеристик гидропривода перемещения электродов и нелинейной характеристики электрического контура перемещения электродов и нелинейной характеристики электрического контура $Z_{\text{ФАКТ.}} = f(L_{\text{Д}})$. Второй недостаток связан с ограниченным количеством зон ошибки регулирования ΔZ^* , для которых можно задать своё уникальное значение K_{Π} . Это приводит к невозможности полной линеаризации контура регулирования и его настройки на технический оптимум на всём диапазоне рабочих длин дуг, а также влечёт за собой трудоёмкую работу по подбору границ данных зон при настройке регулятора. Отметим, что обозначенные недостатки для регуляторов в других системах управления электрическим режимом остаются аналогичными. Например, в системе HI-REG Plus (Danieli, Италия) линеаризация гидравлического и электрического контура также совмещена в одном блоке нелинейного усиления, характеристика которого задана жестко и может меняться только в части гранич-

ных значений. В свою очередь, в системе DigitArc (AMI, Мексика) регулятор схож с системой ARCOS. Разница заключается лишь в том, что собственно регулятор представлен ПИД-звеном.

Усовершенствованная система управления электрическим режимом ДСП и УКП с использованием адаптивного нелинейного П-регулятора импеданса лишена обозначенных недостатков и позволяет повысить энергоэффективность работы печной установки [1.4-1.8]. Для более глубокого понимания предлагаемой концепции, рассмотрим структуру адаптивного регулятора более подробно.

1.2.2. Описание структуры усовершенствованного нелинейного адаптивного П-регулятора импеданса

Как отмечалось ранее, контур регулирования ДСП (УКП) содержит в себе два основных нелинейных компонента: гидропривод перемещения электродов и электрический контур. Нелинейность гидравлического контура обусловлена регулировочной характеристикой сервоклапана как основного исполнительного элемента, осуществляющего регулирование уровня подачи рабочей жидкости в поршневую полость гидроцилиндра. Помимо нелинейности, регулировочная характеристика сервоклапана $V_{зАд} = f(V_{эл})$, отражающей зависимость скорости перемещения электрода от величины сигнала задания, также может иметь мертвую зону, наличие которой приводит к появлению возрастающей с течением времени статической ошибки. Для компенсации нелинейности, а также негативного эффекта от наличия мёртвой зоны, необходимо использовать в контуре регулирования специальную линеаризующую характеристику $V'_{зАд} = f(V_{зАд})$, обеспечивающую результирующий коэффициент усиления контура регулирования равный 1. На рис. 1.9 в качестве примера приведены упомянутые характеристики для ДСП-180 ПАО «ММК». В свою очередь, нелинейная характеристика электрического контура отражает зависимость $Z_{фАКТ} = f(L_д)$. Нелинейность в данном случае обусловлена физическими свойствами электрической дуги. При этом подход к линеаризации аналогичен. Примеры данных характеристик для ДСП-180 приведены на рис.1.10. Отметим, что форма данных характеристик является уникальной для каждого сочетания $N_{ТР}$ и $N_{РК}$ [1.14-1.16]. С учётом вышеизложенного, функциональная схема нелинейного адаптивного П-регулятора импеданса будет иметь вид, представленный на рис.1.11.

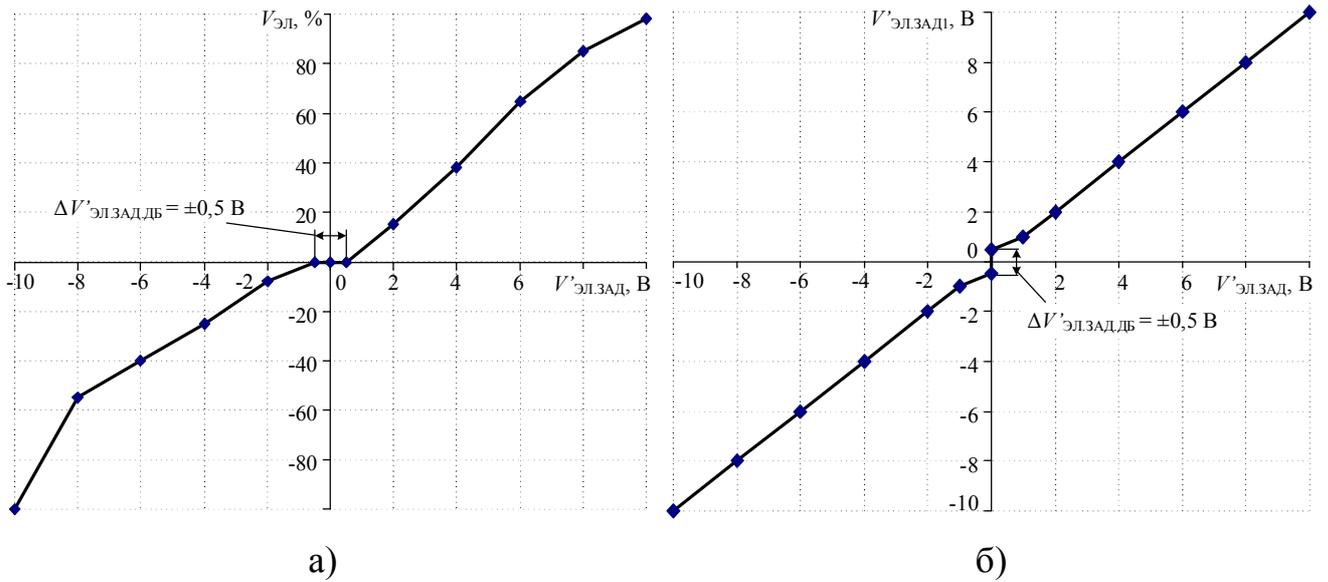


Рис. 1.9 Результирующая регулировочная характеристика гидропривода перемещения электродов ДСП-180 (а) и характеристика блока компенсации нелинейности гидропривода перемещения электродов ДСП-180 (б)

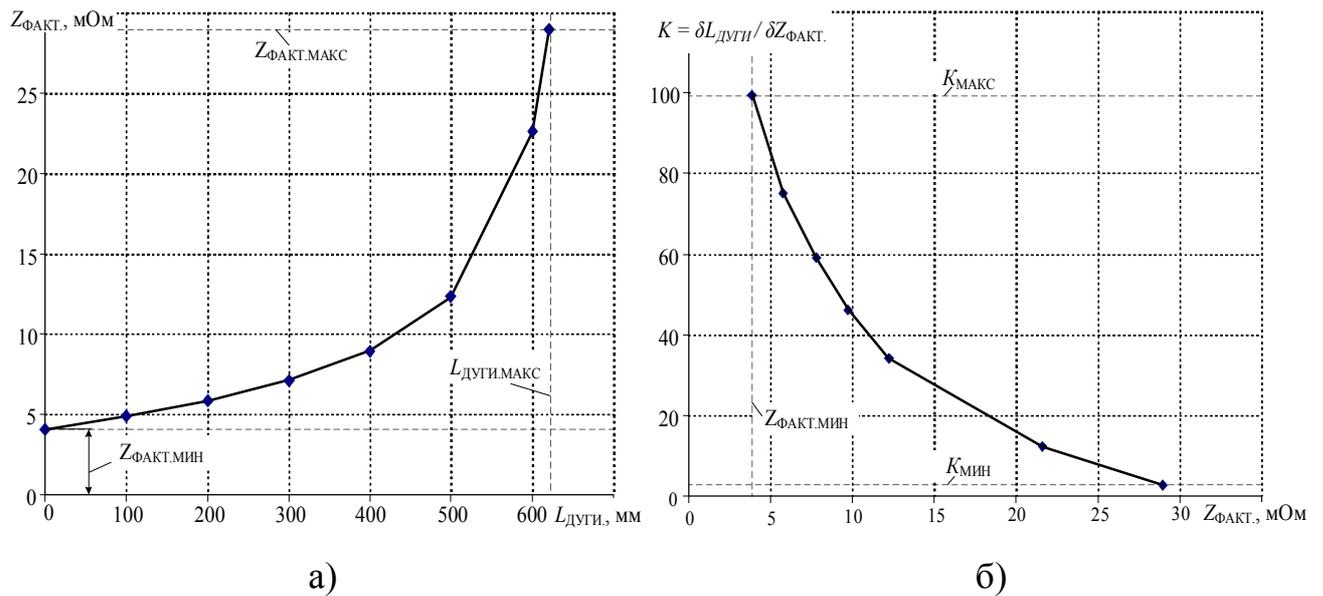


Рис. 1.10. Нелинейная характеристика электрического контура ДСП-180 (а) и линейризирующая характеристика электрического контура ДСП-180 (б)

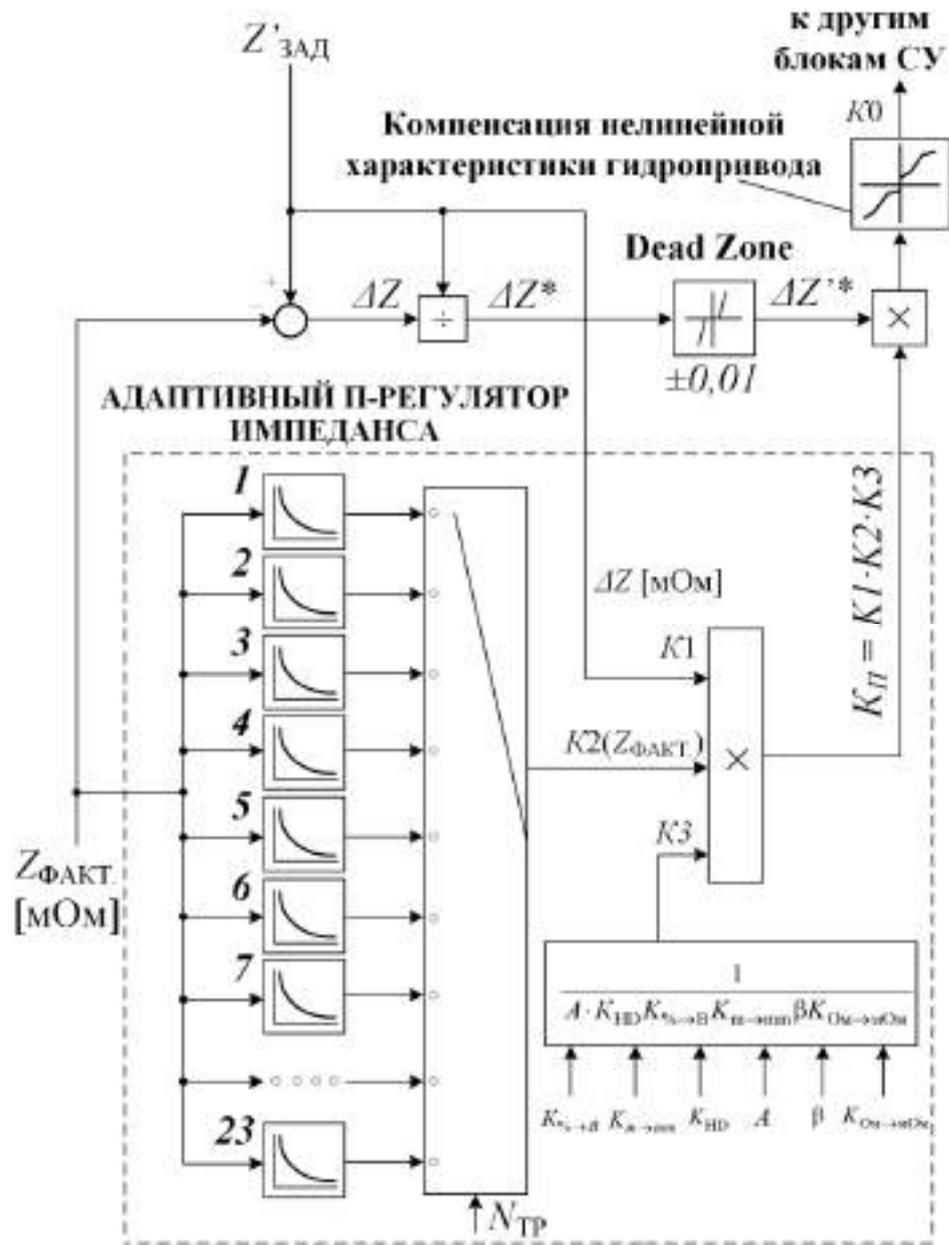


Рис. 1.11. Функциональная схема нелинейного адаптивного П-регулятора импеданса

В данном случае, результирующий коэффициент усиления формируется из следующих составляющих: 1) K_0 – коэффициент нелинейной обратной характеристики сервоклапана; 2) K_1 – коэффициент, учитывающий приведение сигнала ошибки к безразмерной величине; 3) K_2 – коэффициент нелинейной обратной характеристики электрического контура; 4) K_3 – коэффициент, учитывающий свойства гидропривода, блоков приведения единиц измерения, градиента напряжения

дугевого столба, некомпенсируемых постоянных времени и подстроечный коэффициент, с помощью которого регулируется быстродействие контура.

Применение нелинейного адаптивного регулятора позволяет достигнуть настройки контура регулирования на технический оптимум во всём диапазоне рабочих длин дуг, чего затруднительно достигнуть в существующих системах управления [1.20-1.28]. Данный эффект наглядно продемонстрирован с помощью осциллограмм, отражающих реакцию системы с классическим (рис.1.12.а) и новым (рис.1.12.б) регулятором на ступенчатое изменение сигнала задания полного импеданса фазы. При использовании разработанного адаптивного регулятора видно, что оптимальные качественные характеристики сохраняются независимо от положения рабочей точки на электрической характеристике. Результаты сравнения динамических характеристик регуляторов импеданса двух типов представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Сравнение динамических показателей регулирования классического регулятора и адаптивного регулятора импеданса

| Динамические показатели регулирования | Тип регулятора импеданса | | | | | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Классический регулятор | | | | | Адаптивный регулятор | | | | |
| | $Z_{\text{Зад.1}}$ | $Z_{\text{Зад.2}}$ | $Z_{\text{Зад.3}}$ | $Z_{\text{Зад.4}}$ | $Z_{\text{Зад.5}}$ | $Z_{\text{Зад.1}}$ | $Z_{\text{Зад.2}}$ | $Z_{\text{Зад.3}}$ | $Z_{\text{Зад.4}}$ | $Z_{\text{Зад.5}}$ |
| 1. Время регулирования $t_{\text{РЕГ}}$ [сек] | 3,0 | 3,3 | 4,6 | 7,5 | неустойчивый | 3,0 | 2,5 | 3,0 | 2,9 | 2,3 |
| 2. Время нарастания $t_{\text{НАР}}$ [сек] | 0,91 | 0,90 | 0,80 | 0,70 | 0,50 | - | - | 3,6 | 3,4 | 2,6 |
| 3. Перерегулирование σ [%] | 30,0 | 24,3 | 28,0 | 32,4 | неустойчивый | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,5 | 1,0 |

Таким образом, применение адаптивного нелинейного П-регулятора импеданса позволяет достигнуть настройки контура регулирования на технический оптимум на всём диапазоне рабочих длин дуг, что не представляется возможным при применении регуляторов, применяемых в существующих системах управления электрическим режимом.

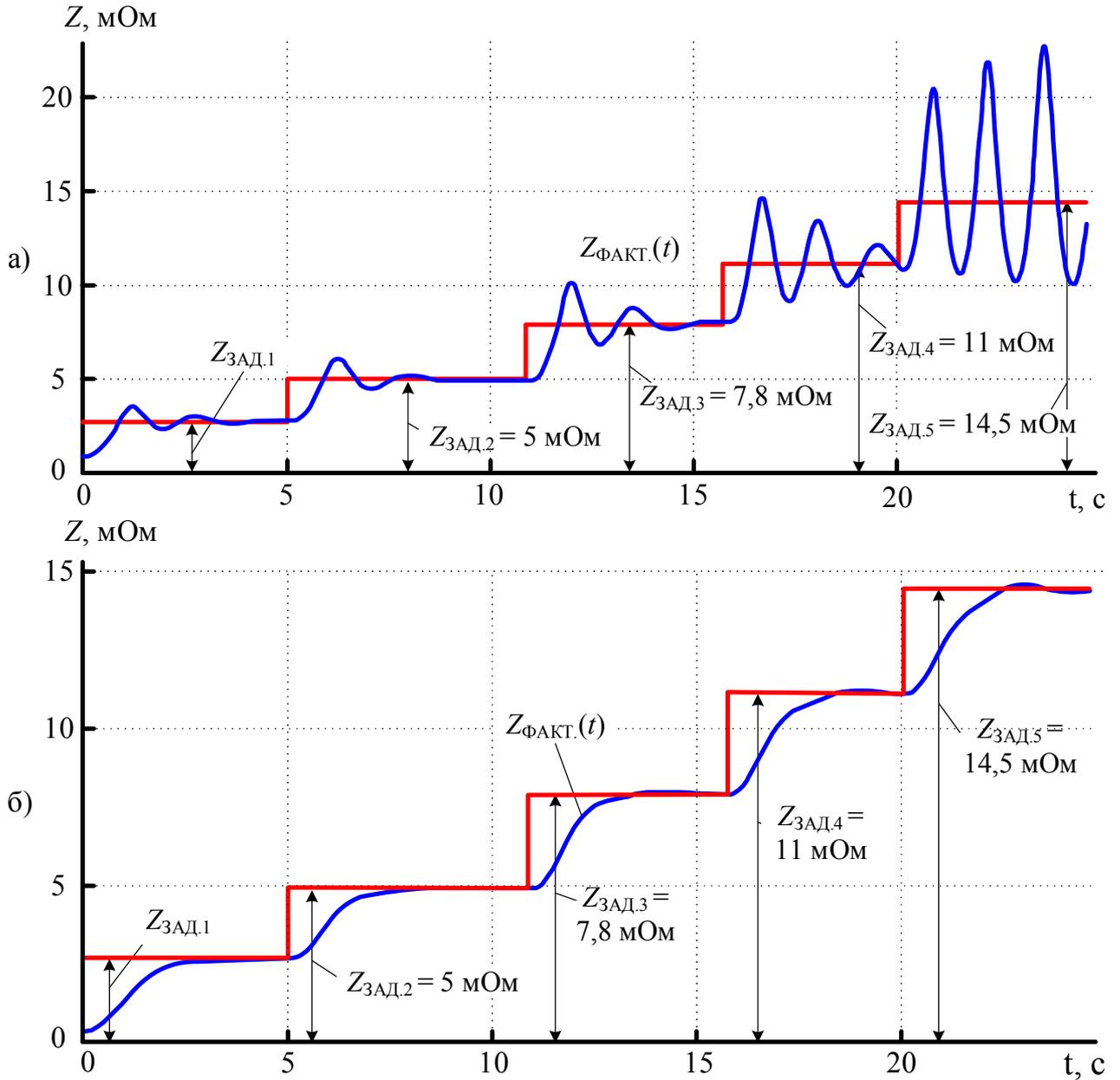


Рис. 1.12. Переходные процессы $Z_{\text{ФАКТ.}}$: а) при использовании классического регулятора; б) при использовании разработанного адаптивного регулятора импеданса

1.3. Разработка усовершенствованных алгоритмов диагностики стадий плавки и автоматического управления электрическими режимами электродуговых печей с использованием информации о гармоническом составе токов и напряжений электрических дуг

Помимо недостатков, связанных с системой управления гидроприводом перемещения электродов, или системой управления первого уровня, подавляющее большинство современных систем обладают недостатками в структуре систем управления второго уровня. На втором уровне в соответствии с профилем плавки формируется задание ступени печного трансформатора N_{TP} , реактора N_P (при наличии) и номера рабочей кривой N_{PK} . При этом в случае с ДСП критерием перехода с одной стадии плавки на другую в подавляющем большинстве случаев является показатель удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$. Сочетание N_{TP} и N_P определяет форму электрической характеристики, отражающей зависимость мощности электрической дуги P_D от длины дуги L_D , тем самым позволяя регулировать объём электрической энергии, вводимой в печь. В свою очередь, параметр N_{PK} отвечает за текущий набор уставок параметра регулирования, определяя рабочую точку на электрической характеристике $P_D=f(L_D)$ и обеспечивая её поддержание за счёт управления гидравлическим приводом перемещения электродов системой управления 1 уровня [1.26-1.27].

Типовой профиль плавки в современной системе управления электрическим режимом ДСП и УКП представлен в таблице 1.3, а пример работы системы управления по данному профилю приведен на рис. 1.13. Основным недостатком применения величины $W_{уд}$ для управления электрическим режимом работы ДСП является отсутствие связи с реальными технологическими процессами, протекающими внутри ванны печи. Одна и та же величина $W_{уд}$ для разных плавки может соответствовать абсолютно различным состояниям расплава, поскольку существенное влияние в данном случае оказывает состав завалки, исходное распределение шихты в ванне печи и другие факторы. В связи с этим, возникает задача поиска и применения альтернативного параметра для диагностики стадии плавления шихты в ДСП и оценки стабильности процесса нагрева в УКП.

Унифицированная система профиля плавки в современных системах управления
электрическим режимом ДСП

| Шаг | Параметр | N_{TP} | N_P | N_{PK} |
|-----|--------------|-----------|----------|-----------|
| 1 | $W_{уд.кР1}$ | N_{TP1} | N_{P1} | N_{PK1} |
| 2 | $W_{уд.кР2}$ | N_{TP2} | N_{P2} | N_{PK2} |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| n | $W_{уд.кРn}$ | N_{TPn} | N_{Pn} | N_{PKn} |

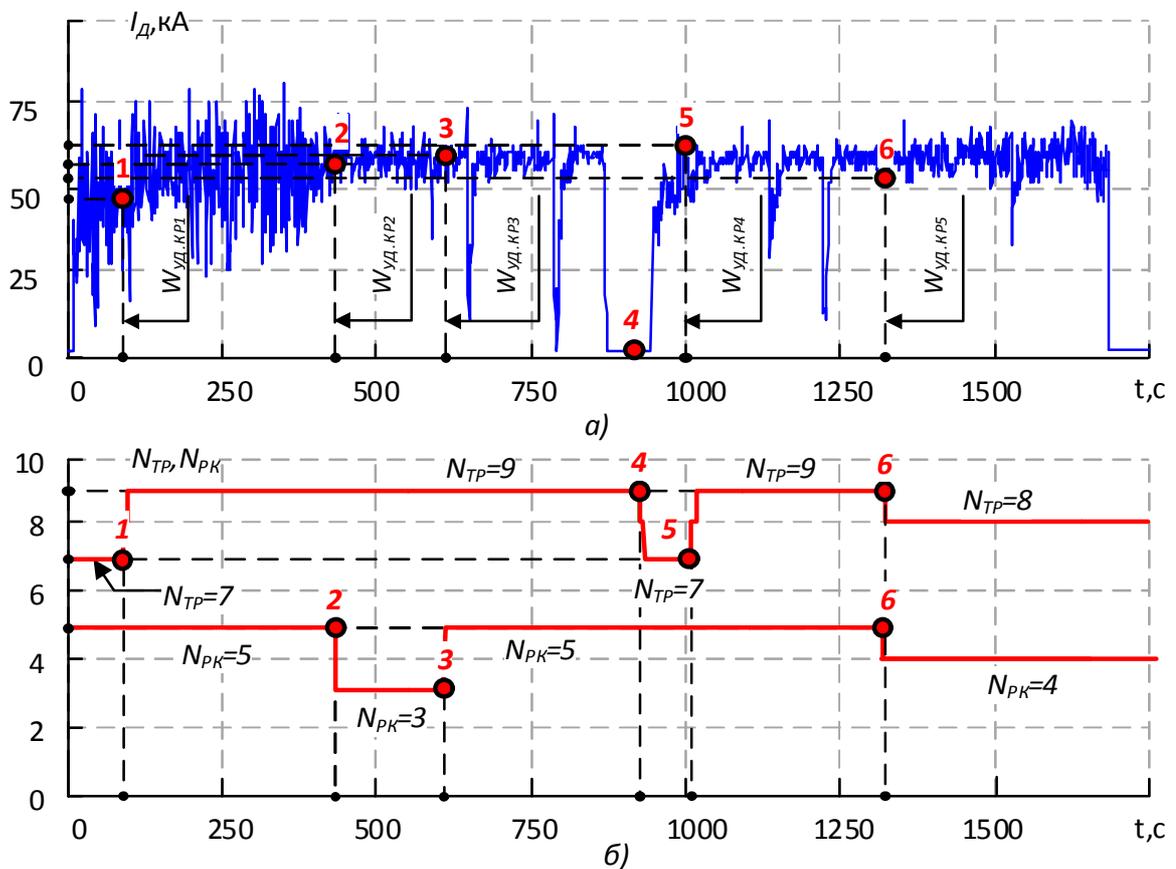


Рис. 1.13. Осциллограммы а) тока электрической дуги I_d ; б) ступени печного трансформатора N_{TP} и номера рабочей кривой N_{PK} , отображающие работу системы управления электрическим режимом с профилем плавки по удельному энергопотреблению $W_{уд}$

В связи с этим, для управления электрическим режимом ДСП и УКП предлагается использовать альтернативные методы, такие как:

1) Управление электрическим режимом с использованием параметра THD_I или тождественного параметра коэффициента шлака по току дуги, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_D^2 - I_{(1)}^2 - I_{(0)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% = \frac{I_{вг.}}{I_{(1)}} \cdot 100\% \quad (1.7)$$

$$K_{ШЛАК_I} = \frac{A}{THD_I}, \quad (1.8)$$

где I_D - действующее (среднеквадратическое) значение тока дуги; $I_{(1)}$ - действующее значение 1-ой гармоники тока дуги; $I_{(0)}$ - постоянная составляющая тока дуги; $I_{вг.}$ - действующее значение высших гармоник тока дуги, A - масштабный коэффициент.

2) Управление электрическим режимом с использованием параметра THD_U или тождественного параметра коэффициента шлака по напряжению, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$THD_U = \frac{\sqrt{U_D^2 - U_{(1)}^2 - U_{(0)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100\% = \frac{U_{вг.}}{U_{(1)}} \cdot 100\% \quad (1.9)$$

$$K_{ШЛАК_U} = \frac{A}{THD_U}, \quad (1.10)$$

где U_D - действующее (среднеквадратическое) значение тока дуги; $U_{(1)}$ - действующее значение 1-ой гармоники напряжения дуги; $U_{(0)}$ - постоянная составляющая напряжения дуги; $U_{вг.}$ - действующее значение высших гармоник напряжения дуги.

3) Управление электрическим режимом с использованием отдельного анализа относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник тока дуги, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$I'_{вг.ч.н.г.} = \frac{\sqrt{I_{Д(0)}^2 + I_{Д(2)}^2 + I_{Д(4)}^2 + I_{Д(6)}^2 + I_{Д(8)}^2 + I_{Д(10)}^2}}{I_H} \cdot 100\% \quad (1.11)$$

где $I_{Д(2)}$, $I_{Д(4)}$, $I_{Д(6)}$, $I_{Д(8)}$, $I_{Д(10)}$ - действующие значения 2,4,6,8,10 гармоник ДСП соответственно; I_H - номинальный ток печного трансформатора ДСП.

$$I'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma} = \frac{\sqrt{I_{\text{Д}(3)}^2 + I_{\text{Д}(5)}^2 + I_{\text{Д}(7)}^2 + I_{\text{Д}(9)}^2}}{I_H} \cdot 100\% \quad (1.12)$$

где $I_{\text{Д}(3)}$, $I_{\text{Д}(5)}$, $I_{\text{Д}(7)}$, $I_{\text{Д}(9)}$ – действующие значения 3,5,7,9 гармоник ДСП соответственно. I_H – номинальный ток печного трансформатора ДСП.

4) Управление электрическим режимом с использованием отдельного анализа относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник тока дуги, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$U'_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma} = \frac{\sqrt{U_{\text{Д}(0)}^2 + U_{\text{Д}(2)}^2 + U_{\text{Д}(4)}^2 + U_{\text{Д}(6)}^2 + U_{\text{Д}(8)}^2 + U_{\text{Д}(10)}^2}}{U_{2\text{ФН}}} \cdot 100\% \quad (1.13)$$

где $U_{\text{Д}(2)}$, $U_{\text{Д}(4)}$, $U_{\text{Д}(6)}$, $U_{\text{Д}(8)}$, $U_{\text{Д}(10)}$ – действующие значения 2,4,6,8,10 гармоник ДСП соответственно; $U_{2\text{ФН}}$ – номинальное фазное напряжение на вторичной стороне печного трансформатора ДСП.

$$U'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma} = \frac{\sqrt{U_{\text{Д}(3)}^2 + U_{\text{Д}(5)}^2 + U_{\text{Д}(7)}^2 + U_{\text{Д}(9)}^2}}{U_{2\text{ФН}}} \cdot 100\% \quad (1.14)$$

где $U_{\text{Д}(3)}$, $U_{\text{Д}(5)}$, $U_{\text{Д}(7)}$, $U_{\text{Д}(9)}$ – действующие значения 3, 5, 7, 9 гармоник ДСП соответственно; $U_{2\text{ФН}}$ – номинальное фазное напряжение на вторичной стороне печного трансформатора ДСП.

Рассмотрим каждый из представленных подходов более подробно. Впервые техническое решение по использованию гармонического состава тока электрической дуги для диагностики стадии плавления шихты было реализовано в модуле Foaming Slag Manager (FSM), разработанном фирмой Siemens VAI. В данном модуле использовался параметр $K_{\text{ШЛАК}I}$ для оценки уровня вспененного шлака на поздних стадиях плавления. В рамках данной работы, было предложено использовать параметр THD_I для диагностики стадии плавления шихты на протяжении всего технологического цикла. В основе данного подхода лежит явление уменьшения доли высших гармоник в составе сигнала тока электрической дуги по мере расплавления твёрдой шихты, образования жидкой фазы и экранирования дуг вспененным шлаком. Наглядная демонстрация сути данного явления приведена на рис. 1.14. Так, величина THD_I на начальной стадии плавки при наиболее значи-

тельной степени искажения сигнала мгновенного значения тока электрической дуги составляет 34.51%, на стадии активного расплавления и проплавления колдцев – 14.38%, а на стадии доводки – 6.53% [1.26].

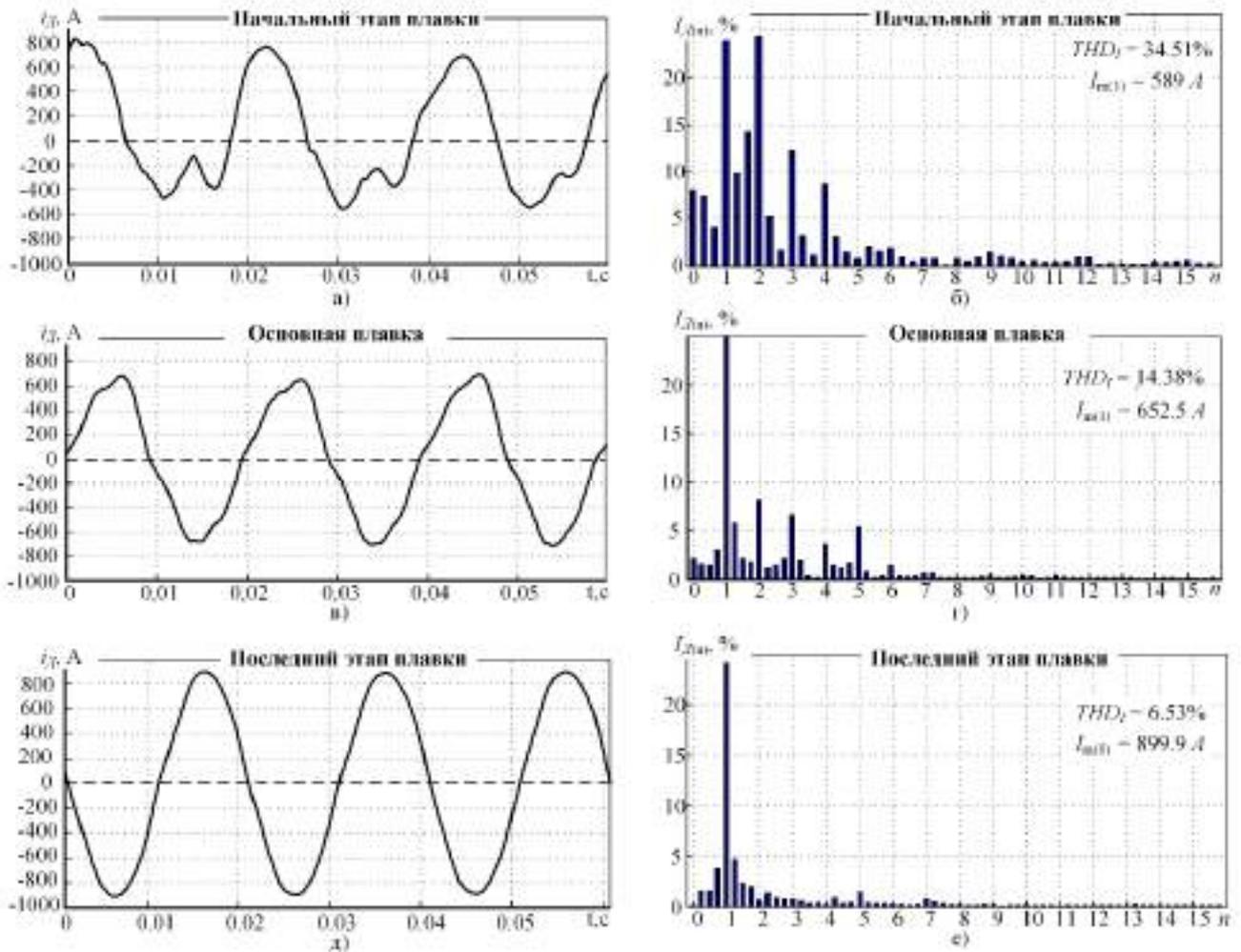


Рис. 1.14. Влияние стадии плавления шихты на уровень высших гармоник в составе сигнала тока электрической дуги

Тем не менее, при использовании данного способа на практике возникает проблема, связанная с сильной зависимостью параметра THD_I от колебаний длины электрической дуги L_D и несимметричных режимов работы печи. Это приводит к необходимости применения фильтров, скользящей средней с большой постоянной времени и потере информации о непродолжительных технологических стадиях.

В качестве решения проблемы зависимости сигнала THD_I от длины дуги и несимметричных режимов возможно использовать сигнал THD_U аналогичным образом. С использованием математической модели, была проведена оценка зависимости параметров THD_I и THD_U от длины электрической дуги L_D , коэффициента несимметрии токов K_{2I} и тепловой постоянной времени дуги θ_D .

Отметим, что тепловая постоянная времени дуги θ_D является одним из ключевых параметров, позволяющим судить о текущей стадии плавки в составе дифференциального уравнения мгновенной проводимости дуги (уравнения Касси):

$$\frac{\theta_D(t) \left(\frac{dg_D(t)}{dt} \right)}{dt} = \left(\frac{u_D^2(t)}{E_D^2(t)} - 1 \right) g_D(t) dt, \quad (1.15)$$

где $g_D(t)$ – мгновенное значение проводимости электрической дуги, $E_D(t)$ – противо-ЭДС электрической дуги, $u_D(t)$ – мгновенное значение напряжения дуги. Так, на начальной стадии плавки величина θ_D обычно лежит в диапазоне 500-800 мкс, на стадии активного расплавления – от 800 до 2500 мкс, и на конечных стадиях – от 2500 мкс до 6000 мкс.

В ходе выполнения оценки были получены статические характеристики $THD_I = f(L_D, \theta_D)$, $THD_U = f(L_D, \theta_D)$, $THD_U = f(L_D, K_{2I})$, $THD_U = f(L_D, K_{2I})$, представленные на рис. 1.15. Анализ статических характеристик показал, что параметр THD_U в значительно меньшей мере зависит от параметров L_D и K_{2I} при более выраженной зависимости от параметра θ_D по сравнению с THD_I [1.27]

Несмотря на очевидные преимущества, величину мгновенного значения напряжения дуги достаточно сложно измерить напрямую. Вследствие этого, необходимо прибегать к аппаратной реализации функциональной схемы, аналогичной представленной на рис. 1.16. В основе данной схемы лежит следующая система уравнений:

$$\begin{cases} u_{D1}(t) = u_{2\phi 1}(t) - i_{D1}(t)R_{KC1} - L_{KC1} \frac{di_{D1}(t)}{dt} + M_{21} \frac{di_{D2}(t)}{dt} - M_{31} \frac{di_{D3}(t)}{dt} \\ u_{D2}(t) = u_{2\phi 2}(t) - i_{D2}(t)R_{KC2} - L_{KC2} \frac{di_{D2}(t)}{dt} - M_{12} \frac{di_{D1}(t)}{dt} - M_{32} \frac{di_{D3}(t)}{dt} \\ u_{D3}(t) = u_{2\phi 3}(t) - i_{D3}(t)R_{KC3} - L_{KC3} \frac{di_{D3}(t)}{dt} + M_{13} \frac{di_{D1}(t)}{dt} + M_{23} \frac{di_{D2}(t)}{dt} \end{cases}, \quad (1.16)$$

где R_{KC1} , R_{KC2} , R_{KC3} – активное сопротивление участка короткой сети, L_{KC1} , L_{KC2} , L_{KC3} – индуктивное сопротивление участка короткой сети, $i_{Д1}(t)$, $i_{Д2}(t)$, $i_{Д3}(t)$ – мгновенные значения токов дуг, $u_{Д1}(t)$, $u_{Д2}(t)$, $u_{Д3}(t)$ – мгновенные значения напряжений дуг, $u_{2Ф1}(t)$, $u_{2Ф2}(t)$, $u_{2Ф3}(t)$ – мгновенные значения фазных напряжений, M_{12} , M_{21} , M_{23} , M_{32} , M_{13} , M_{31} – взаимные индуктивности между фазами печи.

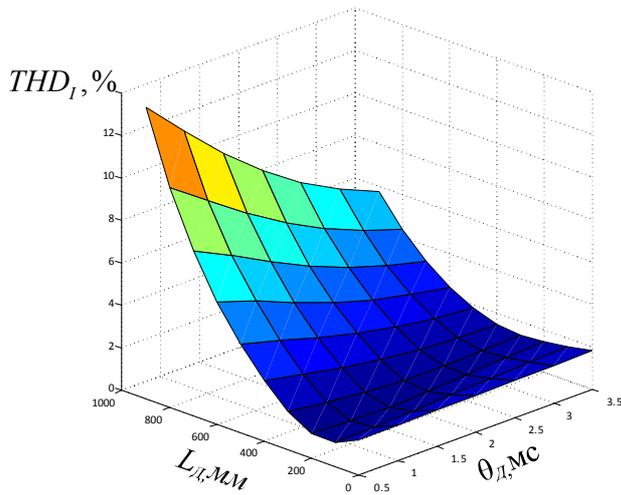
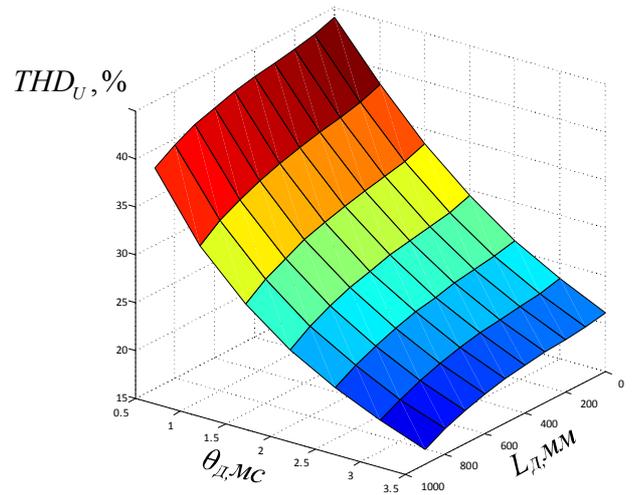
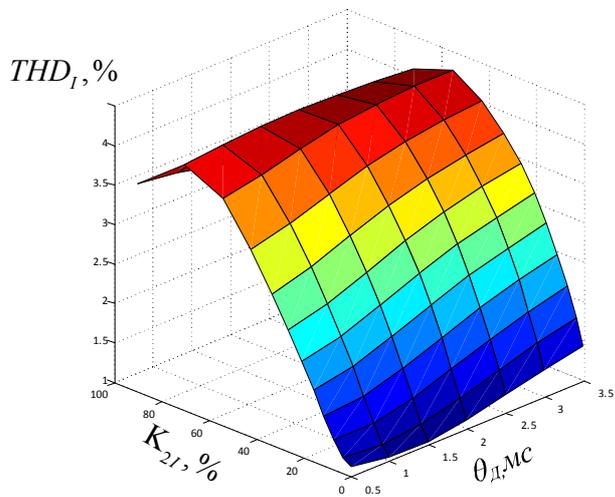
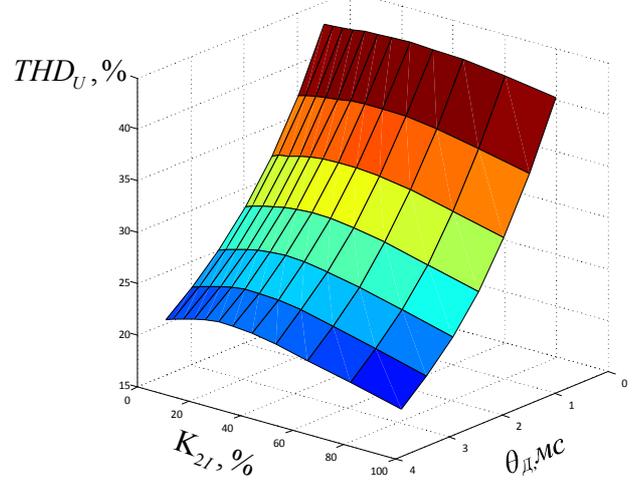
а) $L_{Д2,3}=200$ ммб) $L_{Д2,3}=200$ ммв) $L_{Д2}=200$ мм; $L_{Д3}=200\div 1000$ ммг) $L_{Д2}=200$ мм; $L_{Д3}=200\div 1000$ мм

Рис. 1.15. Статические характеристики, отражающие преимущества использования параметра THD_U по сравнению с параметром THD_I для решения задач диагностики стадии плавления шихты

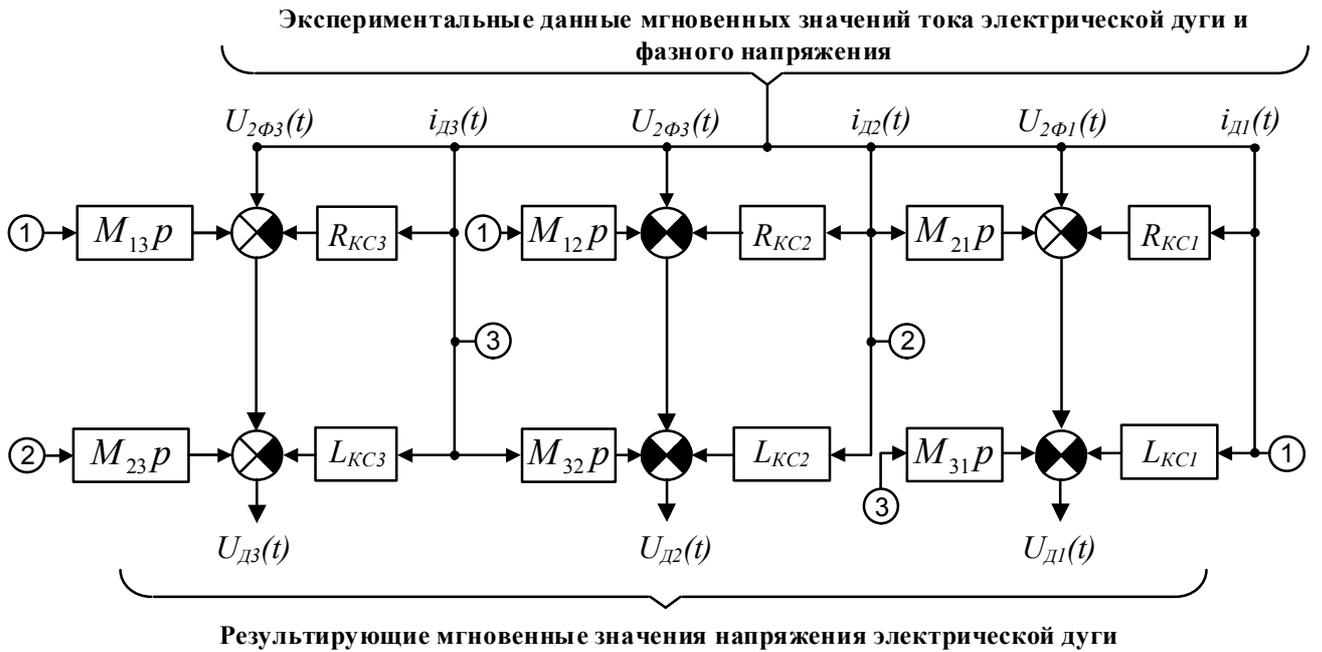


Рис. 1.16. Функциональная схема расчёта действующих значений напряжений электрических дуг на основе экспериментальных данных по замеру токов электрических дуг и фазных напряжений на примере ШП-125

В качестве развития идеи применения параметра THD_d , предлагается применять для диагностики стадии шихты относительные действующие значения чётных и нечётных гармоник тока дуги $I'_{ВГ.ЧЕТ.С}$ и $I'_{ВГ.НЕЧЕТ.С}$. В основе данного принципа лежит утверждение о том, что на уровень чётных гармоник в наибольшей мере зависит от величины коэффициента вентильного эффекта $K_{ВЭ}$, который по мере расплавления твёрдой шихты меняется в диапазоне от 1,2 до 1. Суть явления вентильного эффекта заключается в несимметрии полуволн сигнала мгновенного значения тока электрической дуг относительно оси абсцисс вследствие чередования анода и катода между концевым участком электрода и шихтой. Численное значение параметра $K_{ВЭ}$ может быть рассчитано по следующей формуле:

$$K_{ВЭ} = I_{д.m(+)} / I_{д.m(-)}, \quad (1.17)$$

где $I_{д.m(+)}$ – амплитудное значение положительной полуволны сигнала мгновенного значения сигнала тока дуги, $I_{д.m(-)}$ – амплитудное значение отрицательной полуволны сигнала мгновенного значения сигнала тока дуги. В свою очередь, на уровень нечётных гармоник в наибольшей мере влияет величина θ_d . Данные утверждения находят своё отражение в темпе снижения уровня чётных и нечётных

гармоник в начале плавки, что наглядно продемонстрировано с помощью рисунка 1.17 на примере печи шахтного типа ШП-125. Ввиду того, что коэффициент вентиляющего эффекта $K_{BЭ}$ меняется от максимального до минимального значения по факту полного проплавления шихты и образования жидкой фазы, а величина θ_D – по мере полного экранирования дуг вспененным шлаком, темп снижения доли чётных гармоник в составе сигнала тока дуги приблизительно в 4 раза выше по сравнению с темпом снижения доли нечётных гармоник.

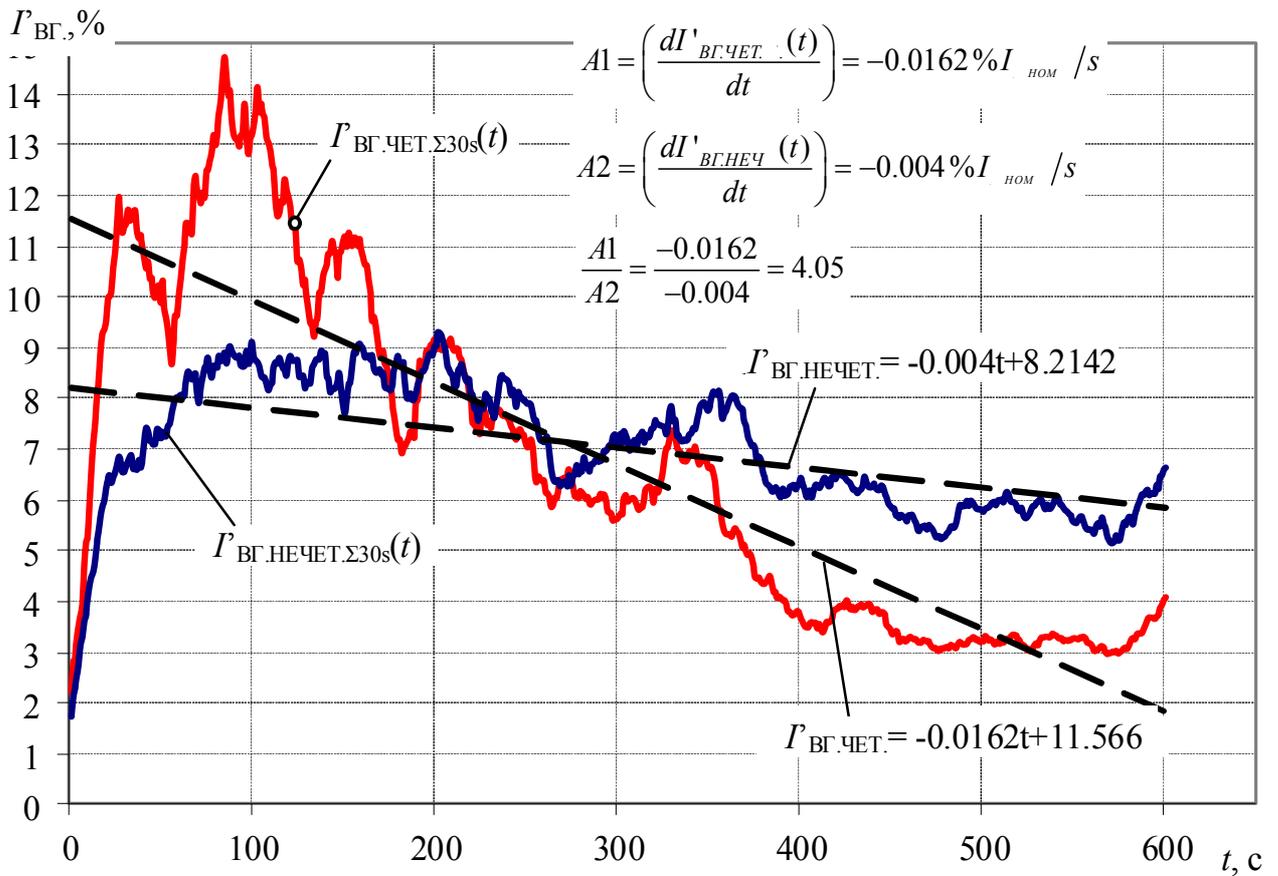


Рис. 1.17. Сравнительный анализ скоростей изменения относительных действующих значений токов четных и нечетных гармоник шахтной печи на начальной стадии расплавления шихты (первые 10 минут работы под током)

Отметим, что основной недостаток при отдельном анализе чётных и нечётных гармоник аналогичен случаю применения THD_I и связан с сильной зависимостью параметров $I'_{ВГ.ЧЕТ.Σ}$ и $I'_{ВГ.НЕЧЕТ.Σ}$ от длины дуги и несимметричных режимов. Использование параметров $U'_{ВГ.ЧЕТ.Σ}$ и $U'_{ВГ.НЕЧЕТ.Σ}$ позволяет компенсировать дан-

ный недостаток, что было доказано с использованием реальных экспериментальных данных, а также с применением математической модели.

Применение отдельного анализа чётных и нечётных гармоник токов и напряжений дуг несколько сложнее в плане практической реализации. В случае с анализом чётных и нечётных гармоник токов дуг, необходима дополнительная реализация функциональной схемы, приведённой на рис. 1.18. В случае с анализом чётных и нечётных гармоник напряжений дуг, необходима как реализация функциональной схемы, представленной на рис. 1.16, так и функциональной схемы, представленной на рис. 1.18.

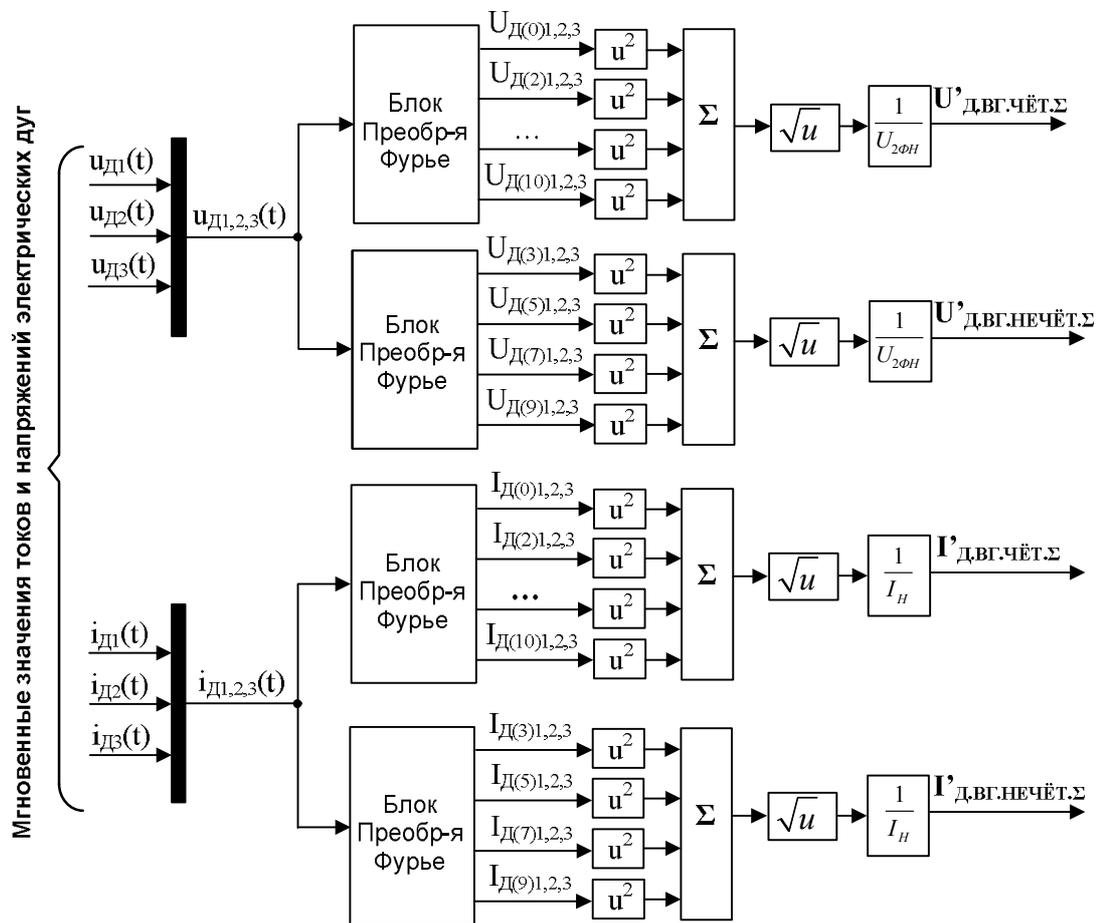


Рис. 1.18. Функциональная схема математической модели для расчёта относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник токов и напряжений дуг

Кроме того, профиль плавки при применении отдельного анализа чётных и нечётных гармоник отличается от классического и состоит из двух таблиц (табли-

цы 1.4-1.5). В одной таблице, которая используется на начальном этапе плавки, указаны значения $I'_{ВГ.ЧЕТ.КР}$ ($U'_{ВГ.ЧЕТ.КР}$), при достижении которых осуществляется переход на другое сочетание $N_{ТР}$, N_P и $N_{ПК}$. Вторая таблица по своей структуре аналогична первой, но в ней указаны значения $I'_{ВГ.НЕЧЕТ.КР}$ ($U'_{ВГ.НЕЧЕТ.КР}$), и она используется на более поздних стадиях плавления [1.29-1.31].

Таблица 1.4

Структура нового профиля плавки на начальных этапах

| Шаг | Параметр | $N_{ТР}$ | N_P | $N_{ПК}$ |
|-----|--|-----------|----------|-----------|
| 1 | $I'_{ВГ.ЧЕТ.КР1}$ ($U'_{ВГ.ЧЕТ.КР1}$) | $N_{ТР1}$ | N_{P1} | $N_{ПК1}$ |
| 2 | $I'_{ВГ.ЧЕТ.КР2}$ ($U'_{ВГ.ЧЕТ.КР2}$) | $N_{ТР2}$ | N_{P2} | $N_{ПК2}$ |
| 3 | $I'_{ВГ.ЧЕТ.КР3}$ ($U'_{ВГ.ЧЕТ.КР3}$) | $N_{ТР3}$ | N_{P3} | $N_{ПК3}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| n | $I'_{ВГ.ЧЕТ.КРn}$ ($U'_{ВГ.ЧЕТ.КРn}$) | $N_{ТРn}$ | N_{Pn} | $N_{ПКn}$ |

Таблица 1.5

Структура нового профиля плавки на поздних этапах

| Шаг | Параметр | $N_{ТР}$ | N_P | $N_{ПК}$ |
|-----|--|-----------|----------|-----------|
| 1 | $I'_{ВГ.НЕЧЕТ.КР1}$ ($U'_{ВГ.НЕЧЕТ.КР1}$) | $N_{ТР1}$ | N_{P1} | $N_{ПК1}$ |
| 2 | $I'_{ВГ.НЕЧЕТ.КР2}$ ($U'_{ВГ.НЕЧЕТ.КР2}$) | $N_{ТР2}$ | N_{P2} | $N_{ПК2}$ |
| 3 | $I'_{ВГ.НЕЧЕТ.КР3}$ ($U'_{ВГ.НЕЧЕТ.КР3}$) | $N_{ТР3}$ | N_{P3} | $N_{ПК3}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| n | $I'_{ВГ.НЕЧЕТ.КРn}$ ($U'_{ВГ.НЕЧЕТ.КРn}$) | $N_{ТРn}$ | N_{Pn} | $N_{ПКn}$ |

По результатам анализа, была сформирована таблица 1.6, в которой отражены все основные преимущества и недостатки различных способов диагностики

стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений дуг. Отметим, что в настоящее время в современной промышленности наиболее широкое распространение получили следующие классы печных установок: 1) ДСП с классической завалкой металлошихты через отводимый свод (рис. 1.19 а); 2) ДСП шахтного типа с применением технологии предварительного подогрева металлошихты отводимыми газами (рис. 1.19 б); 3) ДСП с технологией непрерывной подачи металлошихты конвейером (рис. 1.19 в); 4) однопозиционные и двухпозиционные УКП (рис. 1.19 г).



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.19. Общий вид наиболее широко распространённых классов печных установок: а) ДСП с классической технологией завалки металлошихты через отводимый свод; б) ДСП шахтного типа с технологией предварительного подогрева металлошихты отводимыми газами; в) ДСП с технологией непрерывной подачи металлошихты конвейером; г) однопозиционная установка ковш-печь

Таким образом, для печной установки каждого класса был проведён подробный анализ технологического процесса, а также сформированы рекомендации по применению того или иного способа диагностики стадии плавления шихты с учётом особенностей каждого способа, отраженных в таблице 1.6.

В ДСП с классической завалкой металлошихты через отводимый свод, а также в ДСП шахтного типа имеют место сильные несимметричные режимы, а также значительные колебания длины электрической дуги на начальных стадиях. Кроме того, в обоих случаях есть необходимость определения технологических стадий как при расплавлении твёрдой шихты, так и на стадии доводки при горении дуг на жидкую ванну. Вследствие этого, наиболее предпочтительным вариантом является применение отдельного анализа относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник напряжений дуги. При этом для печей, в которых изначальная загрузка производится в пропорции 30% лома и 70% жидкого чугуна, допустимо также применять отдельный анализ относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник напряжений дуги.

Для печей с технологией непрерывной подвалки шихты конвейером, а также установок ковш-печь, не характерны сильные несимметричные режимы, а также сильные колебания длин дуг, поскольку дуги всегда горят на жидкую ванну. Вследствие этого, наиболее предпочтительным является применение параметра THD_I . Исключение могут составлять режимы с высокой интенсивностью продувки расплава инертным газом, провоцирующим всплески на поверхности расплава. В этом случае, может быть целесообразен переход на более стабильный параметр THD_U .

С учётом вышеизложенного, в таблице 1.7 сведены общие рекомендации о применимости того или иного способа диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений электрических дуг. Данные рекомендации имеют большую практическую ценность, поскольку тенденция внедрения описываемых в рамках данного исследования технических решений находится на начальном этапе своего развития.

Сравнительная таблица основных преимуществ и недостатков различных способов диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений дуг

| Критерий для диагностики стадии плавки | Основные достоинства | Основные недостатки |
|--|--|---|
| THD_I ($K_{\text{ШЛАК},I}$) | <ul style="list-style-type: none"> ● Наиболее простой показатель с точки зрения расчёта на действующем технологическом оборудовании при высокой информативности с наличием определённых ограничений | <ul style="list-style-type: none"> ● Необходимость применения фильтров с большой постоянной времени при сильных несимметричных режимах и колебаниях длин дуг, что ведёт к потере информации о непродолжительных стадиях |
| THD_U ($K_{\text{ШЛАК},U}$) | <ul style="list-style-type: none"> ● Более высокая стабильность и информативность при сильных несимметричных режимах и колебаниях длин дуг по сравнению с THD_I | <ul style="list-style-type: none"> ● Необходимость выполнения расчёта сигнала мгновенного значения напряжения дуги на основе прямых измерений мгновенного значения тока дуги и фазного напряжения |
| $I'_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}$ $I'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}$ | <ul style="list-style-type: none"> ● Более высокая информативность по сравнению с THD_I, которая обеспечивается применением анализа чётных гармоник в начале плавки и нечётных гармоник на стадии доводки | <ul style="list-style-type: none"> ● Необходимость применения фильтров с большой постоянной времени при сильных несимметричных режимах и колебаниях длин дуг, что ведёт к потере информации о непродолжительных стадиях ● Необходимость выполнения расчёта мгновенных значений отдельных гармоник |
| $U'_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}$ $U'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}$ | <ul style="list-style-type: none"> ● Более высокая стабильность и информативность при сильных несимметричных режимах и колебаниях длин дуг по сравнению с $I'_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma}$ и $I'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma}$ | <ul style="list-style-type: none"> ● Необходимость выполнения расчёта сигнала мгновенного значения напряжения дуги на основе прямых измерений мгновенного значения тока дуги и фазного напряжения, а также расчёта мгновенных значений отдельных гармоник |

Рекомендации применения различных способов диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений дуг на печных агрегатах различного класса

| Критерий для диагностики стадии плавки | Классические ДСП с завалкой через отводимый свод | | ДСП шахтного типа | ДСП с непрерывной подвалкой шихты конвейером | Однопозиционные и двухпозиционные УКП |
|--|--|-------------|-------------------|--|---------------------------------------|
| | 100% лом | Лом + чугун | | | |
| THD_I ($K_{ШЛАК.I}$) | - | - | - | + | + |
| THD_U ($K_{ШЛАК.U}$) | - | - | - | + | + |
| $I'_{ВГ.ЧЕТ.Σ}$ $I'_{ВГ.НЕЧЕТ.Σ}$ | - | + | - | / | / |
| $U'_{ВГ.ЧЕТ.Σ}$ $U'_{ВГ.НЕЧЕТ.Σ}$ | + | + | + | / | / |

1.4. Реализация усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами электрических режимов ДСП и УКП на действующем оборудовании АСУ ТП электросталеплавильных агрегатов металлургических предприятий

Технические решения, разработанные в предыдущих разделах, были интегрированы в состав концепции новой, усовершенствованной системы управления электрическим режимом ДСП, функциональная схема которой представлена на рис.1.21. В составе данной системы применяются: 1) Универсальный алгоритм обработки токовых сигналов для различных типов измерительных устройств; 2) адаптивный нелинейный П-регулятор импеданса, обеспечивающий полную линейризацию электрического контура, а также гидропривода перемещения электродов; 3) система диагностики стадии плавки по высшим гармоникам токов (напряжений) дуг.

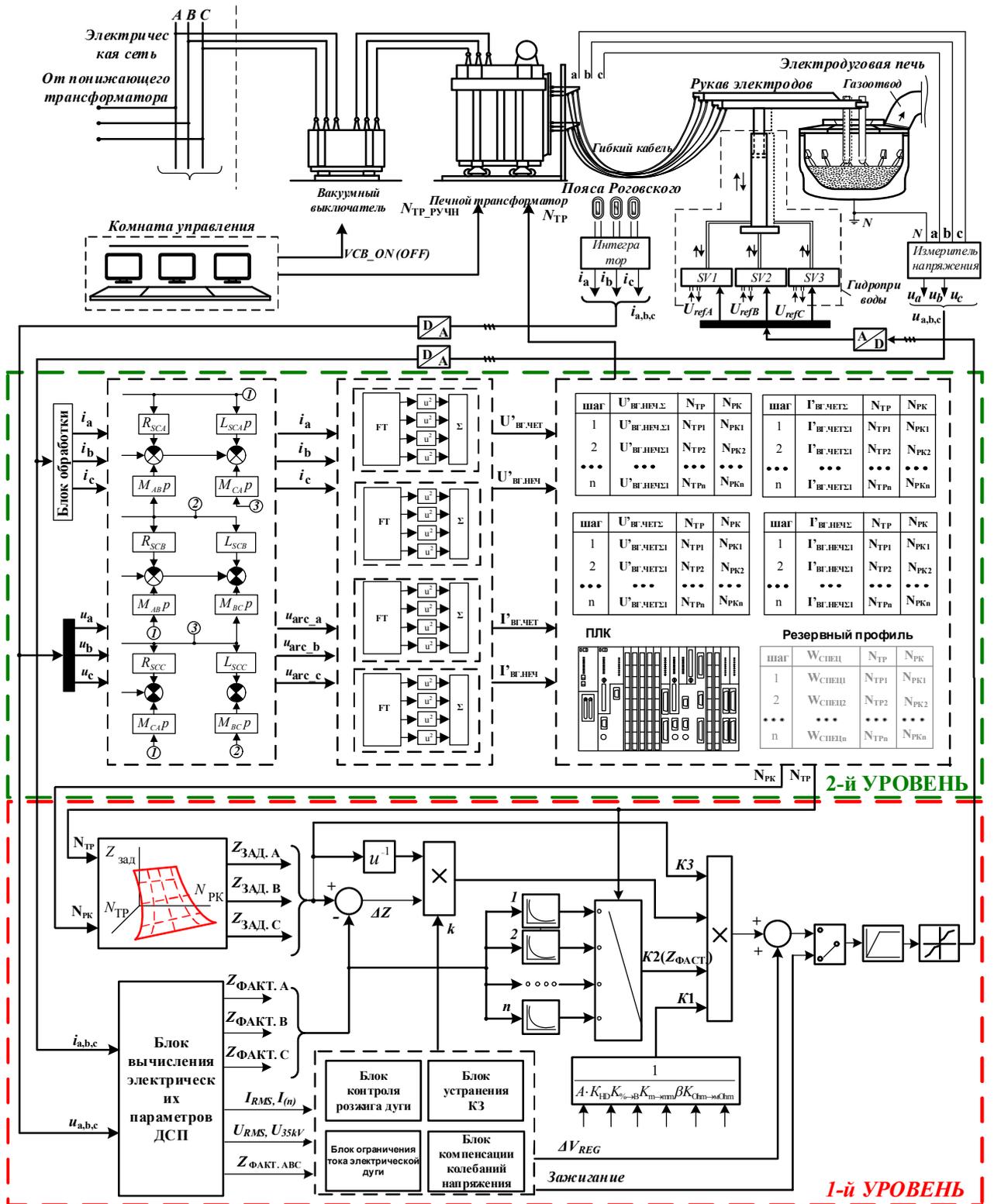


Рис. 1.20. Функциональная схема усовершенствованной системы управления электрическим режимом ДСП

Отметим, что в случае с УКП, а также в случае применения параметров THD_1 и THD_U , функциональная схема будет иметь аналогичную структуру, но при этом будут меняться алгоритмы управления, блоки расчёта, а также непосредственно

профиль плавки [1.32]. Рассмотрим более подробно результаты потенциального применения компонентов новой системы управления на практике.

1.4.1 Оценка эффективности работы адаптивного нелинейного П-регулятора импеданса на примере УКП

Система управления электрическим режимом с нелинейным адаптивным П-регулятором импеданса, получившая название «РАДУГА НПА ПК», была реализована как промышленный образец и коммерческий продукт, разработанный специалистами ФГБОУ ВО «МГТУ» на основе результатов научных исследований. Несмотря на то, что эффективность предлагаемого подхода была обоснована с использованием математического моделирования, вопрос оценки реального технического эффекта заслуживает отдельного рассмотрения и требует применения методов математической статистики [1.33-1.34].



Рис. 1.21. Промышленный образец системы управления электрическим режимом с нелинейным адаптивным П-регулятором импеданса

Статистический анализ эффективности работы новой системы управления на больших временных интервалах выявил ряд сложностей в объективной оценке электропотребления применительно к УКП из-за наличия большого количества факторов, влияющих на удельный расход электроэнергии агрегата. В ходе анализа было установлено, что наибольшее влияние на среднемесячный удельный расход

электроэнергии оказывает распределение времени циклов плавки, которое не является одинаковым. В соответствии с этим, для объективной оценки эффективности работы системы управления положением электродов необходимо обеспечить одинаковые технологические условия работы УКП.

В рамках анализа большого количества плавки соблюдение этих условий весьма затруднительно, поскольку сложно выделить два продолжительных интервала, у которых было бы одинаковым среднее время циклов плавки, идентичное соотношение выплавляемых марок стали, всегда идентичный вес жидкого металла, одинаковые режимы продувки аргоном, равное соотношение нагретых (оборотных) и холодных ковшей, одинаковая исходная температура жидкой стали перед началом обработки и т.д. В условиях, когда удельный расход электроэнергии может меняться от 20 кВт·ч/т (при цикле 25 мин.) до 80 кВт·ч/т (при цикле 200 мин.), показать эффект, вносимый новой системой, весьма затруднительно. Для получения более наглядной оценки эффективности усовершенствованной системы управления была разработана методика сравнительного анализа двух систем на небольших пятиминутных интервалах времени, расположенных последовательно друг за другом в рамках одной плавки.

Для обеспечения одинаковых условий горения дуг и свойств расплава, внутри тестовых периодов времени не использовалось добавление легирующих компонентов, т.е. выполнялся простой нагрев жидкой стали [1.14-1.16]. Мгновенный расход аргона в процессе нагрева поддерживался постоянным на уровне 1190 л/мин для того, чтобы обеспечить одинаковое перемешивание расплава (в процессе проведения эксперимента было зафиксировано небольшое отклонение фактического значения от заданного). Работа осуществлялась на одинаковых ступенях трансформатора (2 ступень) и одном и том же номере рабочей кривой (кривая №2). Перед началом измерений выполнялся непродолжительный нагрев длительностью 1,5 мин. для разжижения шлака. После каждого периода нагрева проводилось двойное измерение температуры расплава через 30 и 90 секунд после подъема электродов.

В качестве анализируемых параметров были выбраны: 1) коэффициент интенсивности нагрева $KИИ = P_{д} \cdot I_{д}$ [МВт·кА] – общепринятый показатель, косвен-

но характеризующий интенсивность нагрева металла; 2) величина нагрева жидкой стали $\Delta\theta = \theta_{\text{КОНЕЧ.}} - \theta_{\text{НАЧ.}}$ [°C]; 3) абсолютный и относительный расход электроэнергии за период нагрева ΔW [кВт·ч] и $\Delta W'$ [кВт·ч/°C]. Для коэффициента интенсивности нагрева определялись среднее значение за пятиминутный период $KИИ_{\text{СР}}$, стандартное отклонение $S(KИИ)$ и коэффициент вариации $K_V = S(KИИ)/KИИ_{\text{СР}}$, характеризующие стабильность работы систем управления. Результаты проведённого анализа сведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8

Оценка эффективности работы усовершенствованной системы управления

| Наименование параметра | | Тип системы управления | |
|------------------------------------|--|------------------------|----------------|
| | | ARCOS | Радуга НПА ПК |
| 1. $KИИ$ (за 5 мин.) | Среднее значение $KИИ_{\text{СР}}^1$, МВт·кА | 560 | 598 (+6,79%) |
| | Стандартное отклонение $S(KИИ)^2$, МВт·кА | 115,2 | 102,4 (-11,1%) |
| | Коэффициент вариации K_V^2 | 0,21 | 0,17 (-19,1%) |
| 2. Изменение температуры стали | Начальная температура $\theta_{\text{НАЧ.}}$, °C | 1563,0 | 1537,9 |
| | Конечная температура $\theta_{\text{КОНЕЧ.}}$, °C | 1585,1 | 1563,3 |
| | Величина нагрева $\Delta\theta^1$, °C | 22,1 | 25,4 (+14,9%) |
| 3. Расход электроэнергии за 5 мин. | Абсолютное значение ΔW , кВт·ч | 1457,0 | 1531,8 |
| | Относительное значение на 1 °C ΔW^2 , кВт·ч/°C | 65,93 | 60,31 (-8,5%) |

**Примечание: 1 – положительному эффекту соответствует большее значение параметра; 2 – положительному эффекту соответствует меньшее значение параметра.*

Необходимо отметить, что промышленный образец усовершенствованной системы управления обеспечит лучшее регулирование импеданса (рис. 1.22, а, б) и более быстрый процесс нагрева с меньшим значением удельного электропотребления (рис. 1.22, в,г). Снижение удельного расхода электроэнергии можно объяснить уменьшением амплитуды колебаний при перемещении электродов, и уменьшением дисперсии токов (рис. 1.22. а, б) [1.33-1.35]. На рис. 1.23 приведено сравнение линейных регрессионных моделей потребления электроэнергии УКП для систем «РАДУГА НПА ПК» и системы «ARCOS Light». Как видно из рисунка наклон линий тренда электропотребления у системы «ARCOS Light» выше, чем у

промышленного образца новой системы «РАДУГА НПА ПК», что свидетельствует о завышенном электропотреблении электроэнергии старой системой при одних и тех же значениях времени цикла. Технический эффект, выраженный в снижении удельного расхода электроэнергии, в данном случае составил 8,97%.

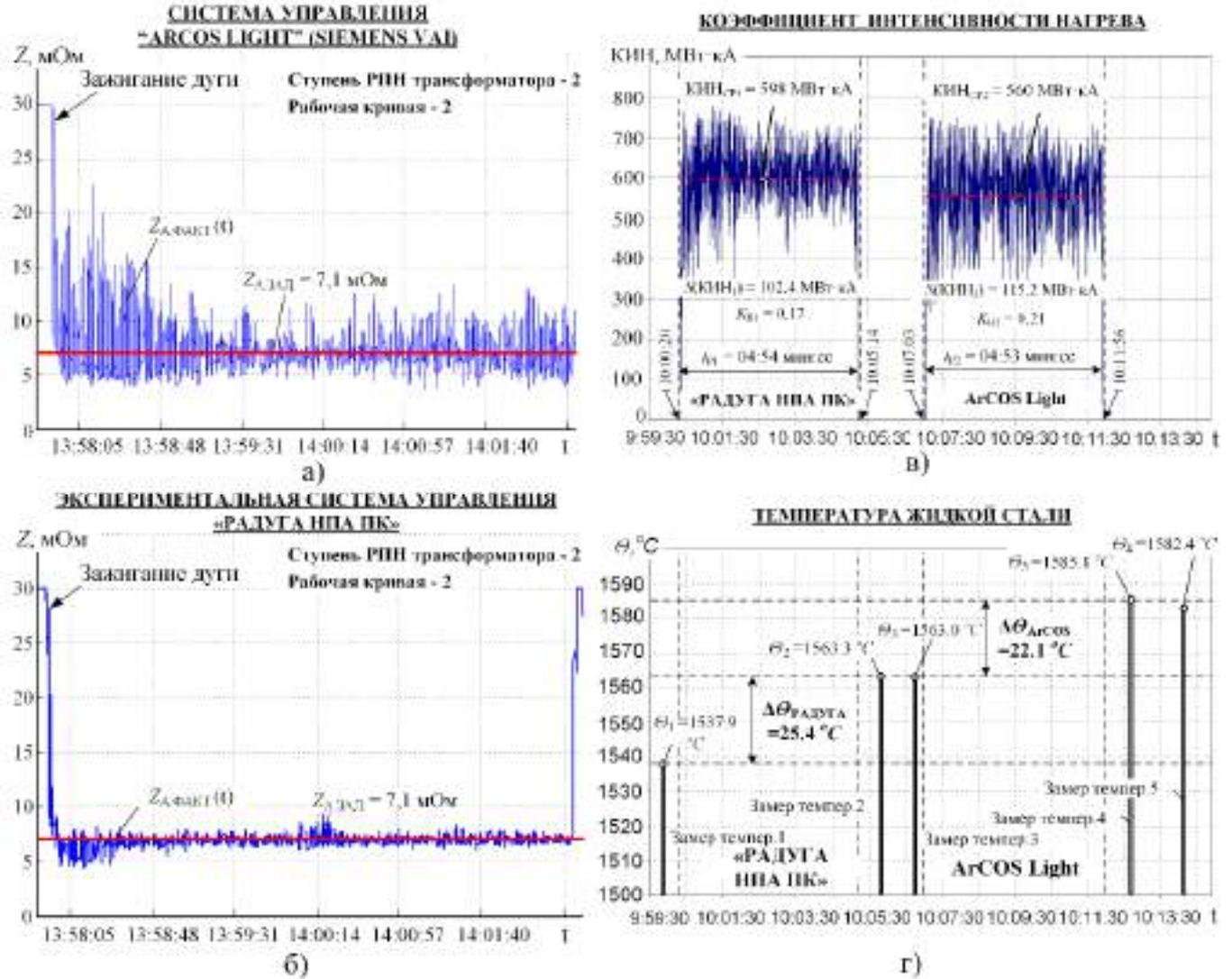


Рис. 1.22. Оценка эффективности работы усовершенствованной системы управления «РАДУГА НПА ПК» в реальных производственных условиях на УКП №1 180 т (25 МВА)

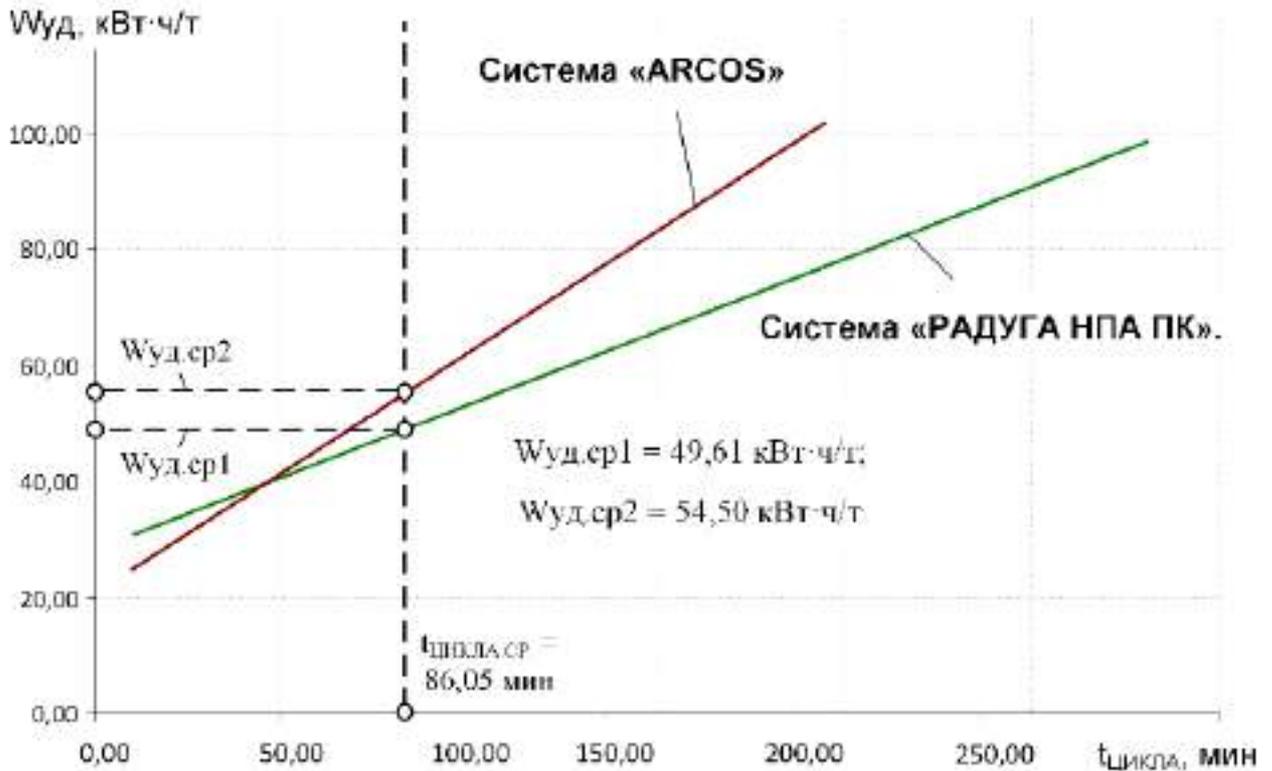


Рис. 1.23. Сравнительный анализ приведенного удельного расхода электроэнергии для двух систем управления «РАДУГА НПА ПК» и «ARCOS Light» при использовании одинакового среднемесячного значения цикла обработки металла

1.4.2 Оценка эффективности разработанной усовершенствованной системы управления электрическим режимом с применением информации о гармоническом составе напряжений дуг на примере ДСП шахтного типа.

Для новой системы управления электрическим режимом на дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125, был проведён анализ работы существующей системы, которая функционирует в соответствии со следующим алгоритмом:

- Точка 0.** Начало плавки, работа на пониженной ступени $N_{ТР}=7$, $N_{РК}=5$.
- Точка 1.** Переход на повышенную ступень $N_{ТР}=9$, $N_{РК}=5$ по критерию достижения величины удельного расхода электроэнергии $W_{уд1}$.
- Точка 2.** Переход на режим с пониженным излучением электрической дуги в фазе «2» при $N_{ТР}=9$, $N_{РК}=3$ по критерию достижения величины удельного расхода электроэнергии $W_{уд2}$.

-Точка 3. Возврат на сочетание $N_{ТР}=9$, $N_{РК}=5$ по критерию достижения величины удельного расхода электроэнергии $W_{уд3}$.

-Точка 4. Выполнена подвалка. Переход на пониженную ступень $N_{ТР}=7$, $N_{РК}=5$.

-Точка 5. После подвалки достигнуто граничное значение по удельному расходу электроэнергии $W_{уд4}$. Переход сочетание $N_{ТР}=9$, $N_{РК}=5$.

- Точка 6. Конечная стадия. Переход на сочетание $N_{ТР}=8$, $N_{РК}=4$ по критерию достижения величины удельного расхода электроэнергии $W_{уд5}$ [1.34-1.39].

Основные данные по точкам перехода в существующей системе управления электрическим режимом сведены в таблице 1.9. В основу функционирования существующего алгоритма заложен профиль плавки, представленный в таблице 1.10.

Таблица 1.9

Точки перехода с одного сочетания $N_{ТР}$ и $N_{РК}$ на другое при использовании существующей системы управления

| № | $N_{ТР}$ | $N_{РК}$ | t,с | $U'_{д.вг.чѐт}$ | $U'_{д.вг.нечѐт}$ | Критерий |
|---|----------|----------|------|-----------------|-------------------|---------------|
| Плавка ШП-125 (40 т. чугуна, скрап без стружки) | | | | | | |
| 0 | 7 | 5 | 0 | - | - | Начало плавки |
| 1 | 9 | 5 | 91 | 10,55 | 16,33 | $W_{уд1}$ |
| 2 | 9 | 3 | 432 | 3,25 | 17,44 | $W_{уд2}$ |
| 3 | 9 | 5 | 610 | 1,13 | 11,00 | $W_{уд3}$ |
| 4 | 7 | 5 | 926 | - | - | Подвалка |
| 5 | 9 | 5 | 1009 | 4,25 | 12,29 | $W_{уд4}$ |
| 6 | 8 | 4 | 1324 | 1,01 | 6,87 | $W_{уд5}$ |

Профиль плавки в существующей системе управления электрическим режимом,
используемой на ШП-125

| № программы | N_{TP} | N_{PK} | $Z_{23AD.1}$ [МОм] | $Z_{23AD.2}$ [МОм] | $Z_{23AD.3}$ [МОм] |
|-------------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 7 | 5 | 6,35 | 6,25 | 6,50 |
| 2 | 9 | 5 | 6,05 | 6,00 | 6,15 |
| 3 | 9 | 3 | 6,10 | 5,90 | 6,00 |
| 4 | 8 | 4 | 6,20 | 6,00 | 6,10 |
| 5 | 9 | 5 | 6,30 | 6,10 | 6,20 |
| 6 | - | - | - | - | - |
| 7 | 8 | 1 | 6,05 | 5,85 | 5,9 |
| 8 | 8 | 2 | 6,20 | 5,90 | 6,10 |
| 9 | 8 | 3 | 6,20 | 6,00 | 6,10 |

Анализ алгоритмов работы существующей системы управления позволил выявить следующие недостатки в существующей системе управления электрическим режимом:

1. На начальной стадии плавления шихты переход с сочетания $N_{TP}=7$, $N_{PK}=5$ на сочетание $N_{TP}=9$, $N_{PK}=5$ по критерию $W_{уд}$ может быть произведён несвоевременно ввиду того, что распределение лома уникально для каждой отдельно взятой плавки. Граничное значение $W_{уд}$ в данном случае является эмпирическим параметром, который на практике подбирается итерационным методом. Анализ большой выборки плавков показал, что необходимость перехода на сочетание $N_{TP}=9$, $N_{PK}=3$ с пониженным излучением дуги в фазе «2» для компенсации излишней те-

пловой энергии, поглощённой водоохлаждаемыми панелями, возникает вследствие несвоевременного перехода на повышенную ступень $N_{TP}=9$, $N_{PK}=3$. В новой системе необходимость понижения излучения в фазе «2» отсутствует ввиду того, что переходы с одного сочетания N_{TP} и N_{PK} производятся своевременно. Поэтому в новой настройке уставки для данного сочетания могут быть заменены альтернативными с учётом критерия выбора оптимального несимметричного режима.

2. Ход плавки после завершения проплавления колодцев может быть различен. В ряде случаев раскрытие колодцев проходит относительно стабильно при малой амплитуде возмущающих воздействий, вызванных обвалами шихты. В ряде случаев раскрытие колодцев проходит со значительными возмущающими воздействиями, об этом свидетельствует резкий рост относительного действующего значения суммарных чётных гармоник тока и напряжения дуги приблизительно на 150 секунде. Применение $W_{уд}$ не позволяют отследить начало данного процесса, вследствие чего возникает вероятность того, что плавка будет протекать на повышенной ступени при значительных возмущениях.

3. После закрытия пальцев, плавка протекает при постоянном сочетании $N_{TP}=9$, $N_{PK}=4$. Анализ относительного действующего значения суммарных нечётных гармоник тока и напряжения дуги позволяет судить о том, что условия в процессе плавки менялись вследствие изменения режима продувки жидкой ванны. При этом адаптации электрического режима к изменению условий не происходит, так как удельный расход электроэнергии в данном случае не является показательным параметром.

Для устранения вышеприведённых недостатков, предлагается использовать следующий алгоритм управления, в основе которого лежит анализ значительной выборки плавков:

1. Начало плавки, работа на пониженной ступени $N_{TP}=7$, $N_{PK}=5$. На протяжении 1 минуты система выведена из работы для компенсации постоянных времени фильтров скользящих средних.

2. Включение работы системы. Управление по относительно действующему значению суммарных чётных гармоник напряжения дуги. Критерий перехода на промежуточную ступень $N_{TP}=8$, $N_{PK}=5$: величина $U'_{ВГ.ЧЁТ}$ достигла граничного значения в 7,5% и не выходит за его пределы на протяжении 30 секунд.

3. Проверка возможности перехода на повышенную ступень $N_{TP}=9$, $N_{PK}=5$. Если после перехода на $N_{TP}=8$, $N_{PK}=5$ величина $U'_{ВГ.ЧЁТ}$ не превышает граничного значения в 7,5% на протяжении 1 минуты, система переходит на сочетание $N_{TP}=9$, $N_{PK}=5$. В противном случае система остаётся на сочетании $N_{TP}=8$, $N_{PK}=5$, пока величина $U'_{ВГ.ЧЁТ}$ вновь не опустится до уровня в 10% и не будет превышать его на протяжении 30 секунд, что будет являться критерием перехода на сочетание $N_{TP}=9$, $N_{PK}=5$.

4. По факту достижения величины $U'_{ВГ.ЧЁТ}$ граничного значения в 1,5%, осуществляется переход на сочетание $N_{TP}=9$, $N_{PK}=3$. На последующие всплески система не реагирует до момента подвалки.

5. После подвалки производится переход на пониженную ступень $N_{TP}=7$, $N_{PK}=5$. На протяжении 30 секунд система выведена из работы для компенсации постоянных времени фильтров скользящих средних.

6. По мере достижения граничного значения величины $U'_{ВГ.ЧЁТ}$ граничного значения в 1,5%, система возвращается на повышенную ступень $N_{TP}=9$, $N_{PK}=5$ и продолжает работать вплоть до закрытия пальцев.

7. После закрытия пальцев, система переходит на управление по относительно действующему значению суммарных нечётных гармоник напряжения дуги. При этом вводится следующий критерий управления, где сочетание $N_{TP}=8$, $N_{PK}=1$ характерно для режима с длинными дугами, сочетание $N_{TP}=8$, $N_{PK}=2$ – средними дугами, и сочетание $N_{TP}=8$, $N_{PK}=3$ – для режима с короткими дугами:

$$[N_{TP}; N_{PK}] = \begin{cases} [8;1], & \text{если } U'_{ВГ.НЕЧЁТ} < 7,5\% \\ [8;2], & \text{если } 7,5\% \leq U'_{ВГ.НЕЧЁТ} \leq 10\% \\ [8;3], & \text{если } U'_{ВГ.НЕЧЁТ} > 10\% \end{cases} \quad (1.18)$$

Блок-схема работы вышеописанного алгоритма представлена на рис.1.24 [1.40-1.42]. Точки переключения, соответствующие работе данного алгоритма (рис.1.25), по аналогии с таблицей 1.10 сведены в таблице 1.11.

Таблица 1.11

Точки перехода с одного сочетания $N_{ТР}$ и $N_{РК}$ на другое при использовании новой системы управления

| № | $N_{ТР}$ | $N_{РК}$ | t,с | $U'_{д.вг.чѐт}$ | $U'_{д.вг.нечѐт}$ | Критерий |
|---|----------|----------|------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Плавка ШП-125 (40 т. чугуна, скрап без стружки) | | | | | | |
| 1 | 7 | 5 | 0 | - | - | Начальные значения |
| 2 | 8 | 5 | 134 | 5,04 | 13,87 | Чѐтные гармоники |
| 3 | 9 | 5 | 394 | 5,08 | 16,91 | Чѐтные гармоники |
| 4 | 9 | 3 | 463 | 1,5 | 15,9 | Чѐтные гармоники |
| 5 | 7 | 5 | 926 | - | - | Подвалка |
| 6 | 9 | 3 | 1032 | 1,5 | 12,73 | Чѐтные гармоники |
| 7 | 8 | 2 | 1391 | 1,38 | 9,82 | Нечѐтные гармоники |
| 8 | 8 | 3 | 1523 | 1,89 | 10 | Нечѐтные гармоники |
| 9 | 8 | 2 | 1687 | 1,7 | 10 | Нечѐтные гармоники |
| 10 | 8 | 1 | 1798 | 1,43 | 7,5 | Нечѐтные гармоники |
| 11 | 8 | 2 | 1994 | 1.41 | 7.5 | Нечѐтные гармоники |

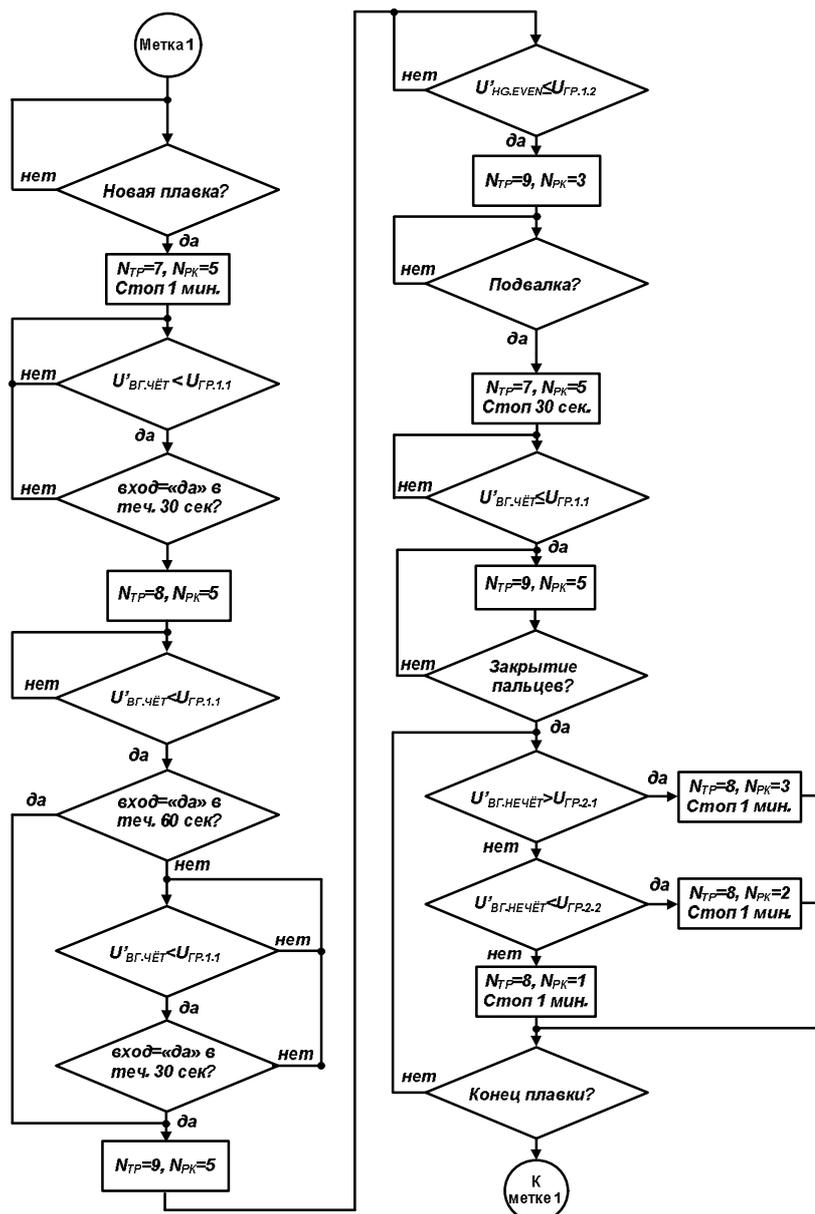


Рис. 1.24. Блок-схема алгоритма функционирования новой системы управления электрическим режимом ШП с применением анализа гармонического состава напряжения дуги

За период испытаний был достигнут технический эффект по снижению удельного расхода электроэнергии на 1,75%. Достижение технического эффекта обеспечивают следующие преимущества разработанной системы управления электрическим режимом: 1. Обеспечено своевременное переключение между сочетаниями ступени печного $N_{ТР}$ и $N_{РК}$ в соответствии с реальными технологическими процессами, протекающими внутри ванны печи. 2. Предусмотрен алгоритм предотвращения несвоевременного перехода на повышенную ступень печного

трансформатора на начальной стадии плавления шихты, вследствие которого происходит избыточное поглощение тепловой энергии водоохлаждаемыми панелями. 3. Обеспечена адаптация электрического режима к интенсивности продувки расплава кислородом.

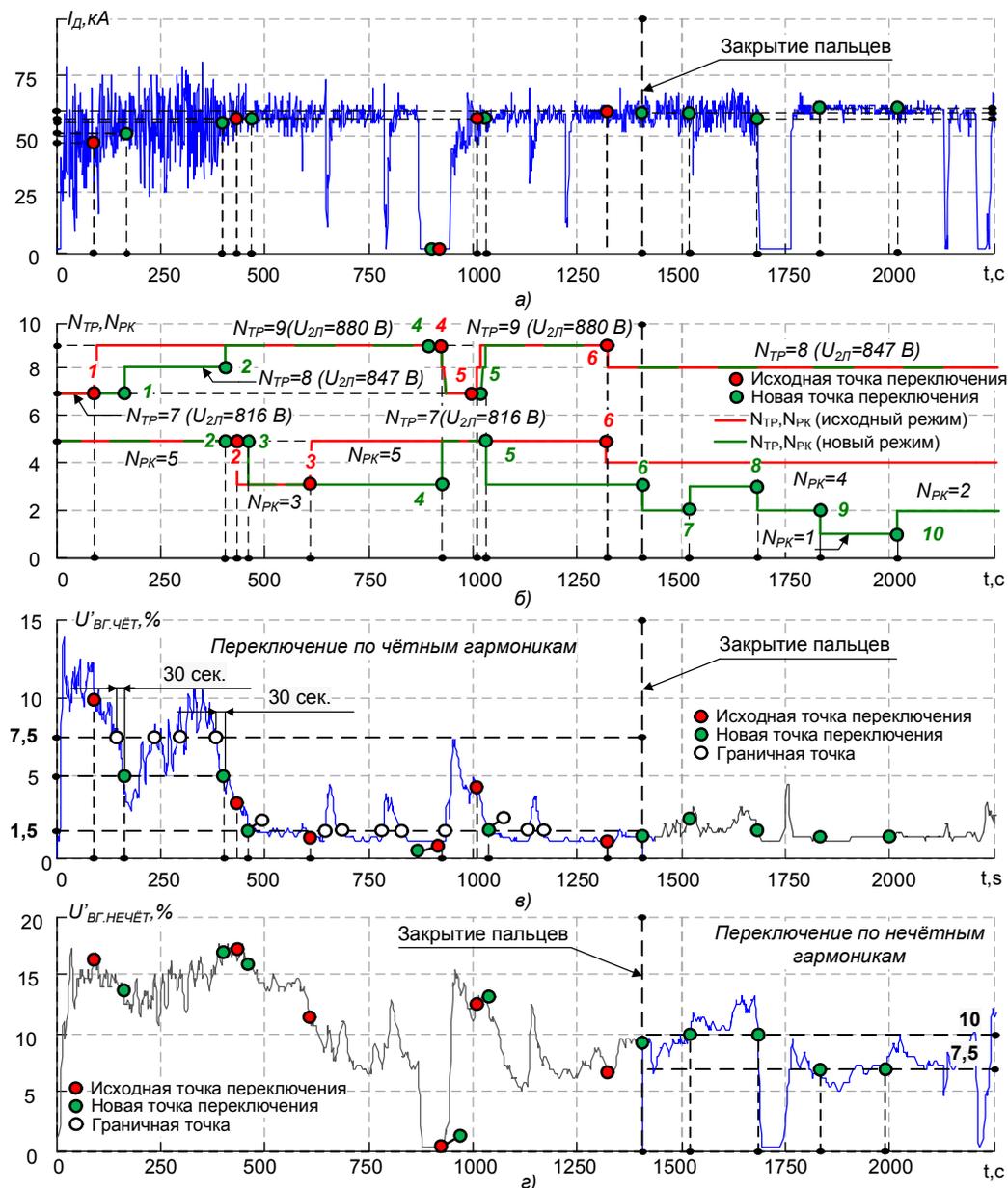


Рис. 1.25. Осциллограммы сигналов: а) среднего значения сигнала тока электрической дуги I_d ; б) переключения ступени печного трансформатора $N_{ТР}$ и номера рабочей кривой $N_{РК}$ для существующей и новой системы; в) относительного действующего значения суммарных чётных гармоник напряжения дуги $U'_{вг.чет}$, г) относительного действующего значения суммарных нечётных гармоник напряжения дуги $U'_{вг.нечет}$

1.4.3 Реализация алгоритма управления электрическим режимом по коэффициенту шлака на примере двухпозиционной УКП.

В связи с высоким влиянием режимов аргонной продувки на работу УКП, для повышения энергоэффективности работы печной установки необходимо выполнять адаптацию электрических режимов при разной интенсивности перемешивания металла за счет индивидуальной настройки электрических параметров фаз, расположенных в непосредственной близости от зеркал жидкого металла на поверхности жидкой ванны, образуемых работой продувочных блоков. Для реализации автоматической адаптации электрических режимов УКП к меняющимся условиям работы необходимо использование специализированного параметра, адекватно отражающего режимы горения электрических дуг.

В прошлых разделах было обосновано, что наиболее оптимальным параметром для управления электрическим режимом УКП является $K_{ШЛАК}$ по току дуги. Использование параметра $K_{ШЛАК}$ в алгоритмах автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печных трансформаторов позволяет адаптировать электрические режимы УКП с учетом переменной толщины шлака, режимов аргонной продувки, операций подачи материалов в ковш при нагреве и т.д.

В ходе проведения экспериментальных исследований было доказано, что при укорачивании электрической дуги фазы, расположенной наиболее близко к зеркалу, вплоть до определенного критического значения $L_{Д,КРИТ.}$ сохраняется эффект по повышению стабильности горения дуги и уменьшения дисперсии тока дуги. Это продемонстрировано на рис. 1.26. Данное явление легло в основу нового алгоритма управления электрическим режимом УКП, принцип работы которого позволяют продемонстрировать представленные на рис. 1.27 временные диаграммы изменения импеданса фазы вторичного электрического контура, полученные на реальном технологическом оборудовании в процессе внепечной обработки расплава.

Изначально, в системе для трёх рабочих кривых, определяющих несимметричные режимы горения дуг ($N_{PK}=1-3$ для позиции «1» $N_{PK}=4-6$ для позиции «2») и всех рабочих ступеней печного трансформатора N_{TP} задаются наборы уставок

параметра регулирования $Z_{2\phi}$, обеспечивающие формирование короткой ($N_{PK}=3;6$), средней ($N_{PK}=2;5$) и длинной ($N_{PK}=1;4$) дуги с учётом условия поддержания оптимального несимметричного электрического режима. Представленные на рис. 1.27 осциллограммы были получены на позиции «1», поэтому в дальнейшем при описании принципов функционирования алгоритма управления будут использоваться рабочие кривые $N_{PK}=1-3$. Отметим, что принцип действия алгоритмов для второй позиции и $N_{PK}=4-6$ будет аналогичным.

Помимо наборов уставок для трёх рабочих кривых и рабочих ступеней печного трансформатора, в системе также задаются следующие параметры: 1) $K_{ГР.1}$ - величина $K_{ШЛАК}$, при достижении которой происходит переход на короткую дугу ($N_{PK}=3$); 2) $K_{ГР.2}$ - величина $K_{ШЛАК}$, при достижении которой происходит переход на длинную дугу ($N_{PK}=1$); 3) $K_{ГР.1.1}$ - величина $K_{ШЛАК}$, при достижении которой происходит переход с короткой дуги на среднюю (с $N_{PK}=3$ на $N_{PK}=2$); 4) $K_{ГР.2.1}$ - величина $K_{ШЛАК}$, при достижении которой происходит переход с длинной дуги на среднюю (с $N_{PK}=1$ на $N_{PK}=2$); 5) $K_{ГР.3}$ - величина $K_{ШЛАК}$, при достижении которой происходит включение счётчика, по достижению которым заранее определённого значения происходит понижение ступени печного трансформатора; 6) $K_{ГР.4}$ - величина $K_{ШЛАК}$, при достижении которой происходит включение счётчика, по достижению которым заранее определённого значения происходит повышение ступени печного трансформатора.

Принцип функционирования алгоритма поясним с помощью характерных точек 1-9 (см.рис.1.27), в которых происходит изменение электрического режима путём переключения $N_{ГР}$ и N_{PK} : 1. Произведён перевод электродов с позиции «2» на позицию «1». Начало новой плавки. На любой ступени печного трансформатора для позиции «1» изначально всегда задаётся $N_{PK}=3$, что соответствует короткой дуге; 2. Величина $K_{ШЛАК}$ достигает значения $K_{ГР.1.1}=35$, происходит переход с $N_{PK}=3$ на $N_{PK}=2$; 3. Величина $K_{ШЛАК}$ опускается ниже значения $K_{ГР.1.1}=25$, происходит переход с $N_{PK}=2$ на $N_{PK}=3$; 4. Величина $K_{ШЛАК}$ достигает значения $K_{ГР.1.1}=35$, снова происходит переход с $N_{PK}=3$ на $N_{PK}=2$; 5. Величина $K_{ШЛАК}$ достигает значения $K_{ГР.2}=K_{ГР.4}=50$, происходит переход $N_{PK}=2$ на $N_{PK}=1$ с одновременным запус-

ком счётчика «1», формирующего по достижению значения, равного 4, задание на повышение N_{TP} ; 6. Счётчик достигает 4 и обнуляется. Это означает, что на протяжении заранее predeterminedённых 4 интервалов по 10 секунд условие $K_{ШЛАК.} > K_{ГР.4}$ не нарушалось. Происходит переход на $N_{TP}=19$ при одновременном переходе на $N_{PK}=3$; 7. Ввиду того, что после переключения ступени печного трансформатора условие $K_{ШЛАК.} > K_{ГР.2}$ выполняется, вследствие чего происходит переход с $N_{PK}=3$ на $N_{PK}=1$; 8. Величина $K_{ШЛАК.}$ опускается ниже значения $K_{ГР.2.I}=35,1$. Происходит переход с $N_{PK}=1$ на $N_{PK}=2$; 9. Величина $K_{ШЛАК.}$ повторно превышает значение $K_{ГР.2}=K_{ГР.4}=50$. Происходит переход с $N_{PK}=2$ на $N_{PK}=1$ с одновременным запуском счётчика. Тем не менее, в дальнейшем условие $K_{ШЛАК.} > K_{ГР.4}$ на протяжении 4 интервалов было нарушено, $K_{ШЛАК.}$ стабилизировался на значении ниже $K_{ГР.4}$, электрический режим остался без изменений. Важно отметить, что в рамках данного примера счётчик «2» не был задействован, поскольку величина $K_{ШЛАК.}$ не опускалась ниже значения $K_{ГР.3}=20$ [43]. Принцип его действия аналогичен, но основное отличие заключается в том, что он предназначен для формирования задания на понижение ступени печного трансформатора. Применение нового способа управления электрическим режимом позволило обеспечить снижение удельного расхода электроэнергии на 2% относительно исходного.

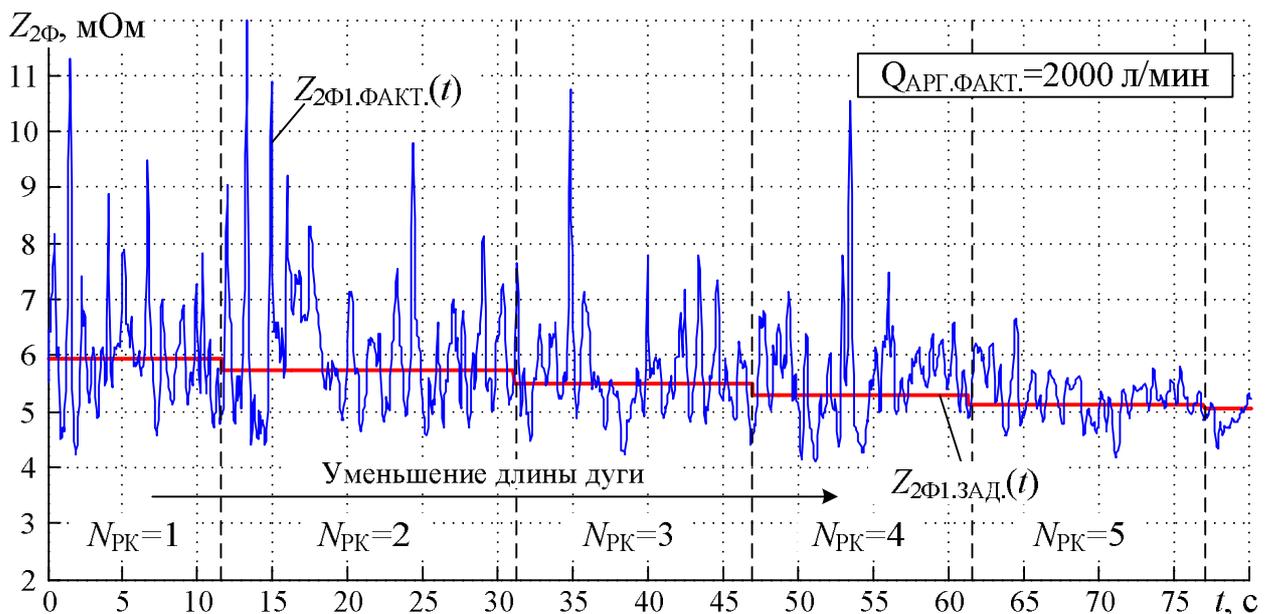


Рис. 1.26. Экспериментальное исследование качества регулирования импеданса УКП при изменении длины электрической дуги

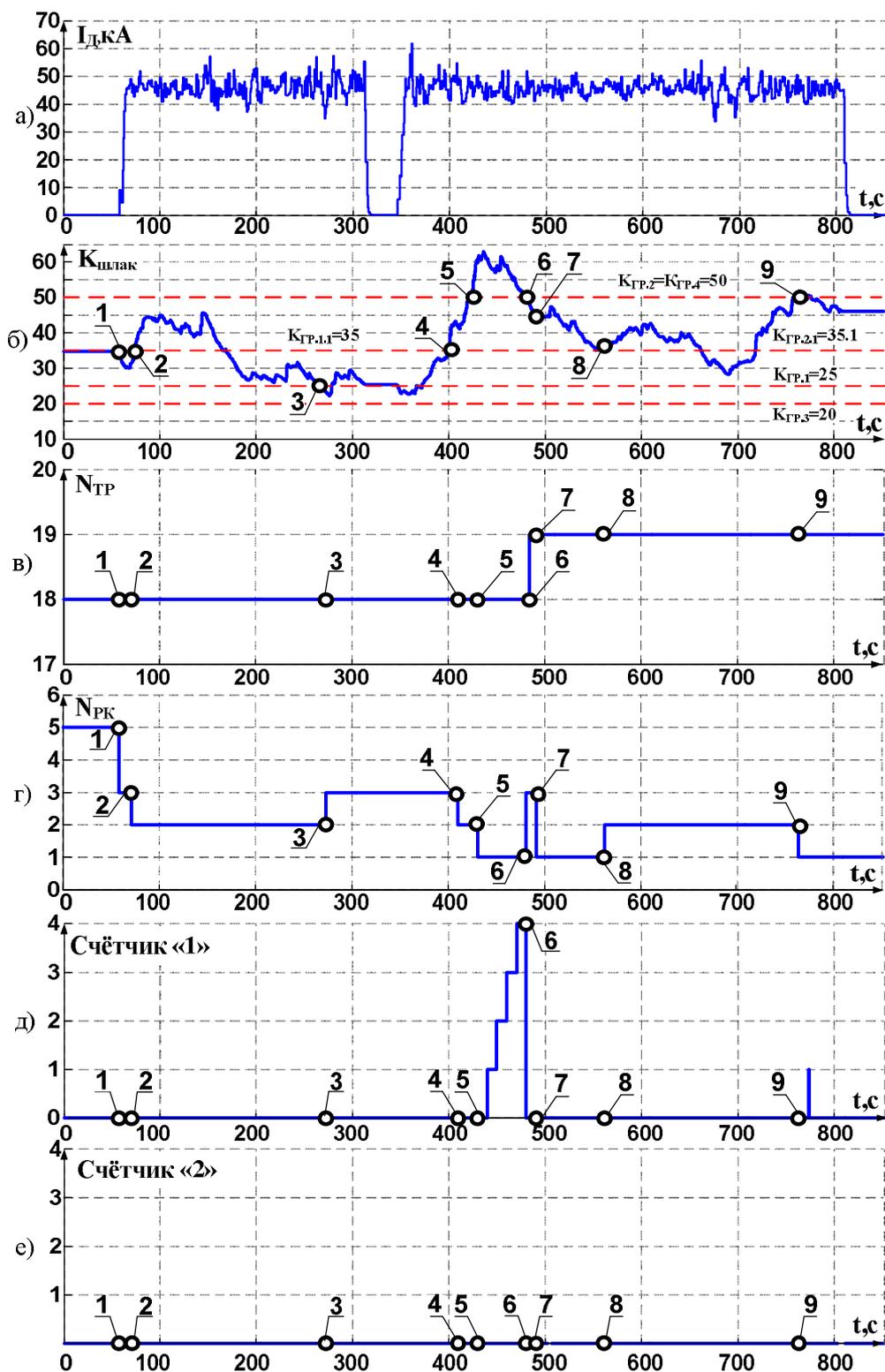


Рис. 1.27. Осциллограммы, демонстрирующие принцип работы алгоритма управления электрическим режимом УКП с использованием коэффициента шлака: а) ток электрической дуги I_d , кА; б) Фактическое значение коэффициента шлака $K_{\text{шлак}}$; в) активная ступень печного трансформатора; г) текущий номер рабочей кривой; д) Значение счётчика «1» е) Значение счётчика «2»

2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ИНСТРУМЕНТ-ЗАГОТОВКА» ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ ПОВЫШАЮЩИХ КАЧЕСТВО ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ И РЕСУРС ОБОРУДОВАНИЯ

2.1. Разработка и численная реализация модели контактного взаимодействия в технологической системе: заготовка - горячая прокатка - горячекатаная полоса

Задача моделирования контактного взаимодействия в технологической системе «заготовка – горячая прокатка – горячекатаная полоса» будет решена путем разбиения на две, более простых подсистемы контактного взаимодействия: «рабочий валок - опорный валок» и «рабочий валок-полоса».

Моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса «Deform–3D», в основу которого положен метод конечных элементов (МКЭ).

Применяемый МКЭ, на базе программного комплекса «Deform–3D», позволяет проконтролировать результаты на всех этапах исследования, а так же проверить и отработать технологические процессы на ЭВМ без проведения дорогостоящих лабораторных или промышленных испытаний.

2.1.1. Моделирование контактного взаимодействия в системе «рабочий валок-опорный валок»

Модельное представление энергосиловых факторов в инструменте будет сформулировано следующим образом. Рабочий валок, представлен как упругая среда, взаимодействует с опорным – абсолютно жестким, причём рабочий валок также установлен в абсолютно жёстких опорах (рис. 2.1). Задача, которая решена посредством моделирования, заключалась в исследовании контактных напряжений, определении прогиба рабочего вала в зоне контакта с заготовкой.

Поскольку в исследуемый процесс подается смазочный материал (СМ), то при выполнении исследования необходимо сравнить два результата моделирования процесса взаимодействия валков:

- взаимодействие без смазочного материала (с коэффициентом трения 0,22)

– взаимодействие со смазочным материалом (с коэффициентом трения 0,017).

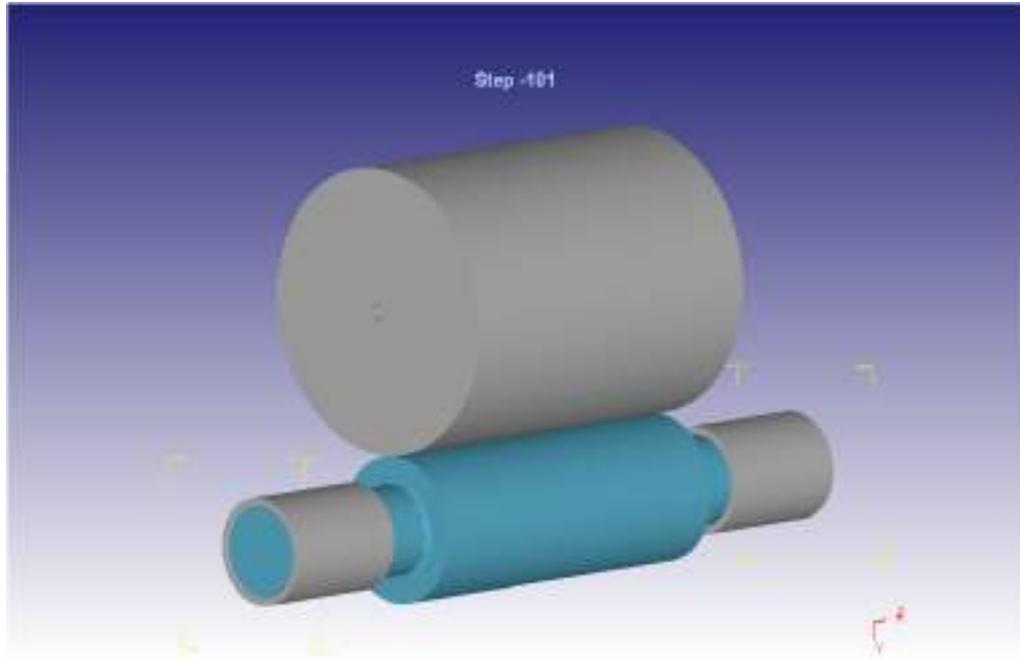


Рис. 2.1. Твёрдотельная модель процесса взаимодействия «опорный валок - рабочий валок» в препроцессоре в DEFORM-3D

Объектом исследования выступает рабочий валок, материал которого необходимо было задать как сталь марки ЛПХ6НМ5Ф5дц-76. Поскольку в библиотеке материалов программного комплекса данный материал отсутствовал, то было принято решение создать в среде «DEFORM-3D» вышеуказанные материал.

Используя справочные материалы для сталей марки ЛПХ6НМ5Ф5дц-76 были заданы следующие технологические и физико-механические данные, представленные в таблице 2.1:

Таблица 2.1

Технологические и физико-механические свойства сталей марки
ЛПХ6НМ5Ф5дц-76

| Сталь марки ЛПХ6НМ5Ф5дц-76 | | |
|--------------------------------|-------------|---------|
| Характеристика | Размерность | Данные |
| Твердость, НS | ГПа | 75-90 |
| Предел прочности на растяжение | МПа | 650-800 |
| Модуль упругости | ГПа | 22-24 |

| | | |
|---------------------------------|-------------------------------|---------|
| Коэффициент линейного удлинения | $(20 \div 1000C)106/^\circ C$ | 13-15 |
| Ударная вязкость | Дж/см ² | 3.5-4.5 |
| Теплопроводность | Вт/м·К | 21-23 |
| Теплоемкость | Дж/кг·К | 420-450 |

Решалась задача теории упругости по нахождению прогиба рабочей поверхности валка в условиях внешнего взаимодействия с учетом подачи смазочного материала при коэффициенте трения 0,017 и без смазочного материала при коэффициенте трения 0,022. Учитывалось трение только между валками.

После проверки импортированной геометрии конечно-элементная (КЭ) сетка рабочего валка была сгенерирована и включала около 200 000 объемных элементов, тип элементов – тетраэдры. Конечно-элементная модель рабочего валка, представлена на рисунке 2.2.

Рабочему и опорному валку назначена температура, равная 80оС, а угловая скорость равна нулю.

Были приняты следующие допущения:

Материал рабочего валка упругий однородный изотропный;

Материал опорного валка – абсолютно жесткий;

Подшипниковые опоры рабочего валка неподвижны, коэффициент трения в них принят равным нулю;

Опорный валок неподвижный.

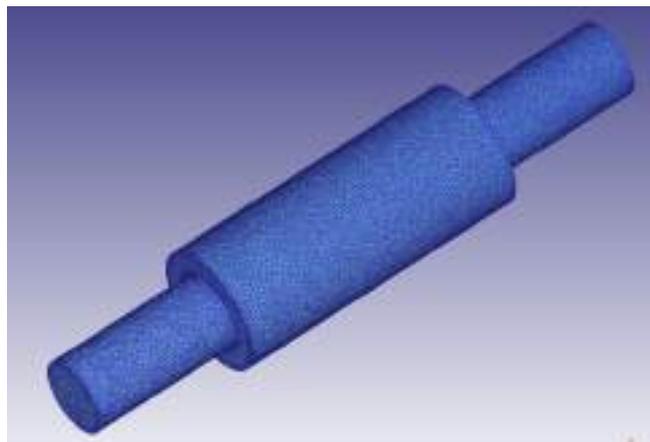


Рис. 2.2. Конечно-элементная математическая модель рабочего валка

Данные допущения обоснованы трудоемкостью моделирования и режимом эксплуатации клетки. При возникновении силового взаимодействия рабочий валок находит стационарное положение, т.е. динамическая составляющая минимальна.

Используя механизм решения МКЭ программного комплекса, запускался расчет. После того как расчет был завершен и использовали постпроцессор «DEFORM-3D» для получения и обработки результатов.

В результате расчета процесса взаимодействия «рабочий валок - опорный валок» в комплексе «DEFORM-3D» были определены:

поле интенсивности напряжений (σ_i) в зоне прокатки;

прогиб поверхности рабочего валка;

Для различных условий взаимодействия в системе «опорный валок - рабочий валок» были приведены дополнительные исследования, результаты которых представлены на рисунках 2.3-2.10:

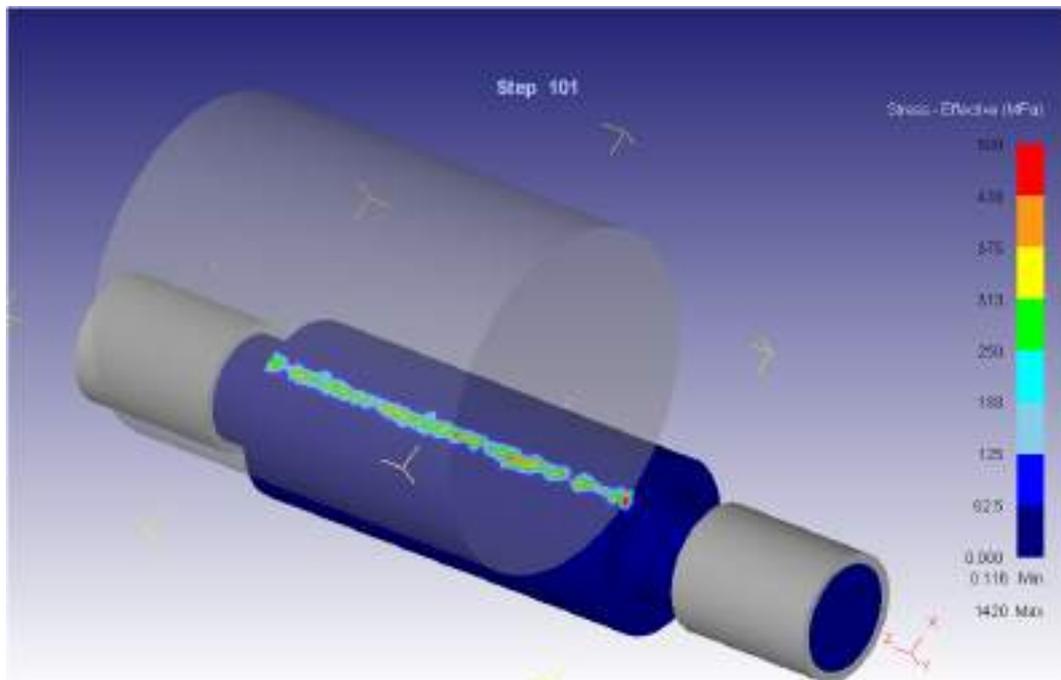


Рис. 2.3. Напряжения в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок»

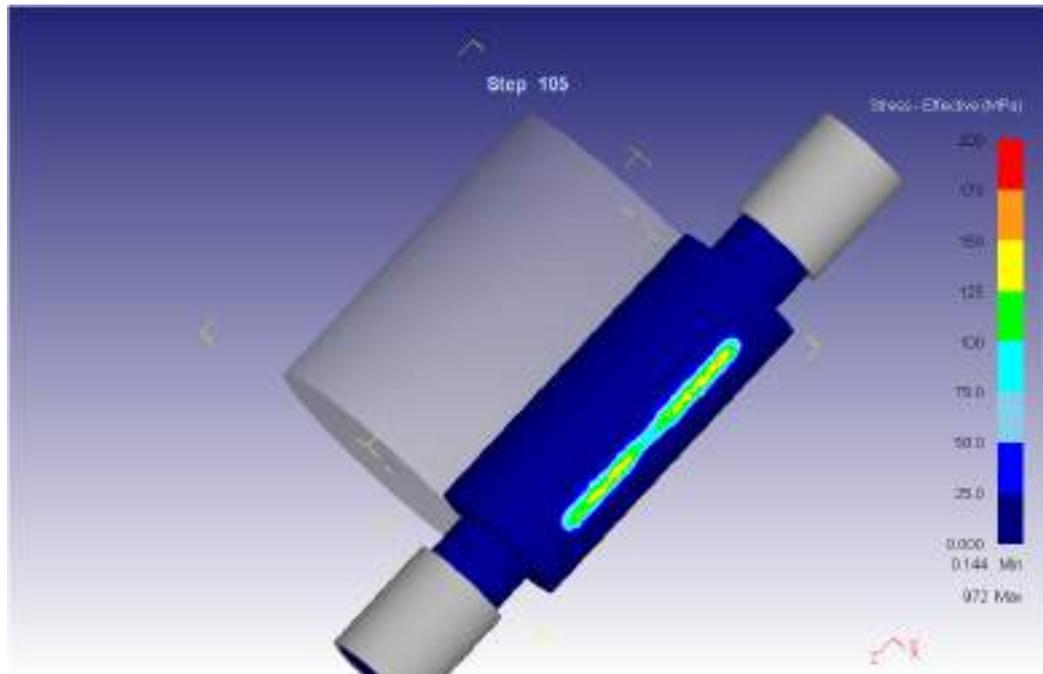


Рис. 2.4 Напряжения в зоне контакта «рабочий валок – заготовка»

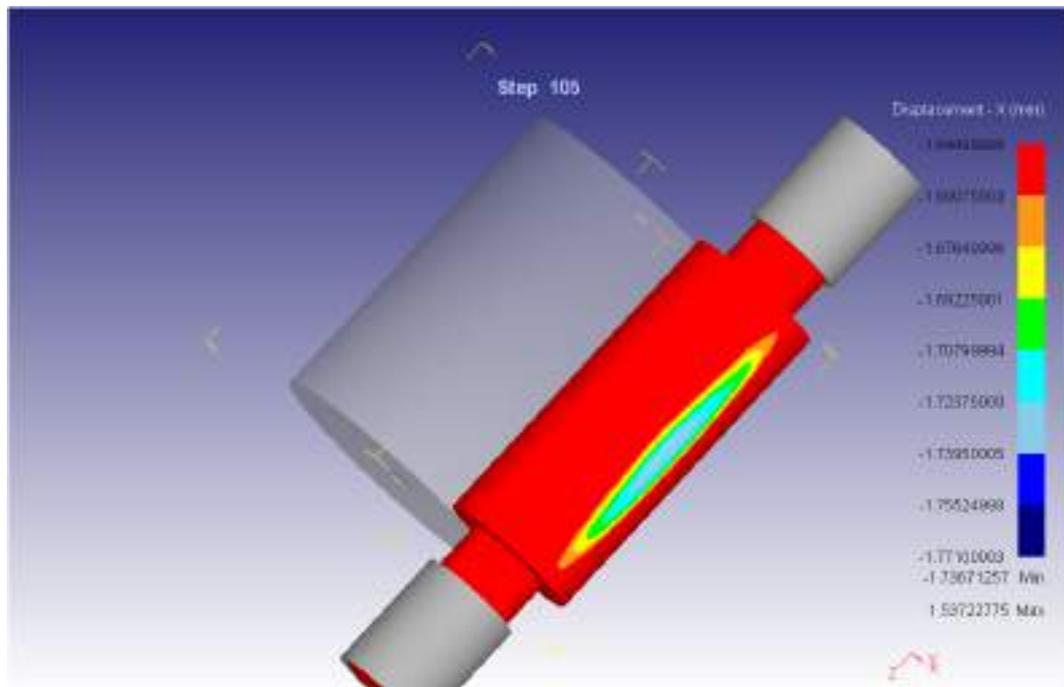


Рис. 2.5. Относительный прогиб рабочего валка для коэффициента трения 0,022. (без смазочного материала)

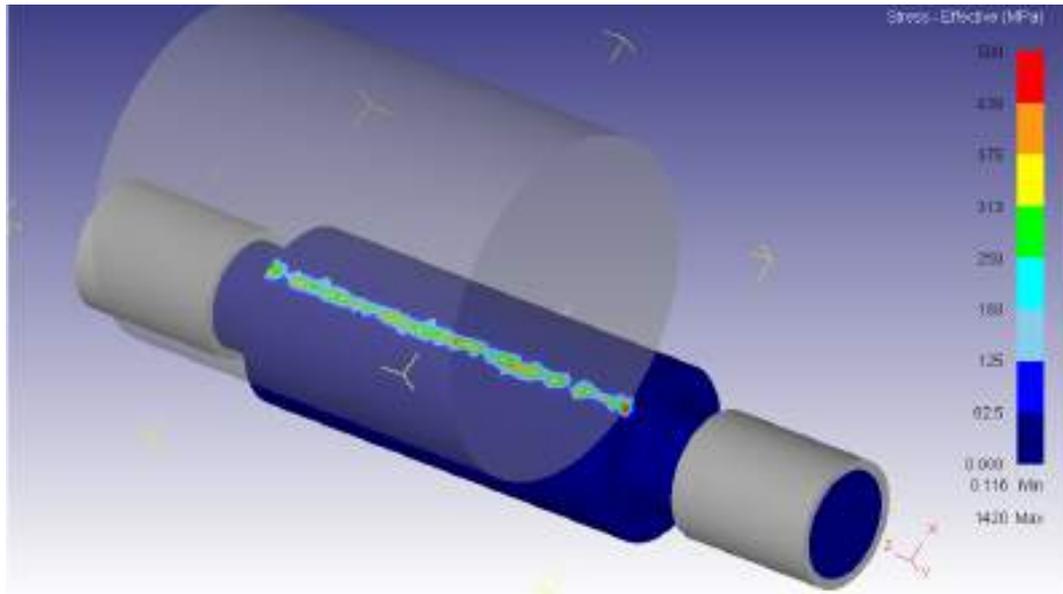


Рис. 2.6. Напряжения в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок» при подаче смазочного материала $Q=0,549$ мл/мин. ($f=f_0 \cdot 0,7$)

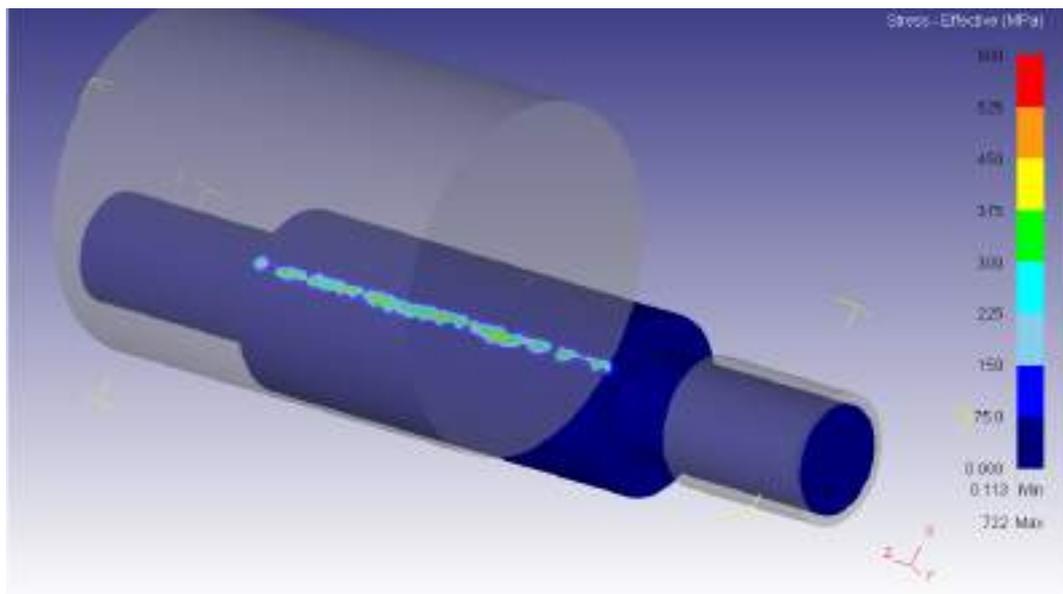


Рис. 2.7. Напряжения в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок» при подаче смазочного материала $Q=0,549$ мл/мин. ($f=f_0 \cdot 0,6$)

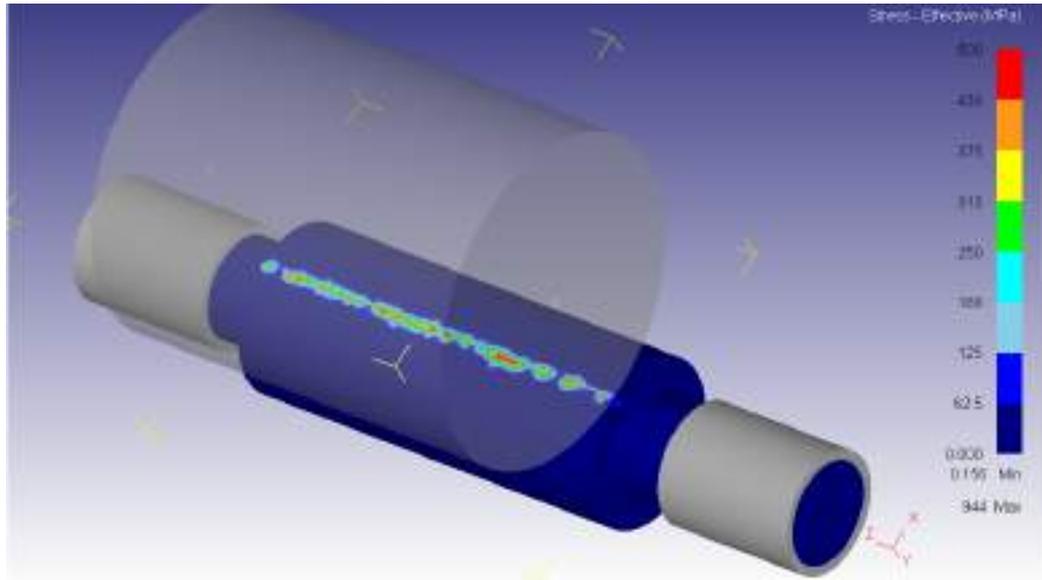


Рис. 2.8. Напряжения в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок» при подаче смазочного материала $Q=0,549$ мл/мин. ($f=f_0 \cdot 0,5$)

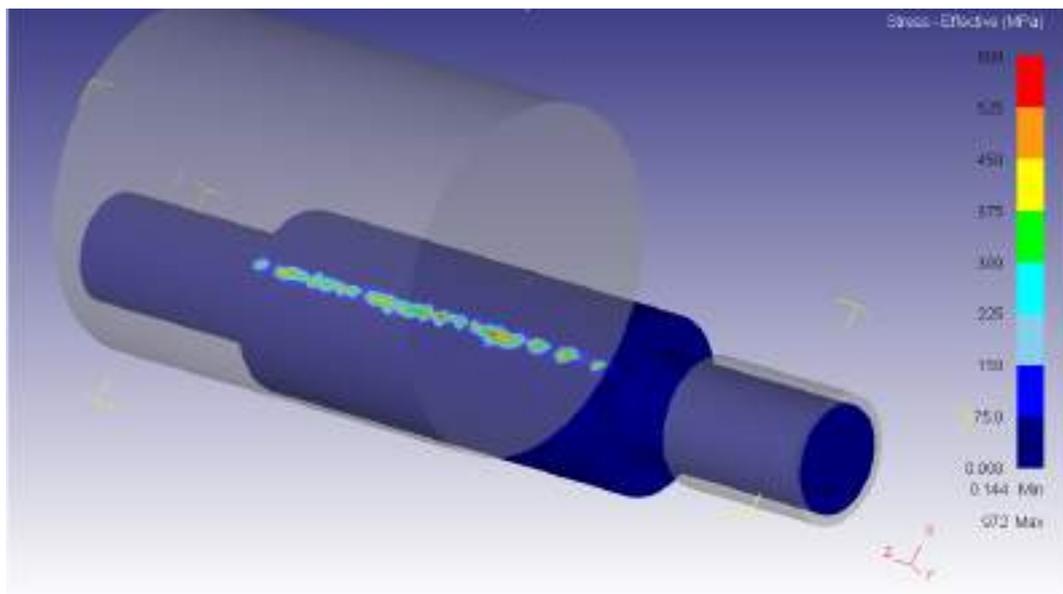


Рис. 2.9. Напряжения в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок» при подаче смазочного материала $Q=0,549$ мл/мин. ($f=f_0 \cdot 0,4$)

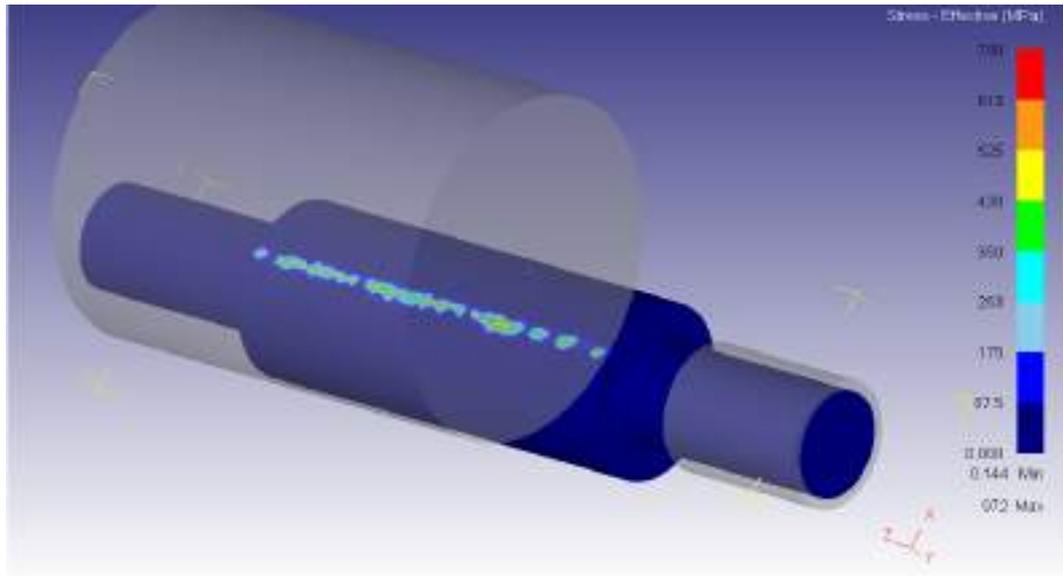


Рис. 2.10. Напряжения в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок» при подачи смазочного материала $Q=0,549$ мл/мин. ($f=f_0 \cdot 35$)

2.1.2. Математическое моделирование контактного взаимодействия в системе «рабочий валок –полоса» при листовой горячей прокатке

При моделировании процесса горячей прокатки были приняты следующие допущения:

- 1) схема напряжённно-деформированного состояния – трёхмерная;
- 2) тепловые эффекты при прокатке – учтены;
- 3) эволюция микроструктуры и фазовые превращения в стали – не учитываются;
- 4) модель материала инструмента – упругопластическая;
- 5) деформируемый материал – однородный и изотропный во всём объёме;
- 6) модель материала заготовки – идеальная пластическая модель;
- 7) модель прокатной клетки «кварто» – осесимметричная.

Для исследования контактного взаимодействия были приняты следующие граничные условия:

геометрические характеристики прокатываемой заготовки: ширина 700...1850 мм, толщина 1,2...65 мм;

скругление на краях входного участка полосы равен радиусу кривизны бочки рабочего валка (процесс захвата заготовки упрощен в модельном представлении);

геометрические параметры валков чистой стадии горячей прокатки:

опорный валок:

длина 2000 мм;

диаметр 1600 мм;

рабочий валок:

длина 2000 мм;

диаметр от 810 до 850 мм;

длина шейки валка 1035 мм;

диаметр шейки валка 540 мм;

подшипниковые опоры смоделированы упрощенно и представлены в модели в виде абсолютно жестких длинных втулок, коэффициент трения в опорах принимается $f_{оп} = 0,05$ (внешний диаметр подшипниковых опор 650 мм, ширина 735 мм).

На первом этапе исследования посредством трехмерной системы твердотельного моделирования «КОМПАС-3D» построена геометрическая модель процесса листовой горячей прокатки. Окончательное модельное представление процесса горячей прокатки приведено на рисунке 2.11, которая соответствует реальным условиям горячей прокатки.

В качестве объекта моделирования на рисунке 2.12 представлена твердотельная модель процесса горячей прокатки полосы в программном комплексе «Deform-3D». Созданные в графическом редакторе «КОМПАС-3D» m3d (3D-модель) файлы объемной модели заготовки и инструмента конвертировались в двоичные STL файлы (стереолитография) – общий тип файлов для импорта геометрии в «Deform-3D». Полученные данные передавались в препроцессор «Deform-3D», где создавалась конечно-элементная (КЭ) модель.

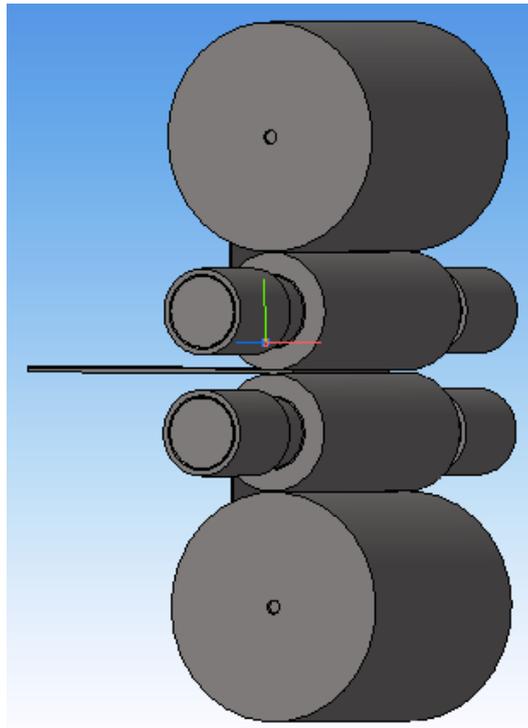


Рис. 2.11. Трехмерная модель клетки «кварто» листового стана горячей прокатки:
1-рабочие валки; 2- опорные валки; 3 – шейки рабочего валка; 4 - заготовка

После проверки импортированной геометрии КЭ сетка заготовки была сгенерирована и включала около 200 000 объемных элементов, тип элементов – тетраэдры. Число и тип элементов определяли исходя из геометрических особенностей заготовки и точности расчета.

Вращение рабочим валкам задали через угловую скорость равной $1,5 \dots 3,5 \text{ с}^{-1}$. Заготовке задавалась температура $1150 \dots 1250 \text{ }^\circ\text{C}$, рабочему валку $80 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$, опорному валку $40 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует реальным условиям процесса прокатки.

Для расчетов необходимо задать свойства прокатываемой заготовки. Программный комплекс «Deform-3D» позволяет использовать и формировать базу данных для различных марок прокатываемых сталей, формируемую по теоретическим или по экспериментальным данным. Так, например, для теоретических значений используются кривые упрочнения материала, полученные с разной температурой и скоростью деформации, а для новых материалов (или материалов, которых нет в базе) используются экспериментальные данные, значения, которые

задаются на основе испытаний на одноосное растяжение. При проведении исследований использовали теоретический подход.

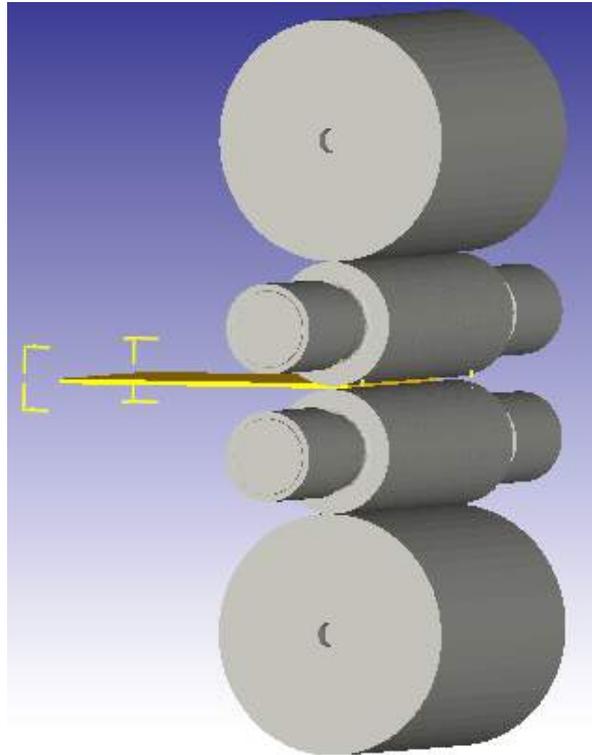


Рис. 2.12. Твёрдотельная модель процесса листовой горячей прокатки в программном комплексе «Deform-3D»

Для материала заготовки была выбрана идеальная пластическая модель. Используя данные кривых упрочнения (зависимость сопротивления деформации металла от температуры, степени и скорости деформации $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$), задавались пластические свойства материалов.

Для проведения расчетов использовали различные марки сталей. В качестве примера на последующих рисунках приведен расчет для известной марки стали - Ст3кп ГОСТ 380-94. Физические свойства материала прокатываемой заготовки (Ст3кп) приведены в таблице 2.2.

Физические свойства сталей марки СтЗкп [2.1]

| Сталь марки СтЗкп ГОСТ 380-94 при 20 оС | | |
|--|-------------------|--------|
| Характеристика | Размерность | Данные |
| Модуль нормальной упругости, E | ГПа | 200 |
| Модуль упругости при сдвиге кручением G | ГПа | 78 |
| Плотность, ρ | кг/м ³ | 7850 |
| Коэффициент Пуассона, μ | - | 0,26 |
| Физические и механические свойства стали СтЗкп при повышенных температурах | | |
| Линейное расширение, α, 10 ⁶ | 1/Град | 15,2 |
| Теплопроводность, λ | Вт/(м×К) | 32 |
| Предел прочности, σВ | МПа | 21 |
| Относительное удлинение, δв | % | 64 |
| Относительное сужение, ψ | % | 100 |

Процесс горячей прокатки полосы происходит при высоких температурах прокатываемой заготовки (до 1250 0С) и рабочих валков (до 100 0С). В расчетной модели на контакте «рабочий валок-заготовка» коэффициент трения первоначально был определен по известным формулам А.П. Грудева [2.2-2.5] и принят равным $f=0,43$.

Установлены следующие параметры расчета. Учитывая литературные данные и практический опыт, определено, что необходимо установить приблизительно 1/3 от минимальной длины грани типичного элемента задачи. Число шагов расчета принято равным 2000, шаг расчета – 1 мм.

Расчеты производились с использованием механизма решения МКЭ в программном комплексе. После окончания расчетов для получения и обработки результатов использовался постпроцессор «Deform-3D».

Поскольку основной целью исследований, является исследование контактного взаимодействия в технологической системе: заготовка - горячая прокатка - горячекатаная полоса, в дальнейшем будем считать:

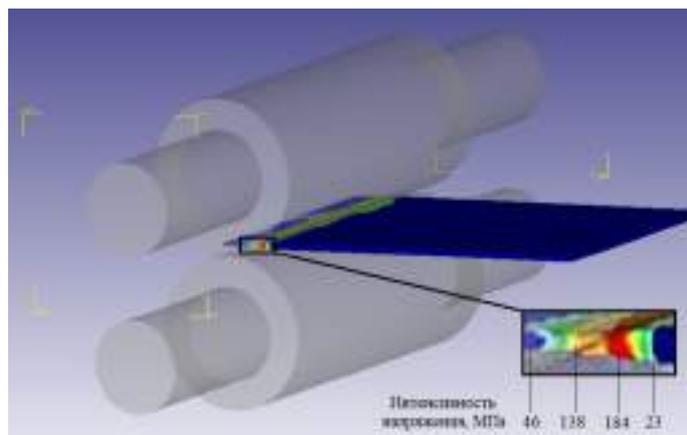
– наличие смазочного материала (СМ) не оказывает влияние на изменение следующих технологических параметров: обжатие ($\varepsilon, \%$) и скорость ($V_p, \text{м/с}$). По-

этому при построении и изучении математической модели процесса листовой горячей прокатки данные параметры исследоваться не будут.

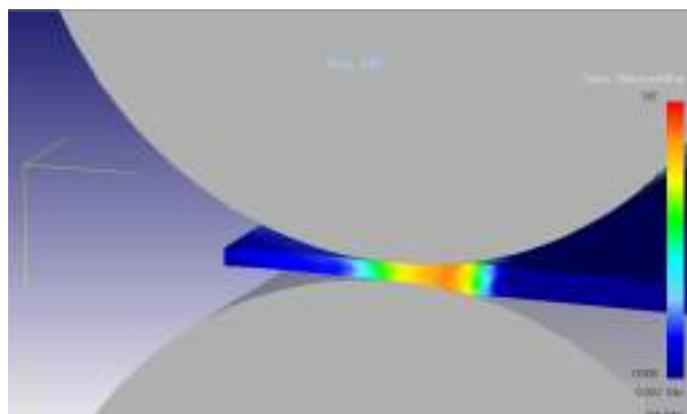
– поскольку применение жидких СМ в технологии производства горячекатаной листовой продукции преимущественно используются в первых клетях непрерывной чистовой группы [2.6-2.11], в дальнейшем при проведении исследований будем рассматривать только первые финишные проходы в чистовой группе клетей.

По результатам расчетов математической модели (с применением метода Ньютона-Рафсона, при решателе – «sparse») было получено большое количество результатов: интенсивность напряжений (σ_i , МПа) в системе «рабочий валок – полоса», усилия прокатки (N , т), температура прокатываемой заготовки (T , 0С).

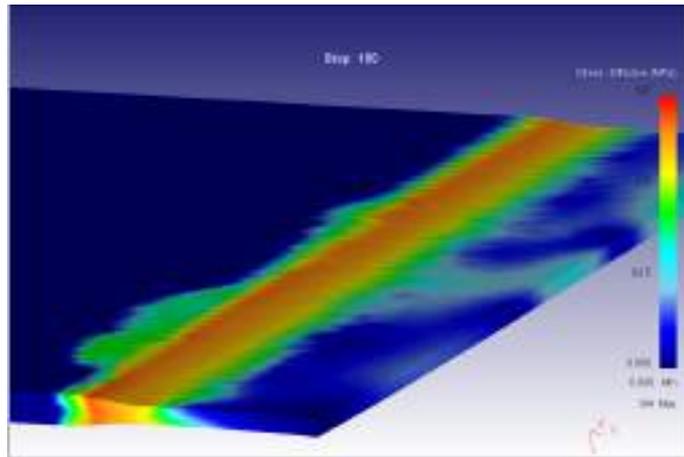
Часть из полученных результатов представлена на рисунках 2.13-2.15.



а

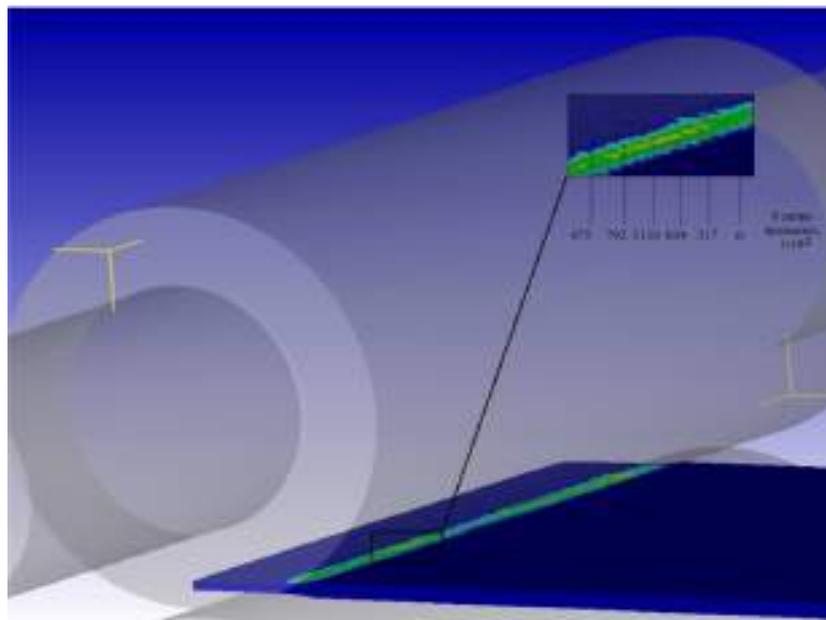


б

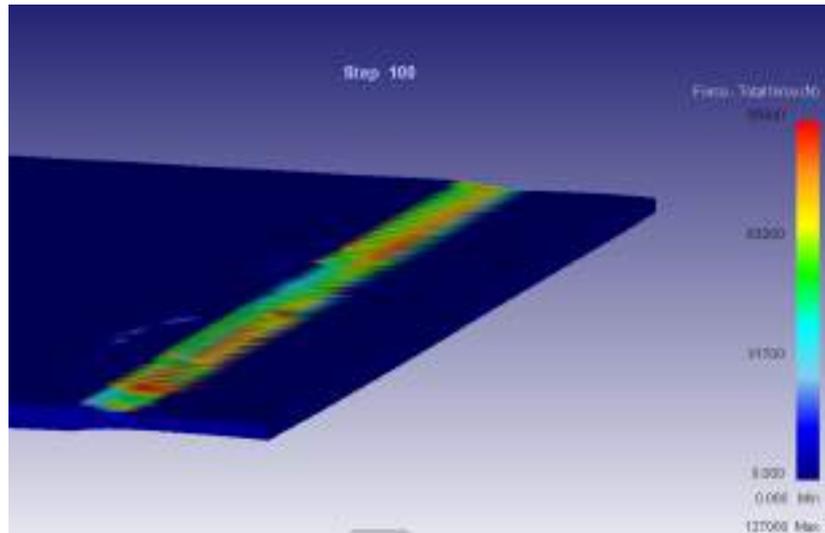


В

Рис. 2.13. Поля интенсивности напряжений (σ_i) в системе «рабочий валок – полоса» при горячей прокатке, МПа

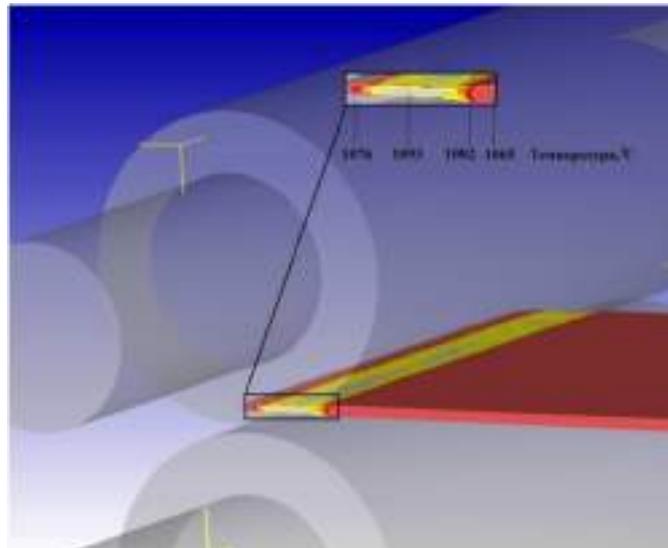


а

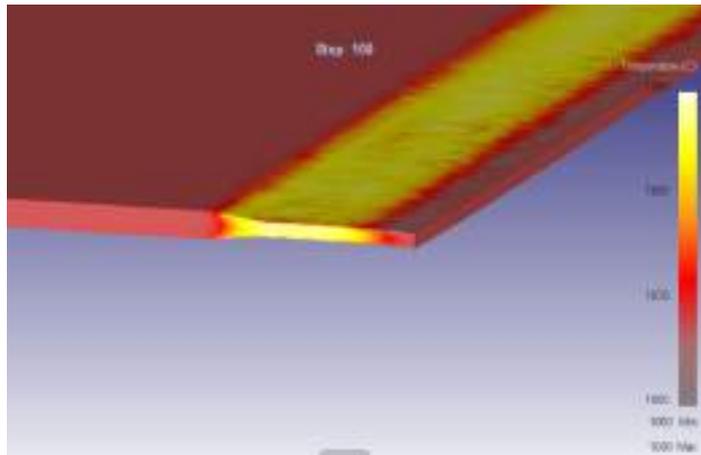


б

Рис. 2.14. Усилия прокатки при взаимодействии в системе «рабочий валок-полоса», кН.



а



б

Рис. 2.15. Температура прокатываемой заготовки и ее распределение по ширине и длине очага деформации (Т,0С)

Анализ полученных результатов показывает, что применение жидких СМ в технологии листовой горячей прокатки позволяет снизить энергозатраты (токовые нагрузки главных приводов) в среднем на 7...10 %.

Реализуемая математическая модель процесса горячей прокатки полосы является универсальной и позволяет производить расчет, как для одной клетки «кварто», так и для клеток, объединенных в непрерывную группу.

В результате расчета процесса прокатки в комплексе «Deform-3D» для каждой из исследуемой клетки «кварто» были определены:

- 1) поле интенсивности напряжений (σ_i) для исследуемой системы «рабочий валок – полоса», МПа;
- 2) усилие прокатки (N), т;
- 3) температура прокатываемой заготовки, ее изменение в процессе прокатки (Т,0С), а также ее распределение по ширине и длине очага деформации;
- 4) обжатие прокатываемой заготовки (ε ,%);
- 5) скорость прокатываемой заготовки (V_p , м/с).

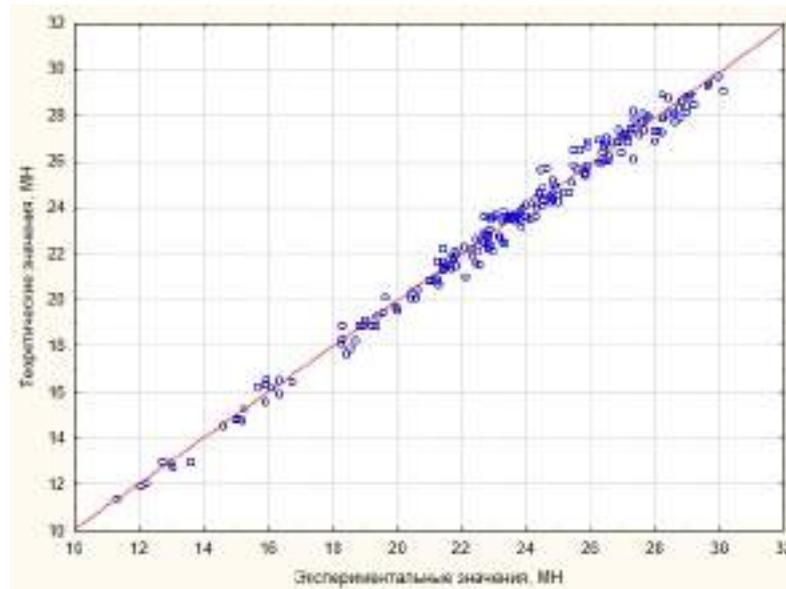


Рис. 2.16. Теоретические и экспериментальные значения усилия прокатки (N, MN) модели процесса листовой горячей прокатки

Таблица 2.3

Результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных результатов математического моделирования

| № | Марка (профиль) | Усилие прокатки, MN | | Обжатие заготовки, % | | Скорость прокатки, м/с | |
|---|----------------------|---------------------|----------------|----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| | | N | $\Delta N, \%$ | ε | $\Delta\varepsilon, \%$ | $V_{п}$ | $\Delta V_{п}, \%$ |
| 1 | SAE -1006 (2,0x1250) | 22,92 | 1,82 | 48,22 | 2,33 | 2,02 | 4,71 |
| | | 22,51 | | 47,12 | | 2,12 | |
| 2 | St 37-2 (2,0x1000) | 20,42 | 4,6 | 31,5 | 3,96 | 2,03 | 3,33 |
| | | 19,51 | | 30,3 | | 2,1 | |
| 3 | 09Г2Д (4,0x885) | 15,60 | 0,97 | 40,5 | 1,69 | 1,72 | 4,24 |
| | | 15,45 | | 41,2 | | 1,65 | |
| 4 | 10ХСНД (8,0x1500) | 26,73 | 4,82 | 43,0 | 0,93 | 1,25 | 1,62 |
| | | 25,50 | | 42,6 | | 1,23 | |
| 5 | 10Г2ФБЮ (10,30x1668) | 26,70 | 4,09 | 38,6 | 3,76 | 1,15 | 4,1 |
| | | 25,65 | | 37,2 | | 1,2 | |

Примечание: в числителе приведены данные полученные по результатам моделирования
в знаменателе экспериментальные данные, полученные из цеховых данных.

Выводы по результатам моделирования

В специализированном программном комплексе «Deform–3D» реализована конечно-элементная модель процесса листовой горячей прокатки. Получены численные значения технологических параметров для системы «заготовка – горячая прокатка – горячекатаная полоса»: интенсивность напряжений (σ_i , МПа), усилия прокатки (N, T), температура прокатываемой заготовки и ее распределение по длине и ширине очага деформации, (Т), $^{\circ}\text{C}$; усилие прокатки (N, МН), обжатие (ϵ , %), скорость прокатки (V, м/с).

Достоверность математической модели определялась путем сравнения теоретических и фактических (экспериментальных) данных по нескольким критериям: усилие прокатки (N, МН), обжатие заготовки (ϵ , %), скорость прокатки (V, м/с). Сравнительный анализ проводился с применением пакета программ «STATISTICA». Выборочные результаты по критерию «усилие прокатки» (N, МН) представлены на рисунке 2.16. Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 2.3. Анализ результатов процесса моделирования более чем 200 различных марок сталей и их типоразмеров установил, что средняя величина ошибки составляет 1,6%, максимальная величина ошибки не превышает 9,1%, среднее квадратичное отклонение составляет 0,283 МН, что позволяет признать модель достоверной.

На основе полученных результатов моделирования процесса контактного взаимодействия в технологической системе «заготовка- горячая прокатка – горячекатаная полоса» разработан программный продукт и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Расчет параметров контактного взаимодействия в технологической системе «заготовка – стан горячей прокатки – полоса» Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021666369, 13.10.2021 Заявка № 2021665614 от 11.10.2021 [2.12].

2.2. Разработка универсальной математической модели на примере непрерывных листовых станов горячей прокатки, позволяющей исследовать технологические процессы при прокатке заготовки в черновой и чистовой группах клетей стана

Исследование технологических процессов при горячей прокатке возможно на основе построения моделей по изучению изменения технологических параметров, характеризующих эти процессы. К основным технологическим параметрам, характеризующим технологию прокатки, относятся: энергосиловые технологические параметры (усилие прокатки, давление, возникающее от нажимных механизмов клетки, момент прокатки, токовая нагрузка главного электродвигателя, скорость прокатки и т.д.), деформационные технологические параметры (скорость деформации, абсолютная и относительная величины степени деформации, обжатие), технологические параметры, влияющие на качество готового проката (износ профиля валка, температурные условия прокатки, наличие окалины на поверхности металла, эксплуатация систем смазывания валков и т.д.).

Кроме всего прочего технология листовой горячей прокатки предусматривает использование смазочных материалов (СМ) в качестве технологической смазки контактирующих поверхностей в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса». В качестве СМ в широкое применение нашли: эмульсии, водомасляные смеси, однородные и неоднородные смазочные смеси и т.д.

Математическое моделирование процесса листовой горячей прокатки позволяет решить теоретические вопросы функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса».

В соответствии с данным подходом разработанная математическая модель состоит из трех моделей каждая из которых описывает определенный технологический процесс:

математическая модель, описывающая режимы нагружения привода рабочих клеток;

математическая модель, описывающая износ валков (рабочего и опорного);

математическая модель эффективного смазывания валков.

2.2.1. Разработка модели характеризующей процесс нагружения главного привода рабочих клеток листового стана горячей прокатки

Задачей исследования является разработка прогнозной модели, позволяющей на этапе составления монтажных партий (с вероятностью не менее $P(t)=80\%$)

выдавать практические рекомендации по загрузке клетей стана, в том числе для технологии листовой горячей прокатки с применением жидких СМ.

На основе математико-статистического подхода (регрессионного анализа) была получена математическая модель для прогнозирования параметра «Сила тока» электродвигателей чистовой группы клетей листового стана горячей прокатки.

В модель были включены количественные, и качественные переменные, представленные на рисунке 2.17.

Для учета влияния качественных параметров в модель были введены переменные принимающие значения 0 или 1, где: 1–прокатка с применением СМ; 0–прокатка без применения СМ.

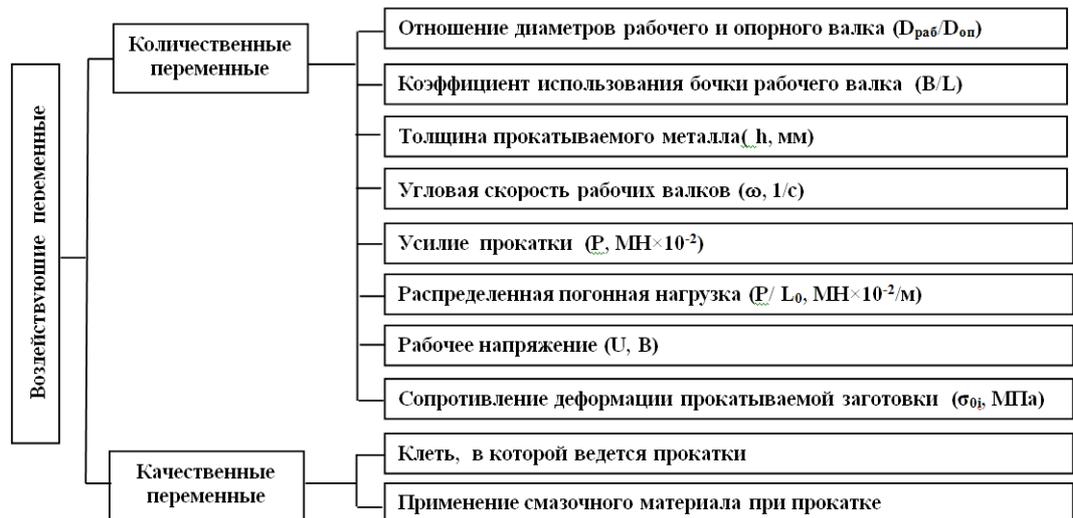


Рис. 2.17. Переменные для построения прогнозной модели параметра «Сила тока» электродвигателей чистовой группы клетей

Z1(1;0)– подача СМ материал в первой клетии стана;

Z2(1;0)– подача СМ во второй клетии стана;

Z3(1;0)– подача СМ в третьей клетии стана.

Z4i– режимы подачи СМ, включающие в себя:

Z41– Режим подачи СМ №1. Расход СМ=0,09-0,24 мм³/мин;

Z42– Режим подачи СМ № 2. Расход СМ =0,12-0,020 мм³/мин;

Z43 – Режим подачи СМ № 3. Расход СМ =0,05-0,013 мм³/мин;

Z44 – Режим подачи СМ № 4. Расход СМ =0,04-0, мм³/мин;

Z45 – Режим подачи СМ № 5. Расход СМ = 0,03-0,012 мм³/мин.

В качестве исходных данных были приняты фактические данные процесса листовой горячей прокатки (рапорт прокатки на НШСГП 2000 ПАО «ММК») за период с 01.01.2019 г. по 30.09.2019 г., а также:

режимы подачи СМ;

значения параметра «Сила тока», (А) по клетям чистовой группы;

значения технологического параметра «Усилие прокатки», (МН) по клетям чистовой группы.

Для решения поставленной задачи использовалась аналитическая платформа Deductor Studio Academic 5.2 и пакет программ Statistica. Оценка коэффициентов регрессионного уравнения были найдены с помощью обобщенного метода наименьших квадратов. Для исключения из модели незначимых переменных была применена процедура последовательного исключения факторов из модели.

Получено уравнение регрессии (2.1), позволяющее определять значения силы тока для чистовой групп клетей $(I_{(i,j)}^{1,0}, A)$ листового стана горячей прокатки.

$$I_i^{(1,0)} = 2 \times (-1142,5 + 3761,912 \times \frac{P_i^{(1,0)}}{L} - (870,76 \times Z_1^{(1,0)}) + 320,15 \times \frac{b}{L} - (698,17 \times Z_2^{(1,0)}) + 47,3 \times h - (1387,18 \times Z_3^{(1,0)}) + 1,12 \times U_i^{(1,0)} - 76,16 \times \omega_i^{(1,0)} + 3554,19 \times \frac{D_{паб}}{D_{он}} - 19,16 \times \sigma_0 - [1253,7 \times Z_{41}] - 1190,67 \times Z_{42} - 803,51 \times Z_{43} - 767,32 \times Z_{44} - 667,32 \times Z_{45}]$$

$$(R^2 = 0,80; F_{0,80;6}^{расч} = 1753 \geq F^{табл} = 2,54)$$
(2.1)

где $P_i^{(1,0)}$ –усилие прокатки в i-ой клетю, МН; Z_{ij} – фиктивные переменные, показывающие наличие/отсутствие СМ в i-ой клетю; $U_i^{(1,0)}$ –напряжение в i-ой клетю, В; $\omega_i^{(1,0)}$ – угловая скорость вращения валков в i-ой клетю, об/мин; L – диаметр опорного рабочего валка в i-ой клетю, мм; b – диаметр рабочего валка в i-ой клетю, мм.

Все возможные значения комбинаций значений фиктивных переменных, для определения параметра «Сила тока», приведены в таблице 2.4. и 2.5.

Комбинации значений фиктивных переменных для модели прогнозирования параметра «Сила тока» по критерию $Z_i(1;0)$

| № п/п | № клетки | Применение СМ | $Z_1(1;0)$ | $Z_2(1;0)$ | $Z_3(1;0)$ |
|-------|-------------|---------------|------------|------------|------------|
| 1 | 1-ая клетка | Да | 1 | 0 | 0 |
| 2 | | Нет | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 2-ая клетка | Да | 0 | 1 | 0 |
| 4 | | Нет | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 3-ая клетка | Да | 0 | 0 | 1 |
| 6 | | Нет | 0 | 0 | 0 |

Таблица 2.5

Комбинации значений фиктивных переменных для модели прогнозирования параметра «Сила тока» по критерию Z_4i

| № п/п | Переменная, учитывающая подачу СМ Z_4i | Применение СМ | Z_{41} | Z_{42} | Z_{43} | Z_{44} | Z_{55} |
|-------|--|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | Z41– Режим подачи СМ №1 | Да | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | Нет | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | Z41– Режим подачи СМ №2 | Да | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | Нет | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | Z41– Режим подачи СМ №3 | Да | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | | Нет | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | Z41– Режим подачи СМ №4 | Да | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | | Нет | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Z41– Режим подачи СМ №5 | Да | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | | Нет | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Апробация модели

Пример прогнозирования параметра «Сила тока» для марки стали 08пс с размерными характеристиками 3,2 мм×1275 мм с применением СМ представлен в таблице 2.6. Аналогичный расчет был произведен для широкого сортамента прокатываемых заготовок, включающих в себя около 200 различных марок и их типоразмеров.

Анализ полученных результатов, представленных на рисунке 2.17, показывает, что разработанная прогнозная модель обладает достаточно высокой точностью прогнозирования, для которой средняя величина ошибки составляет 4%,

максимальная величина ошибки не превышает 16,6%, среднее квадратичное отклонение составляет 412,5 кА, что позволяет признать модель достоверной.

Таблица 2.6

Пример прогнозирования энергосиловых параметров для марки стали 08пс с размерными характеристиками 3,2x1275 мм при работающей системе подачи СМ

| № клетки | Угловая скорость валков (ω , 1/с) | Рабочее напряжение (U, В) | Распред. погонная нагрузка (P/L0, МН·10 ⁻² /м) | Коэф. Испол-ия бочки рабочего валка (B/L) | Отношения диаметров в бочках (Dоп/Dраб.) | Сила тока (I, А) прогн. | сила тока (I, А) набл. | Абс. Ошибка (А) | Относит. ошибка (%) |
|-------------|---|---------------------------|---|---|--|-------------------------|------------------------|-----------------|---------------------|
| 1-ая клетка | 4,576 | 694,77 | 1,106 | 0,637 | 0,870 | 8560,3 | 9333,8 | 773,5 | 8,29 |
| 2-ая клетка | 6,799 | 879,91 | 0,957 | 0,637 | 0,870 | 6740,6 | 7206,0 | 465,4 | 6,46 |
| 3-ая клетка | 10,78 | 735,30 | 0,7165 | 0,637 | 0,870 | 6773,8 | 6821,3 | 47,5 | 0,70 |

Разработана прогнозная модель, позволяет на этапе составления монтажных партий (с вероятностью не менее $P(t)=80\%$) выдавать практические рекомендации по загрузке клеток стана, в том числе и определять эффективность процесса листовой горячей прокатки по предложенному критерию эффективности $(I_{(i,j)}^{эф.пром})$. По результатам теоретических и промышленных исследований произведена оценка показателя эффективности $(I_{(i,j)}^{эф.пром})$. Результаты исследований систематизированы и приведены в таблице 2.7.

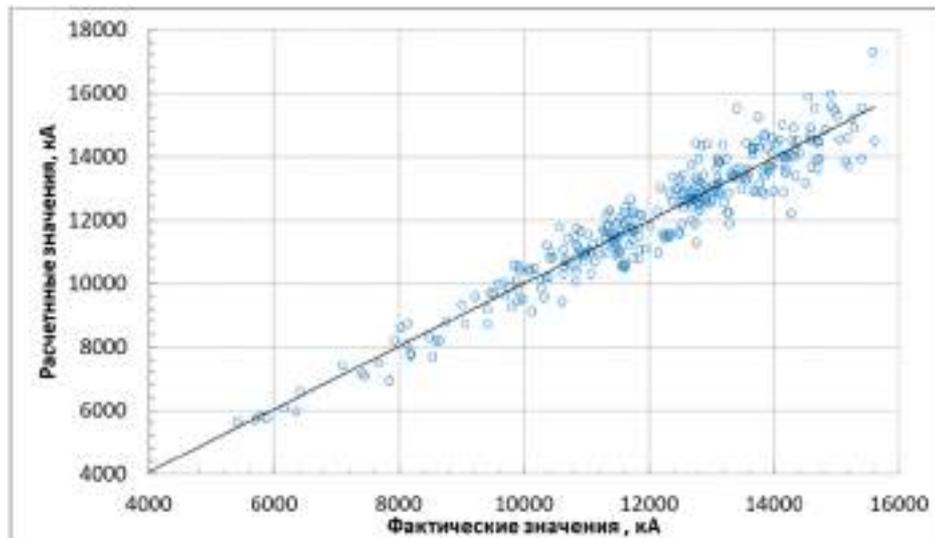


Рис. 2.17. Расчетные (прогнозная) модель и фактические значения параметра «Сила тока»

Таблица 2.7

Расчетное значение показателя эффективности $(I_{(i,j)}^{эф.пром})$

| Непрерывная чистовая группа клеток | параметр «Сила тока», А | | Показатель эффективности (Э) |
|--|--------------------------------|-------------------------------|---|
| | $I_{(i,j)}^0$ без подачи СМ | $I_{(i,j)}^1$ с подачей СМ | $I_{(i,j)}^{эф.пром} = \frac{I_{раб(i,j)}^0}{I_{раб(i,j)}^1}$ |
| Режим 1. Расход СМ=0,09-0,24 мм ³ /мин | | | |
| 1-ая клеть | 8432...85230 | 8113...8126 | 1,08...1,12 |
| 2-ая клеть | 7839...7976 | 6931...6990 | 1,06...1,11 |
| 3-ая клеть | 8420...8543 | 7746...7856 | 1,08...1,13 |
| Режим 2. Расход СМ=0,12-0,020 мм ³ /мин | | | |
| 1-ая клеть | 8271...8290 | 7506...7552 | 1,07...1,11 |
| 2-ая клеть | 8195...8200 | 8080...8120 | 1,06...1,12 |
| 3-ая клеть | 8947...8993 | 8148...8189 | 1,08...1,12 |
| Режим 3. Расход СМ=0,05-0,013 мм ³ /мин | | | |
| 1-ая клеть | 6605...6632 | 6458...6520 | 1,08...1,11 |
| 2-ая клеть | 6930...6958 | 6792...6860 | 1,07...1,12 |
| 3-ая клеть | 10262...10310 | 9576...9675 | 1,07...1,13 |
| Режим 4. Расход СМ=0,04-0, мм ³ /мин | | | |
| 1-ая клеть | 10795...10850 | 9812...9935 | 1,08...1,12 |
| 2-ая клеть | 9552...9620 | 8074...8112 | 1,06...1,11 |

| | | | |
|--|---------------|-------------|-------------|
| 3-ая клеть | 9548...9580 | 9272...9358 | 1,08...1,13 |
| Режим 5. Расход СМ=0,03-0,012 мм ³ /мин | | | |
| 1-ая клеть | 10795...10860 | 9812...9880 | 1,07...1,11 |
| 2-ая клеть | 9552...9615 | 8074...8123 | 1,06...1,12 |
| 3-ая клеть | 9548...9632 | 9272...9315 | 1,07...1,12 |

2.2.2. Математическое моделирование процесса изнашивания рабочих валков листовых станов горячей прокатки

Наиболее адекватным параметром, позволяющим оценивать функционирование системы «опорный валок–рабочий валок-полоса» является энергетический показатель изнашивания (J_{эн}).

На листовых станах горячей прокатки применяется технология получения заготовок монтажными партиями. Каждая монтажная партия состоит из различных прокатываемых марок сталей (в том числе по длине и ширине), и ограничена эксплуатационной стойкостью (износом) рабочих или опорных валков.

Технологией заложено, что для каждой *i*-ой монтажной партии СМ подается на каждую из прокатываемых полос. При этом в технологии заложено ряд условий, при которых подача СМ не применяется. Учитывая, что время эксплуатации (межперевалочный период) может составлять до 150...180 часов для опорных и до 5...8 часов для рабочих валков, оценить величину износа опорных валков зачастую не представляется возможным. В дальнейшем в работе будет исследовано влияние СМ на характеристику изнашивания рабочих валков с учетом влияния факторов функционирования системы «опорный валок-рабочий валок – полоса».

Математическая модель изнашивания рабочего валка основана на известных подходах, базирующихся на работах [2.13 - 2.19], в основу которых заложена базовая энергетическая теория изнашивания твердых тел [2.13, 2.16, 2.17].

$$\Delta V(t) = J_{ij(0,1)}^{\text{эн}} \cdot A_{\text{тр}ij(0,1)}(t) = J_{ij(0,1)}^{\text{эн}} \cdot N_{\text{тр}ij(0,1)} \cdot t, \text{ мм} \quad (2.2)$$

где $J^{\text{эн}}$ – энергетический показатель изнашивания рабочего валка, мм³/Нм;
 $N_{\text{тр}}$ – мощность, затраченная на преодоления сил трения, Вт;

В выражении 1 индексы описывают следующие: 0 – процесс прокатки происходит без применения СМ; 1 – с применением СМ; i - номер клетки; j - положение валка (верхний/нижний).

При математическом описании процесса изнашивания рабочих валков листовых станов горячей прокатки принимаем допущения, что рабочий валок выходит из строя по износу его рабочих поверхностей.

Поскольку на практике износ рабочих валков оценивают по его линейной величине (ΔR – для прокатного валка), характеристики определим из условия:

$$\Delta V_i = V_{i(0)} - V_{i(1)} \quad (2.3)$$

где $V_{i(0)}$ - объем валка с исходным профилем;

$V_{i(1)}$ - объем валка с изношенным профилем.

Определение объема изношенного материала рабочего валка

Износ поверхностей рабочих валков происходит за счет сил трения в подсистемах «рабочий валок – полоса» и «рабочий валок – опорный валок».

При решении задачи принимаем условия, что износ поверхностей рабочих валков прокатного стана может происходить как равномерно, так и неравномерно.

Определение равномерного и неравномерного износа рабочего валка.

На рисунке 2.18 приведена расчетная схема для определения износа рабочего валка. Центральная точка 0, находится в геометрическом центре бочки валка.

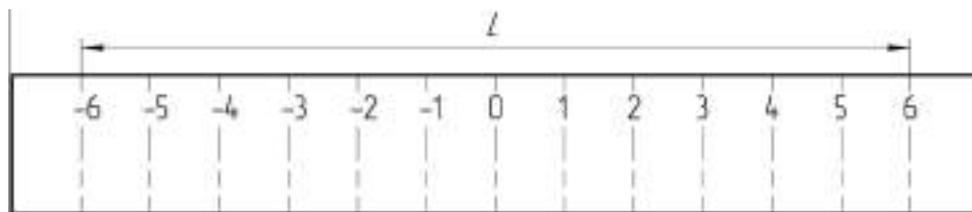


Рис. 2.18. Схема для определения равномерного и неравномерного износа рабочего валка.

Считаем, что число зон « n » может быть различным, но обязательно четным числом, которое делится на 2.

Из N зон $N/2$ имеют положительный номер от 1 до $+N/2$, $N/2$ зон имеют отрицательный номер от -1 до $-N/2$, где: L – длина бочки валка мм, ΔL_N - длина зоны, мм.

Длины всех зон обладают условием равенства между собой.

$$\Delta L_1 = \Delta L_{-1} = \Delta L_{N/2-1} = \Delta L_{-(N/2)-1} = \Delta L_{N/2} = \Delta L_{-N/2}.$$

Число левых от точки 0 зон должно быть равно $N/2$ и число правых от точки 0 зон также равно $N/2$, т.е. число зон расположенных слева от точки 0 должно быть равно числу зон расположенных справа точки 0.

Считаем, что перед прокаткой, рабочий валок имеет определенный типоразмер, т.е. в каждой точке определенный диаметр $-N/2 \dots -3; -2; -1; 0; 1; 2; 3 \dots$, который обозначим как D_i , где $i = -N/2 \dots -2; -1; 0; 1; 2 \dots N/2$.

После вывалки валка (завершения процесса прокатки) за счет износа диаметры $D_{-N/2}; D_{-2}; D_{-1}; D_0; D_1; D_2 \dots D_{N/2}$ уменьшат свои значения до $D'_{-N/2}; \dots D'_{-2}; D'_{-1}; D'_0; D'_1; D'_2; D'_{N/2}$.

Необходимо выполнение неравенства:

$$D'_{-N/2} \leq D_{-N/2}; D'_{-2} \leq D_{-2}; D'_{-1} \leq D_{-1}; D'_0 \leq D_0; D'_1 \leq D_1; D'_2 \leq D_2; D'_{N/2} \leq D_{N/2}.$$

Абсолютное изменение диаметра валка в точке $i = -N/2 \dots -1; 0; 1 \dots +N/2$ можно определить, как разность диаметров до прокатки и после прокатки, в каждой зоне с i :

$$D_i - D'_i = \Delta D_i. \quad (2.4)$$

Относительное изменение диаметра в каждой зоне с i можно определить:

$$\eta_i = \frac{\Delta D_i}{D_i} \cdot 100\% = \frac{D_i - D'_i}{D_i} \cdot 100\%. \quad (2.5)$$

Боковая поверхность (образующая валка) может иметь три геометрических вида, представленных на рисунке 2.19:

цилиндрическая форма (рис. 2.19а)

$$D_i = const, \quad D_{-N/2} = D_{-1} = D_0 = D_1 \dots D_{N/2}; \quad (2.6)$$

эллипсоид вращения (выпуклый формы вдоль большой оси вращения) (рис. 2.19б)

$$\begin{aligned} D_0 &= D_{\max} \square D_{-1} = D_1 < D_0; \\ D_{-2} &= D_2 < D_1 = D_{-1}; \\ D_{-N/2} &= D_{N/2} < D_{-(N/2-1)} = D_{+(N/2-1)}; \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$D_{-N/2} = D_{N/2} = D_{min.}$$

однополостной гиперboloид вращения (вогнутой формы вдоль большой оси вращения) (рис. 2.19в)

$$D_0 = D_{min.}$$

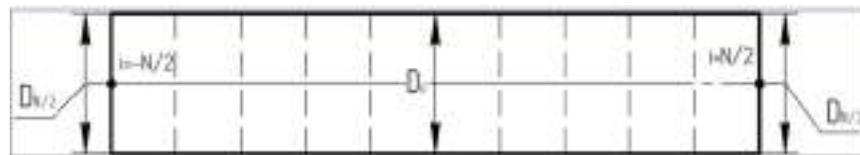
$$D_{-N/2} = D_{N/2} = D_{max.}$$

$$D_{-1} = D_1 > D_0;$$

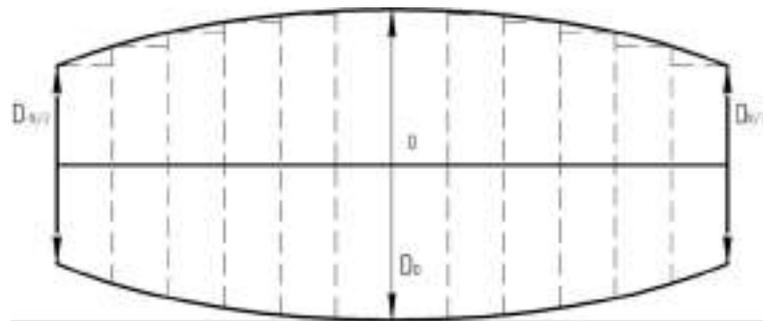
(2.8)

$$D_{-2} = D_2 > D_1 = D_{-1};$$

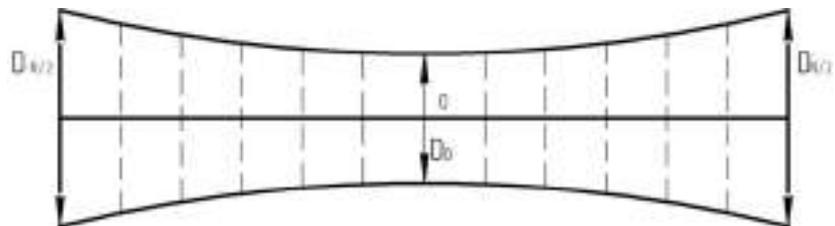
$$D_{-N/2} = D_{N/2} = D_{-(N/2-1)} = D_{(N/2-1)}.$$



а) Валок цилиндрической формы



б) Валок в форме эллипсоида вращения



в) Валок в форме однополостного гиперboloида вращения

Рис. 2.19. Формы валков прокатных станов

Будем считать, что износ валка будет называться равномерным, если новая образующая линия боковой поверхности валка после износа будет эквидистантна образующей линии боковой поверхности, которую валок имел до износа.

Если в результате износа образующая линия боковой поверхности не будет в точности параллельна образующей линии боковой поверхности до износа, то такой износ будет называться неравномерным.

Для описания равномерного износа рабочего валка, рассмотрим две параллельные, которые представим, как образующие линии боковой (образующей) поверхности валка до износа и после.

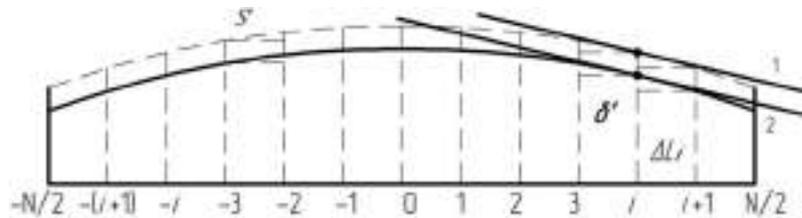


Рис. 2.20. Равномерный износ боковой (образующей) поверхности валка:

s' - образующая линия боковой поверхности до износа;

$\frac{s''}{\square}$ - образующая линия боковой поверхности после износа

Условие параллельности образующих линий s' и $\frac{s''}{\square}$. В точке i к образующим линиям s' и $\frac{s''}{\square}$ проведем касательные 1 и 2. Считаем, что износ равномерный, то в произвольной точке i касательная 1 будет параллельна касательной 2. Это свойство распространяется на все точки i от $-N/2$ до $N/2$. Тангенс угла наклона α касательной в этой же точке i для образующей линии $\frac{s''}{\square}$. Тангенсы $\operatorname{tg}\alpha_i$ и $\operatorname{tg}\alpha'_i$ определяются из треугольников, построенных на стороне ΔL_i и $\left(\frac{D_i}{2} - \frac{D_{i+1}}{2}\right)$ или ΔL_i и $\left(\frac{D_i}{2} - \frac{D_{i+1}}{2}\right)$. Получим следующее выражение:

$$\operatorname{tg}\alpha_i = \frac{\left|\frac{D_i}{2} - \frac{D_{i+1}}{2}\right|}{\Delta L_i} = \frac{1}{2} \left[\frac{D_i - D_{i+1}}{\Delta L_i} \right], \quad (2.9)$$

где D_i ; D_{i+1} - диаметры валка в точках i ; $i + 1$ до износа.

Если образующая линия S^* параллельна образующей линии S , тогда должно выполняться равенство:

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \operatorname{tg} \alpha_{i+1}. \quad (2.10)$$

Равенство, используя правые части уравнений (2.9).

Или модули в виде двух равенств.

$$D_i - D_{i+1} = D_i' - D_{i+1}'; \quad (2.11)$$

$$D_{i+1} - D_i = D_{i+1}' - D_i'. \quad (2.12)$$

Равенство (2.11) относится для выпуклого валка, а равенство (2.12) для вогнутого валка после преобразования имеем выражения вида:

$$D_i - D_i' = D_{i+1} - D_{i+1}' \quad (\text{валок выпуклой формы})$$

$$\Delta D_i = \Delta D_{i+1} \quad \Delta D_i > 0; \quad (2.13)$$

$$D_i' - D_i = D_{i+1}' - D_{i+1} \quad (\text{валок вогнутой формы})$$

$$\Delta D_i = \Delta D_{i+1} \quad \Delta D_i > 0; \quad (2.14)$$

$$D_i' - D_i = D_{i+1}' - D_{i+1} \quad (\text{валок цилиндрической формы})$$

$$\Delta D_i = \Delta D_{i+1} \quad \text{или} \quad \Delta D_i = \Delta D_k. \quad (2.15)$$

При равномерном износе изменение диаметра D_i в любой точке центральной продольной оси i ΔD_i должно происходить на одну и ту же величину.

Изменение диаметра ΔD_i по длине бочки валка при износе есть величина постоянная: $\Delta D_i = \text{const}$ и не зависит от вида боковой (образующей) поверхности валка

В случае неравномерного износа в различных частях боковой (образующей) поверхности валка степень износа будет различной.

В том случае изменение диаметра валка в различных точках i будет различна, для которой можно записать выражение:

$$\Delta D_i \neq \Delta D_k. \quad (2.16)$$

При равномерном износе величины относительного изменения диаметра валка в различных зонах будут иметь разные значения.

$$\eta_i = \frac{\Delta D_i}{D_i} \cdot 100\% \quad \text{в } i - \text{ зоне} \quad (2.17)$$

$$\eta_k = \frac{\Delta D_k}{D_k} \cdot 100\% \quad \text{в } k - \text{ зоне}$$

Так как $\Delta D_i = \Delta D_k$ при равномерном износе, а $\Delta D_i \neq \Delta D_k$, то

$$\eta_i \neq \eta_k. \quad (2.18)$$

Определение объема износа поверхности рабочего валка

Введем декартовую систему координат X, Y, Z . Направим ось OZ системы вдоль к центру валка, а центр системы координат O поместим в геометрический центр бочки валка. Декартова система координат X, O, Z бочки валка показана на рисунке 2.21.

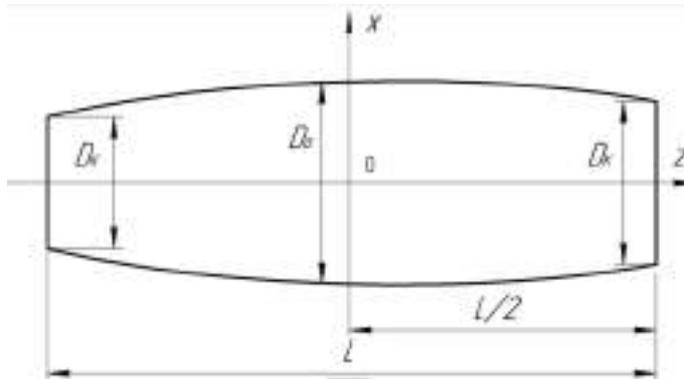


Рис. 2.21. Бочка валка в системе координат XOZ

Уравнение, образующую боковую поверхность валка, в системе координат XOY , в общем виде равно $y = f(z)$ или $x = f(z)$.

Бочка валка является телом вращения вокруг оси OZ , определим объем бочки валка, как объем тела вращения вокруг оси OZ .

Кривая, образующая боковую поверхность тела вращения (меридиан), для случая бочки валка, уравнения меридиана в общем виде выразим: $y = f(z)$ или $x = f(z)$. Тогда объем поверхности определяется:

$$V = \pi \int_{z_1}^{z_2} [f(z)]^2 dz. \quad (2.19)$$

Применение выражения (3.34) более удобно, если вычислить сначала объем полубочки валка, а затем удвоить полученные значения: $V = 2 \cdot V_{1/2}$, где:

$$V_{1/2} = \pi \int_0^{L/2} [f(z)]^2 dz, \quad (2.20)$$

$$V = 2\pi \int_0^{L/2} [f(z)]^2 dz, \quad (2.21)$$

где L – длина бочки валка.

Вводим допущение, что если процесс прокатки полосы производится на всю длину бочки, тогда износ поверхности будет происходить также по всей длине бочки L .

В результате износа уравнение меридианы будет иметь вид:

$$y = f_k(z) \quad \text{или} \quad x = f_k(z); \quad (2.22)$$

Объем бочки валка после прокатки можно найти с помощью формулы:

$$V' = 2\pi \int_0^{L/2} [f_k(z)]^2 dz, \quad (2.23)$$

где V' - объем валка после прокатки.

Из-за процесса износа валка всегда будет соблюдаться условие $V' \leq V$.

Определим износ бочки валка, который произошел в процессе прокатки по всей длине бочки валка:

$$\Delta V = V - V'; \quad (2.24)$$

$$\Delta V = 2\pi \int_0^{L/2} [f(z)]^2 dz - 2\pi \int_0^{L/2} [f_k(z)]^2 dz \quad \text{или}$$

$$\Delta V = 2\pi \int_0^{L/2} [f(z)]^2 - [f_k(z)]^2 dz. \quad (2.25)$$

Здесь ΔV - объем износа бочки при прокатке полосы, ширина которой b равна длине бочки валка L_i

$$b = L_i. \quad (2.26)$$

Для случая, когда ширина прокатываемой полосы b_i меньше длины бочки рабочего валка L_i :

$$b_i \leq L_i. \quad (2.27)$$

Для случая (2.27), в процессе прокатки будет задействована только зона рабочего валка, которая симметрична, относительно середины бочки валка, длиной ΔL_i .

$$b_i \leq \Delta L_i. \quad (2.28)$$

Для определения объема износа ΔV материала, который происходит в процессе прокатки необходимо вместо длины бочки валка L_i принять величину равной длине прокатки $\Delta L_i = b$, или:

$$\Delta V = 2\pi \int_0^{b/2} [f(z)]^2 - [f_k(z)]^2 dz, \quad (2.29)$$

где b – ширина полосы прокатки.

Алгоритм определения объема изношенного материала рабочего валка

Перед процессом прокатки измеряют начальное значение диаметра рабочего валка в центре бочки D_0 и на концах бочки $z = \pm L/2$, где диаметр бочки равен $\pm D_i$. Однако в процессе прокатки активной зоной валка будет являться часть боковой поверхности валка на расстоянии полуширины полосы прокатки $z = \pm b/2$ от точки O – центра бочки рабочего валка.

Износ валка в этом случае осуществляется только в центральной части. Первоначально необходимо определить диаметры валка в точках $\pm l$, которые стоят от центра бочки валка O на расстоянии полуширины полосы $z = \pm b/2$. Для этого, используя значения $D_0; D_{\pm N/2}$, находят уравнение меридианы или в данном случае эллипса, для которых можно записать уравнения, вида: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ или $\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$.

Для данных уравнений необходимо определить коэффициенты a и c . В точке $z = 0$; $y = x = \pm D_0/2$; отсюда $a = \pm \frac{D_0}{2}$; $a^2 = \frac{D_0^2}{4}$. Рассмотрим значение x на концах бочки валка, когда $z = \pm L/2$. Пусть $z = \pm L/2$; $x = y = \pm D_{N/2}/2$; $x^2 = y^2 = \frac{D_{N/2}^2}{4}$. В уравнение эллипса определим неизвестную c .

$$\frac{D_{N/2}^2 \cdot 4}{4 \cdot D_0^2} + \frac{L^2}{4c^2} = 1;$$

$$\frac{L^2}{4c^2} = 1 - \frac{D_{N/2}^2}{D_0^2} = \frac{D_0^2 - D_{N/2}^2}{D_0^2};$$

$$c = \pm \frac{D \cdot L}{2 \sqrt{D_0^2 - D_{N/2}^2}}. \quad (2.30)$$

Уравнение эллипса.

$$\frac{4x^2}{D_0^2} + \frac{4z^2 (D_0^2 - D_{N/2}^2)}{D_0^2 \cdot L^2} = 1;$$

или

(2.31)

$$\frac{4y^2}{D_0^2} + \frac{4z^2 (D_0^2 - D_{N/2}^2)}{D_0^2 \cdot L^2} = 1.$$

Подставим в полученное уравнение эллипса значение $z = \pm b/2$ (полуширина полосы). В этой точке $x = y = D_{i/2}$.

Определим величину диаметра D_i до начала процесса прокатки, когда износ отсутствует.

$$D_i^2 = D_0^2 - \frac{b^2}{L^2} (D_0^2 - D_{N/2}^2).$$

Введем коэффициент N_D и получим равенство:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_D = \frac{D_{N/2}}{D_0}; \\ D_i^2 = D_0^2 - \frac{b^2}{L^2} (1 - N_D^2) \cdot D_0^2; \\ D_i^2 = \pm \frac{D_0}{L} \sqrt{L^2 - b^2 (1 - N_D^2)}. \end{array} \right. \quad (2.32)$$

(2.33)

где $N_D = \frac{D_{L/2}}{D_0}$.

После процесса прокатки полосы необходимо измерить диаметр бочки валка D_0^* в центре и на расстоянии $z = \pm b/2$ от центра бочки валка на расстоянии полуширины полосы проката D_i^* .

Таким образом, по результатам разработанного алгоритма можно сделать следующие выводы.

Предложен и реализован алгоритм, позволяющий аналитически определять объем изношенной поверхности рабочего валка, который учитывает различные формы профилировок рабочих валков: цилиндрическую, выпуклую и вогнутую.

Для определения объема изношенного материала рабочих валков получены аналитические зависимости, отличающиеся от известных подходов тем что, что позволяют определять объем изношенного материала путем замера только по двум контрольным точкам: диаметр бочки валка в центре (D_0) и диаметру бочки валка на расстоянии $z=\pm b/2$.

Предложенный алгоритм позволяет учитывать влияние равномерного и неравномерного износа бочки рабочего валка.

2.2.3. Оценка влияния смазывания опорных валков стана горячей прокатки на изменение основных технологических параметров при прокатке

В настоящее время накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал, характеризующий определение энергосиловых параметров в межвалковом контакте при прокатке. Наиболее известными считаются модели по расчету усилий, с учетом напряженно-деформированного состояния в очаге деформации [2.20-2.23].

Технология листовой горячей прокатки со СМ определяется следующими технологическими особенностями процесса:

выбор способа и места подачи СМ с целью снижения энергосиловых параметров процесса прокатки;

наличие или отсутствие СМ в очаге деформации, которое в свою очередь оказывает влияние на технологические параметры процесса прокатки (усилие прокатки (P , МН), момент на валу главного привода ($M_{дв}$, МН*м)).

Схема подачи жидких СМ в валковые узлы «кварто» приведена на рисунке 2.22.

Согласно многочисленным исследованиям (Горячева И.Г., Елманов И.М., Терентьев Д.В. и др.) толщина смазочного слоя между валками находится в диапазоне $h_0=2...6$ мкм [2.24-2.31].

Исследование параметров контактного взаимодействия в подсистеме «опорный валок-рабочий валок» с наличием СМ было реализовано аналитическим путем на основе результатов моделирования контакта двух цилиндрических тел при больших нагрузках, вызывающих деформацию контактирующих поверх-

ностей. Модель была численно реализована в среде «MS Excel». Статистическая оценка сходимости результатов моделирования проводилась в пакете «STATISTICA».

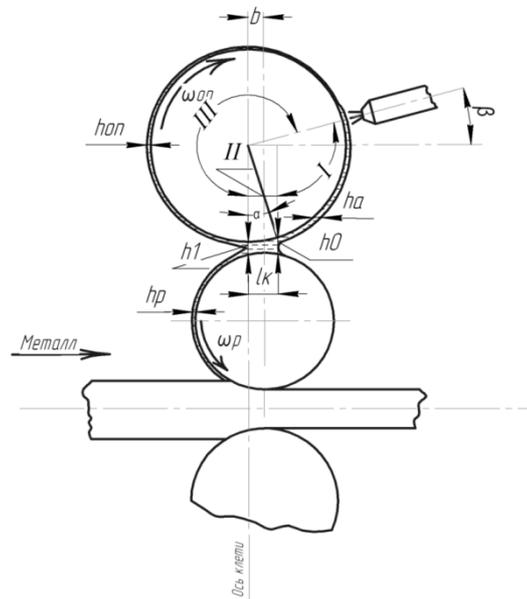


Рис. 2.22. Расчетная схема подачи СМ на листовом стане горячей прокатки 2000 ПАО «ММК» [2.27]:

h_a – толщина адгезировавшегося слоя СМ на поверхности опорного вала, мкм;

h_0 – толщина слоя СМ на контакте «опорный валок-рабочий валок», мкм;

h_p – толщина слоя СМ на поверхности рабочего вала, мкм; h_{0n} – толщина слоя СМ на поверхности опорного вала, мкм.

Для подсистемы «опорный валок–рабочий валок», исходя из заданного условия, что толщина СМ находится в диапазоне $h_0=2\dots6$ мкм, была проведена апробация известных подходов и выданы рекомендации о применимости формул для технологии листовой горячей прокатки с учетом реологии прокатываемой заготовки: в результате получены численные значения коэффициентов, для которых реализуется предложенный режим эластогидродинамического трения:

$$\frac{h_0}{\rho_{\text{гип}}} = \frac{1.064 \cdot \rho_S^{\alpha_1} \cdot \rho_U^{\alpha_2} \cdot \rho_N^{\alpha_3}}{K_1}, \quad (2.34)$$

где K_1 - безразмерный коэффициент, учитывающий уменьшение толщины смазочного слоя за счет разогрева смазки в зоне контакта:

$$K_1 = 1 + P_T^\beta \cdot \lg(0,9 \cdot p_S^{\alpha_1} \cdot p_U^{\alpha_2} \cdot p_N^{\alpha_3}) \quad (2.35)$$

Решения систематизированы в группы, согласно расчетным характеристикам сопротивления деформации прокатываемых заготовок (σ_{0i} , МПа). Численные значения коэффициентов приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Численное значение коэффициентов для определения толщины смазочного слоя на контакте «опорный валок–рабочий валок»

| Сопротивления деформации заготовки (σ_{0i}), МПа | Расчетные значения коэффициентов | | | |
|---|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | $\beta \times 10^{-1}$ | $\alpha_1 \times 10^{-1}$ | $\alpha_2 \times 10^{-1}$ | $\alpha_3 \times 10^{-2}$ |
| 1 69–73 | 4,3...4,9 | 1,0...1,10 | 2,14...2,31 | 7,8...7,9 |
| 2 86–96 | 5,3...5,7 | 1,1...1,27 | 2,31...2,43 | 7,9...8,1 |
| 3 96–116- | 6,5...6,7 | 1,3...1,47 | 2,52...2,59 | 8,2...8,3 |
| 4 116 –125 | 6,9...7,3 | 1,5...1,75 | 2,61...2,76 | 8,5...8,7 |
| 5 125-130 | 7,3...7,5 | 1,8...1,87 | 2,76...2,88 | 8,8...8,9 |
| 6 130 и более | 7,8...7,9 | 1,9...1,94 | 2,91...2,98 | 9,1...9,3 |

Результаты статистической оценки полученных формул (2.34)-(2.35) представлены на рисунке 2.23. Анализ результатов показывает, что расчетные формулы модели (2.33)-(2.34) можно признать достоверными.

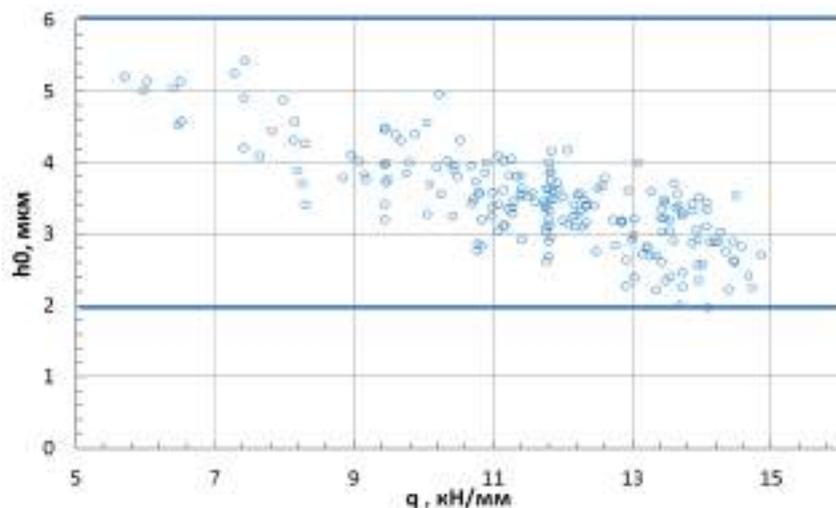


Рис. 2.23. Результаты статистической оценки модели определения толщины смазочного слоя (h_{10} , мкм) (после модернизации)

Далее были проведены теоретические исследования влияния режимов СМ на изменение напряженного состояния в подсистеме «опорный валок-рабочий валок». Исследования были проведены в программном комплексе «Deform-3D».

В результате расчета процесса контактного взаимодействия в подсистеме «рабочий валок – опорный валок» было исследовано изменение значения параметра - интенсивность напряжений (σ_i , МПа) с наличием и отсутствием СМ.

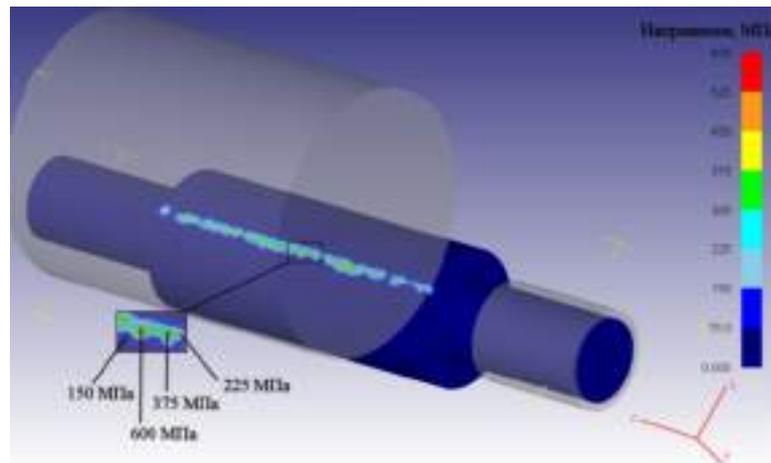


Рис. 2.24 Распределение интенсивности напряжений (σ_i) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок», МПа. Эксперимент 0- смазочный материал отсутствует, $f=0,22$

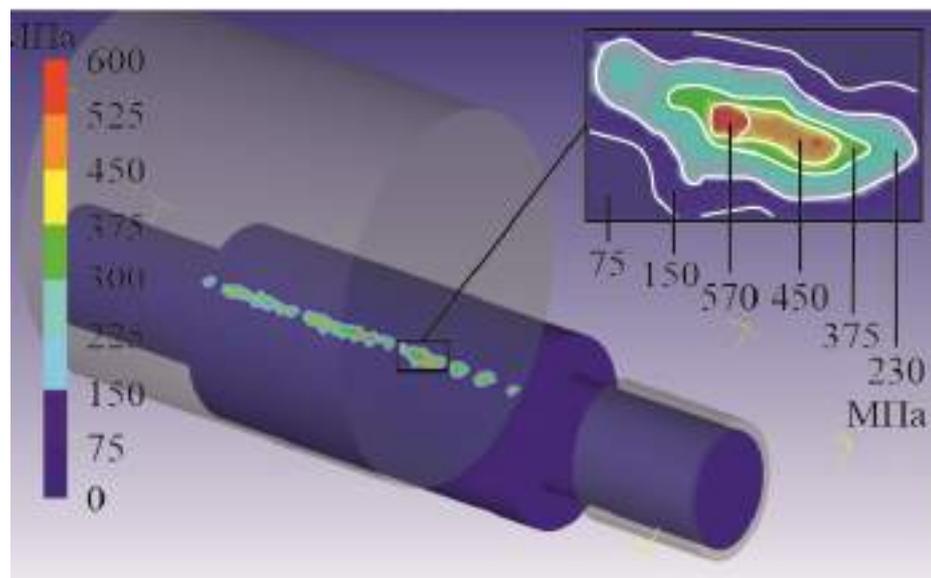


Рис. 2.25 Распределение интенсивности напряжений (σ_i) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок», МПа.

Режим №1; $Q=0,12$ л/мин, $f=0,17$

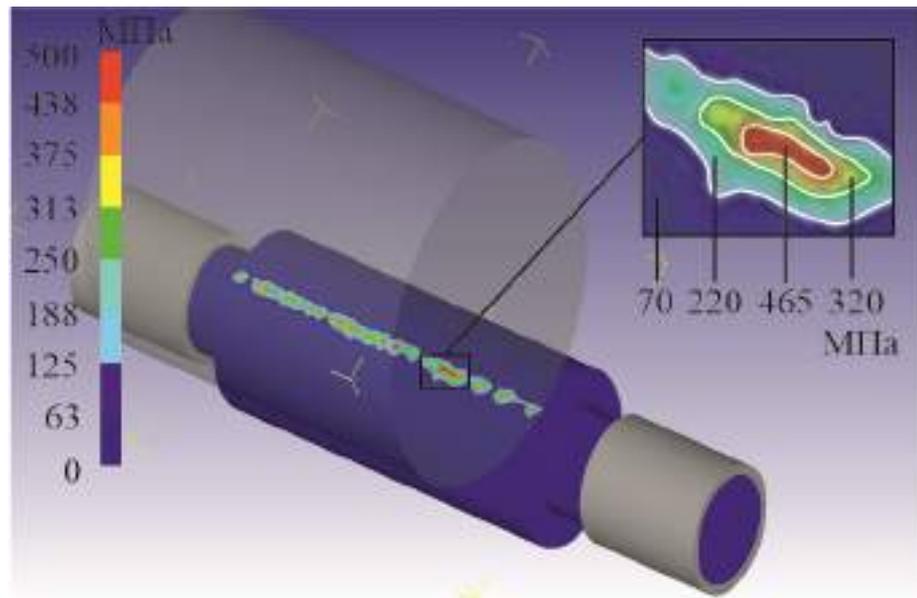


Рис. 2.26 Распределение интенсивности напряжений (σ_i) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок», МПа.

Режим №2; $Q=0,1$ л/мин, $f=0,15$

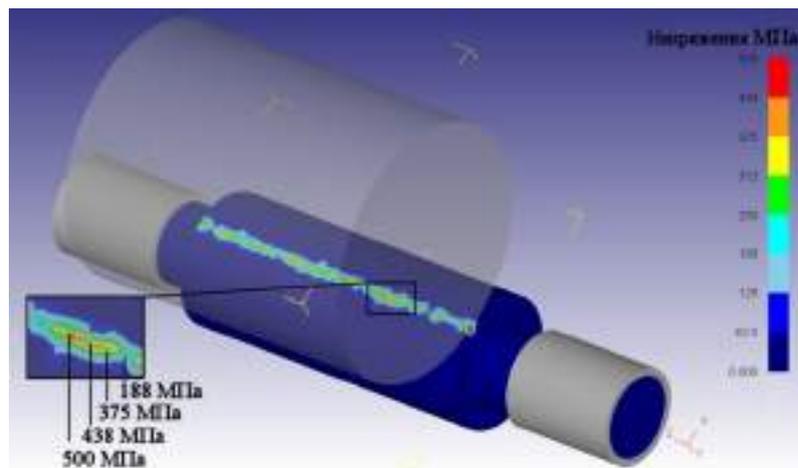


Рис. 2.27 Распределение интенсивности напряжений (σ_i) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок», МПа.

Режим №3; $Q=0,051$, $f=0,13$

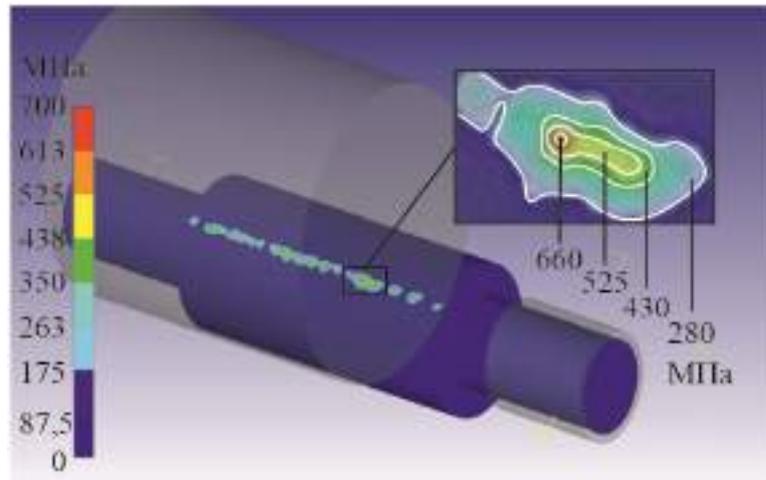


Рис. 2.28 Распределение интенсивности напряжений (σ_i) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок», МПа.

Режим №4; $Q=0,21$, $f=0,10$

Результаты моделирования систематизированы и сведены в таблице 2.9 [2.27-2.31, 2.33,2.34].

Таблица 2.9

Результаты исследований влияния технологической смазки на изменение напряженного состояния на контакте «опорный валок-рабочий валок»

| Технологическая смазка отсутствует | | Подача смазочного материала | | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|---|--------------------------------------|
| Максимальные напряжения в зоне контакта (σ_i), МПа | Среднее значение (σ_i), МПа | Режимы подачи технологической смазки | Расход технологической смазки, (л/мин) | Коэффициент трения | Максимальные напряжения в зоне контакта (σ_i), МПа | Среднее значение (σ_i), МПа |
| 600 | 325 | 1 | 0,12 | 0,17 | 570 | 230 |
| | | 2 | 0,1 | 0,15 | 465 | 265 |
| | | 3 | 0,05 | 0,13 | 500 | 280 |
| | | 4 | 0,21 | 0,10 | 550 | 270 |

Аналогичные исследования были проведены для 200 различных марок сталей и их типоразмеров. Сравнительный анализ проводился с применением пакета программ «STATISTICA».

На основе проведенных исследований сделаны выводы, что применение СМ в рекомендованных режимах позволяют уменьшить напряжения в зоне контакта (σ_i , МПа,) в 1,27...1,34 раза, что составляет 15...18%.

На основе полученных результатов моделирования технологических процессов при прокатке заготовке разработан программный продукт и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Расчет технологических параметров процесса прокатки на широкополосных станах горячей прокатки с учётом их конструктивных особенностей» Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021666514, 15.10.2021, Заявка № 2021665583 от 08.10.2021 [2.33].

2.3. Проведение дополнительных экспериментальных и теоретических исследований теплового состояния системы «инструмент-заготовка» и процессов окалинообразования при горячей прокатки заготовки для уточнения граничных условий разработанной модели контактного взаимодействия

2.3.1 Дифференциальное уравнение теплопроводности

Для описания процессов переноса теплоты в вещественной среде в общем случае используют дифференциальное уравнение теплопроводности [2.36-2.54]. Для описания конкретного процесса переноса теплоты к уравнению необходимо установить «краевые условия». В некоторых случаях система из дифференциального уравнения и краевых условий может быть решена аналитически, однако в большинстве теплофизических процессов аналитическое решение отсутствует.

Для анализа сложных явлений, к которым следует отнести и процессы теплопроводности, сложился общий подход, связанный с использованием методов математической физики. Суть этого подхода состоит в том, что на основании известных физических законов устанавливаются искомые связи в пределах бесконечно малого объема внутри тела и за бесконечно малый промежуток времени. В результате получают дифференциальное уравнение (или систему таких уравнений), описывающее весь класс исследуемых явлений. Для решения конкретных задач это дифференциальное уравнение интегрируют в пределах изучаемого пространства и для заданного

интервала времени, получая таким путем аналитическое решение задачи. Когда из-за сложности уравнений проинтегрировать их в квадратурах не удастся, прибегают к численным методам решения.

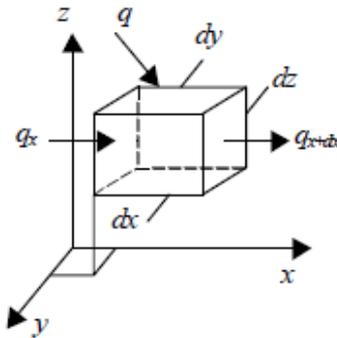


Рис. 2.29. Элементарный объем

Выделим мысленно внутри однородного твердого тела, передающего тепло, элементарно малый параллелепипед со сторонами dx , dy и dz (см. рис. 2.29) и запишем выражение первого закона термодинамики для процесса теплопроводности, протекающего в течение элементарно малого промежутка времени $d\tau$:

$$dU = dQ^* - dL$$

здесь dU – изменение внутренней энергии в выделенном объеме; dQ^* – количество тепла, вносимого в объем теплопроводностью; dL – работа, совершаемая элементом против внешних сил. поскольку дифференциал бесконечно малой величины есть величина бесконечно малая величина второго порядка малости и ею можно пренебрегать. Тогда предыдущая формула упрощается:

$$dU = dQ^* \quad (2.35)$$

Из термодинамики известно, что:

$$dU = c\rho dV \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau \quad (2.36)$$

Величину dQ^* представим тремя слагаемыми

$$dQ^* = dQ_x^* + dQ_y^* + dQ_z^* \quad (2.37)$$

и более подробно рассмотрим лишь составляющую по направлению x . Если через q_x и $q_x + dx$ обозначим удельные тепловые потоки, направленные по оси x , первый из которых входит в элемент, а второй – выходит из него (см. рис. 2.29),

то количество тепла, накапливающееся в выделенном объеме по направлению x , будет:

$$dQ_x^* = (q_x - q_{x+dx}) dydzd\tau \quad (2.38)$$

Поскольку функция $q_x = f(x)$ непрерывна (для распространения тепла нет препятствий), то связь между предыдущим значением функции и ее последующим значением определяется известной формулой Тейлора. Всеми слагаемыми ряда, начиная с третьего, можно пренебрегать как величинами более высоких порядков малости. Тогда формулу (2.36) можно переписать:

$$dQ_x^* = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dVd\tau$$

Аналогичные рассуждения, если рассмотреть направления y и z , позволяют получить аналогичные по структуре выражения для dyQ^* и dzQ^* . Тогда формула (1) может быть представлена так:

$$dQ^* = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dVd\tau \quad (2.39)$$

Сумму частных производных проекций вектора, выделенную скобками, называют дивергенцией вектора и обозначают словом div . Поэтому предыдущее выражение часто записывают по другому:

$$dQ^* = -\text{div}q - dVd\tau$$

Воспользуемся теперь законом Фурье, который в проекциях на координатные оси дает:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}, q_y = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y}, q_z = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z}$$

Подставим эти выражения в формулу (2.37):

$$dQ^* = \lambda \left(\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q_z}{\partial z^2} \right) dVd\tau \quad (2.40)$$

Подставим теперь в формулу (2.35) значения dU и dQ^* по формулам (2.37) и (2.40), соответственно. После сокращения получаем:

$$c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q_z}{\partial z^2} \right)$$

Краевые условия

Основные дифференциальные уравнения сплошности, движения и энергии выражают собой фундаментальные законы сохранения массы импульса (количества движения) и энергии. Кроме того, эти уравнения содержат подтверждаемые экспериментом гипотезы – закон вязкого трения Ньютона и закон Фурье.

Общие решения перечисленных уравнений в частных производных не представляют физического решения. Для решения конкретных гидродинамических и тепловых задач следует сформулировать краевую задачу или условия однозначности. Задание краевых условий заключается в формулировке, во-первых, начальных условий, то есть задании искомых функций в указанных уравнениях в начальный момент времени, который обычно применяется за $\tau=0$, и, во-вторых, граничных условий, которые задаются на поверхности, ограничивающих движущуюся жидкость. Для скорости вязкой жидкости такими условиями будет, как известно, равенство нулю скорости жидкости на неподвижных поверхностях твердых тел, с которыми соприкасается движущаяся жидкость, то есть $\omega=0$. В случае движущегося твердого тела скорости жидкости у этой поверхности должна быть, очевидно, равна скорости поверхности. Эти условия «прилипания» вязкой жидкости являются следствием того, что между поверхностью твердого тела и всякой реальной жидкостью всегда существуют силы молекулярного сцепления, в результате чего непосредственно прилегающий к твердой стенке слой жидкости полностью задерживается, как бы прилипая к стенке.

Что касается уравнения энергии, то для искомой функции – температуры могут быть заданы следующие граничные условия:

граничные условия первого рода, когда задают значения температуры на ограничивающих жидкость поверхностях. В общем случае температура на границе может зависеть от координат точек границе и времени;

граничные условия второго рода, когда на поверхности задана плотность теплового потока, то есть производная от температуры по нормали к поверхности (в виде функции времени и координат точек поверхности);

граничные условия третьего рода, когда тепловой поток предполагается пропорциональным разности температур стенки и жидкости

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{гр}} = \alpha(T_{\text{гр}} - T_1). \quad (2.41)$$

В этом условии должен быть задан коэффициент теплопередачи α , а также температура среды T_1 .

4. Граничные условия четвертого рода, которые сводятся к одновременному заданию равенства температур и тепловых потоков на границе раздела, когда решается задача о теплообмене двух сред (твердое тело – жидкость, тело – тело, жидкость – жидкость), в каждой из которых перенос теплоты описывается своим уравнением энергии;

$$\begin{aligned} T_1 \Big|_{\text{гр}} &= T_2 \Big|_{\text{гр}}; \\ -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_{\text{гр}} &= -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{\text{гр}}. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Эти условия допускают различные модификации в зависимости от физических условий на границе раздела сред.

В заключение следует отметить одно весьма важное обстоятельство. Именно через граничные условия течение жидкости зависит от формы и размеров (диаметр трубы, толщина пластины и так далее) твердого тела, которое взаимодействует с потоком.

Дискретизация

Первым этапом в численном решении дифференциальных уравнений является переход от непрерывной задачи к дискретной. Способ дискретизации – «визитная карточка» численного метода. Получаемые после дискретизации конечно-мерные задачи могут быть похожи, для разных методов, и решаться практически одинаково. Существует ряд численных методов решения дифференциальных уравнений с частными производными, а именно: вариационные методы, методы прямых, конечно-разностные. Одним из наиболее часто используемых - является метод конечных разностей, благодаря своей универсальности и наличию хорошо разработанной теории.

Для применения разностного метода в области изменения переменных G вводят некоторую сетку - заменяют область непрерывно изменяющегося аргумента дискретным множеством конечного размера. Все производные, входящие в уравнение и краевые условия, заменяются разностями в узлах сетки. Получившиеся при этом уравнения называют разностной схемой. Решая полученную алгебраическую систему, находят приближенное (разностное) решение в узлах сетки.

Далее рассмотрим способы выбора сетки и составления разностных схем.

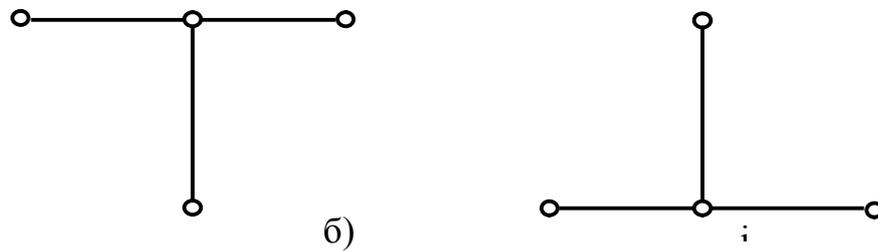


Рис. 2.30. Не явная (а) и явная (б) схема

$$\frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{\tau} = \frac{a}{\Delta x} \left(\frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} - \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{\Delta x} \right), \quad (2.43)$$

$$(b + 2c)T_i^j = cT_{i+1}^j + cT_{i-1}^j + bT_i^{j-1}, \quad (2.43^*)$$

где $\frac{\rho c}{\tau} = b$, $\frac{\lambda}{\Delta x^2} = c$, $\frac{\lambda}{c\rho} = a$.

Схема (2.43) в каждом уравнении содержит только одно значение функции на следующем слое; это значение нетрудно явно выразить через известные значения функции на данном слое, поэтому такие схемы называются явными.

Схема (2.43*) содержит в каждом уравнении несколько неизвестных значений функции на новом слое; подобные схемы называются неявными.

На каждом слое схема представляет собой систему линейных уравнений для определения величин T_i^j правые части этих уравнений известны, поскольку содержат значения с предыдущего слоя. Матрица линейной системы трехдиагональна, и решение можно вычислить алгебраической прогонкой.

Рассмотренный сейчас алгоритм достаточно типичен. Он используется во многих неявных разностных схемах для одномерных и многомерных задач.

Линейная прогонка

Решение дискретного аналога для случая одномерного уравнения теплопроводности можно получить с помощью стандартного метода – метода прогонки.

Для удобства записи алгоритма метода прогонки введем некоторые обозначения. Присвоим узловым точкам, изображенным на рисунке 2.30, номера 1, 2, 3, ..., N. Номера 1 и N относятся к точкам на границе. Дискретный аналог можно записать в следующем виде:

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad (2.44)$$

где $i=1, 2, 3, \dots, N$. Таким образом температура T , связана с соседними значениями T_{i+1}, T_{i-1} . Запись уравнений для узловых точек на границе дает $c_1 = 0, b_N = 0$.

Следовательно, температуры T_0, T_{N+1} не будут, иметь, смысла (в том случае, когда температуры на границе заданы, уравнения для граничных точек записываются в обычной форме, например если T_1 задано, имеет $a_1 b_1 = 0, c_1 = 0, d_1$ равно заданного значения T_1).

Записанные условия означают, что T_1 известна в зависимости от T_2 . Уравнение $i=2$ представляет собой соотношение между T_1, T_2, T_3 . Но поскольку T_1 может быть выражено через T_2 , это соотношение приводится к соотношению между T_2 и T_3 . Другими словами T_2 можно выразит через T_3 . Процесс подстановки может продолжаться до тех пор, пока значение T_N не будет выражено через T_{N+1} . Но поскольку T_{N+1} не существует, мы в действительности на данном этапе получим численное значение T_N . Это позволит нам начать процесс обратной подстановки, в котором T_{N-1} получится из T_N, T_{N-1} . Это и существо алгоритма трехдиагональной матрицы.

Предложим, что при прямой подстановке имеем зависимой

$$T_i = P_i T_{i+1} + Q_i$$

После того, как получено

$$T_{i-1} = P_{i-1}T_i + Q_{i-1} \quad (2.45)$$

Представляя (2.45) в (2.44) получаем следующее соотношение:

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i (P_{i-1} T_i + Q_{i-1}) + d_i,$$

Которое можно привести к виду (2.45). Иначе говоря, коэффициенты P_i и Q_i запишем в виде

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}}; \\ Q_i &= \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Это рекуррентные соотношения определяются P_i и Q_i через P_{i-1} и Q_{i-1} . Заметим, что в начале рекуррентного процесса уравнение (2.46) для $i=1$ по форме совпадает с (2.47). Таким образом, P_i и Q_i определяются в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{b_1}{a_1}; \\ Q_1 &= \frac{d_1}{a_1}. \end{aligned}$$

На другом конце последовательности P_i и Q_i имеем $b_N = 0$. Это дает $P_N = 0$, и из (2.45) получаем

$$T_N = Q_N \quad (2.47)$$

С этого момента осуществляется обратная подстановка с помощью уравнения (2.13).

Краткое описание алгоритма:

Рассчитываем P_i и Q_i из уравнения (2.46).

Используя рекуррентные соотношения (2.47), получаем P_i и Q_i для $i=1, 2, 3, \dots, N$.

Полагаем $T_N = Q_N$.

Используя уравнение (2.45) для $i=N-1, N-2, \dots, 3, 2, 1$, получаем $T_{N-1}, T_{N-2}, \dots, T_3, T_2, T_1$.

Алгоритм, использующий свойство трехдиагональности матрицы, является мощным и удобным методом решения алгебраических уравнений, которые можно представить в виде (2.9).

Метод сетки

При решении задач теплопроводности составляют сеточные уравнения. Методы решения сеточных уравнений в задачах теплопроводности делятся на прямые (метод Гаусса, метод алгебраической прогонки, метод редукции, метод разделения переменных), итерационные (двухслойный итерационный метод, диагональный оператор В, треугольный итерационный метод и др.) и численные.

Приближенное решение задачи теплопроводности осуществляется численными методами (сеточными и проекционными). Сеточные (разностные) методы основаны на переходе от функций непрерывного аргумента к функциям дискретного аргумента. В проекционных методах функции непрерывного аргумента приближаются также функциями непрерывного аргумента. Также существуют и значительно распространены проекционно-сеточные методы (метод конечных элементов). Этот класс методов определяется специальным выбором элементов (конечных элементов).

Сеточные методы являются наиболее универсальным способом решения линейных задач в областях сложной формы, которые не всегда можно решить классическим способом. При решении составляется семейство разностных задач, которое ставится в соответствие непрерывной задаче. Это семейство называют разностной схемой. Разностные схемы применяются как для стационарных, так и для нестационарных задач, но в случаях стационарной и нестационарной теплопередач имеются некоторые различия в разностных схемах. Задача состоит в получении приближенного решения с некоторой заданной точностью. Это достигается на пути перехода от непрерывной задачи к дискретной. При построении дискретной задачи, то есть при аппроксимации уравнений и граничных условий требуется сохранить за разностным решением характеристики искомого решения.

Примером является свойство консервативности - выполнение законов сохранения и для разностной задачи. Консервативные схемы - это разностные схемы, выполняющие законы сохранения на сетке. В отличие от консервативных схем, неконсервативные схемы расходятся в случае разрывного коэффициента теплопроводности. Вторым примером служит свойство монотонности - выполнение принципа максимума и минимума разностного решения. Разностное решение должно сходиться к точному при измельчении сетки.

2.3.2. Численное исследование сложного теплообмена при контактном взаимодействии горячего листа с вальцами при горячей прокатке

Постановка задачи

Для изучения процесса теплообмена в условиях прокатного производства сформулирована следующая задача: Однородный лист с заданной начальной толщиной, скоростью и температурой проходит через заданное количество клеток с вальцами известного радиуса и степенью сжатия. При этом лист охлаждается неподвижным воздухом, а в зоне контакта рабочих валиков с полосой. Требуется найти распределение температуры внутри листа с учетом тепловыделения в процессе деформации листа, конечную толщину и скорость его движения после выхода листа из последней клетки.

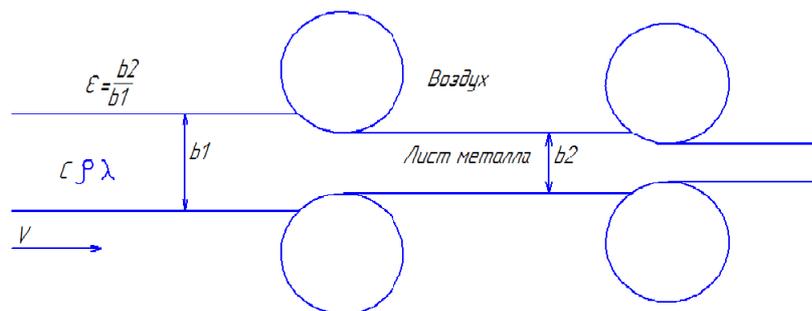


Рис. 2.31 Схема процесса проката (деформации) горячего листа металла

Математическая модель

Математическое моделирование теплового состояния прокатываемой полосы согласно многочисленным исследователям [2.45-2.54, 2.56-2.58], основано на численном решении дифференциального уравнения теплопроводности (уравнения

теплового состояния). Рассматривается двумерная задача теплопроводности (все величины зависят от двух координат).

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.48)$$

Данная двумерная задача сводится к одномерной, так как скорость движения листа больше скорости распространения тепла в нем.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.49)$$

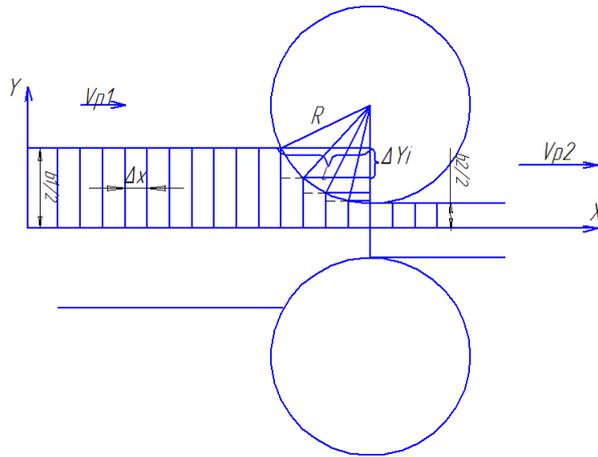


Рис. 2.32 Схема деформации листа металла валками

С учетом того, что $v = \frac{\partial x}{\partial \tau}$, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$,

$$v \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.50)$$

В данном уравнении скорость является постоянной при движении листа между клетями, в процессе деформации лист движется с ускорением, поэтому каждый шаг Δx_i по координате x будет характеризоваться своей скоростью v_i , которое можно найти по формуле:

$$v_i = \frac{v_{i-1} b_{i-1}}{b_i} = \frac{v_{i-1} b_{i-1}}{b_{i-1} - 2\Delta y_i}, \quad (2.51)$$

где

$$b_i = b_{i-1} - 2\Delta y_i, \quad (2.52)$$

$$\Delta y_i = \sqrt{R^2 - (l_i - \Delta x)^2} - \sqrt{R^2 - l_i^2}, \quad (2.53)$$

$$l_i = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{1}{2}b_i(1 - \varepsilon)\right)^2}, \quad (2.54)$$

ε – коэффициент обжатия, равный

$$\varepsilon = \frac{b_{i-1}}{b_i}. \quad (2.55)$$

Для каждого из зон теплообмена будем использовать уравнения описанные выше. При конвективном охлаждении воздуха:

$$Nu_{ж} = 0,33X^{-0,5} Re_{ж}^{0,5} Pr_{ж}^{0,33} (Pr/Pr_c)^{0,25},$$

$$Nu_{жс} = 0,33X^{-0,2} Re_{жс}^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} (Pr/Pr_c)^{0,25},$$

$$Re_{кр} = \nu X_{кр} / \nu = 5 \cdot 10^5,$$

при теплообмене излучением:

$$q = \varepsilon_{\text{ч}}(T_n)\sigma[(T_n + 273)^4 - (T_{\text{г}} + 273)^4].$$

Также, учтем повышение температуры за счет деформации листа валками:

$$\Delta T = \frac{\sigma_m \ln \varepsilon}{\rho c},$$

где σ_m – предел текучести, а $\varepsilon = b_2/b_1$ - коэффициент обжатия. И плотность теплового потока на поверхности полуограниченного тела, который уменьшается во времени по закону:

$$q = \frac{\lambda(T_n - T_{\infty})}{\sqrt{\pi a \tau}}.$$

Для учета теплофизических свойств воздуха были построены полиномы зависимостей числа Рейнольдса, числа Прандтля, кинетической вязкости и теплопроводности от температуры.

Адаптация метода к условиям действующих станов

Для практического использования, изложенного выше метода теплового решения необходимо знать значения коэффициентов, которые характеризуют интенсивность теплообмена рабочих валков с полосой, охлаждающей жидкостью и

окружающей средой. Значения некоторых коэффициентов, мало зависящих от условий работы конкретного стана, можно найти в справочниках.

Коэффициент теплопроводности используется в модели теплопереноса вала. Для этого необходимо одновременно решить уравнения теплопроводности для полосы и вала в месте их контакта [2.50-2.53].

По причине нехватки данных для величины коэффициента теплопроводности между полосой и валком в момент вращения существует много исследовательских работ на определение температуры валков в обжимном стане.

Определение углов:

$$\varphi_1 = 2 \arctg \left(\frac{\Delta h + \Delta h_{2 \text{упр}}}{2x_1} \right) = 2 \arctg \left(\frac{20,3 + 0,011}{2 \cdot 95,062} \right) = 0,2129 \text{ рад} = 12,2^\circ \quad \text{угол за-}$$

хвата полосы валками;

Углы, определяемые положением отсекаателей воды:

$$\varphi_2 = \varphi_{\text{вых}} = 0,628 \text{ рад} = 35,98^\circ;$$

$$\varphi_6 = \varphi_{\text{вх}} - \varphi_1 = 0,628 - 0,2129 = 0,415 \text{ рад} = 23,78^\circ .$$

$\varphi_3 = 1,326 \text{ рад} = 75,98^\circ$ — угол, определяющий водоохлаждаемую часть поверхности вала с выходной стороны;

$\varphi_4 = 2,375 \text{ рад} = 136,08^\circ$ — угол, определяющий водоохлаждаемую часть поверхности вала с входной стороны;

$\varphi_5 = 1,113 \text{ рад} = 63,77^\circ$ — угол, определяющий охлаждаемую воздухом часть поверхности вала;

где $\Delta h = 20,3 \text{ мм}$ — длина очага деформации;

$\Delta h_{2 \text{упр}} = 0,011 \text{ мм}$ — максимальная величина абсолютных упругих деформаций полосы по толщине на данном участке;

$x_1 = 95,062 \text{ мм}$ — протяженность дуги контакта вместе с первым упругим участком;

$\varphi_{\text{вх}} = \varphi_{\text{вых}} = 0,628 \text{ рад}$ — углы установки в рабочих клетях проводковой арматуры [2**Ошибка! Источник ссылки не найден.**59].

Определение коэффициента конвективного теплообмена рабочего валка с водой:

а) при наличии форсунок «Спрейинг Системс»

$$\begin{aligned}\alpha_1^{\text{ВХ}} &= 1050 \cdot \frac{V_{11}^{\text{ВХ}}}{V_{\text{min}}} + 21100 \cdot \frac{P_{\text{охл}}}{P_{\text{min}}} - 100 \cdot \left(\frac{V_{11}^{\text{ВХ}}}{V_{\text{min}}}\right)^2 - 7100 \cdot \left(\frac{P_{\text{охл}}}{P_{\text{min}}}\right)^2 - 14590 = \\ &= 1050 \cdot \frac{111}{50} + 21100 \cdot \frac{11}{10} - 100 \cdot \left(\frac{111}{50}\right)^2 - 7100 \cdot \left(\frac{11}{10}\right)^2 - 14590 = 1867 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}\end{aligned}$$

— входная сторона;

$$\begin{aligned}\alpha_1^{\text{ВЫХ}} &= 1050 \cdot \frac{V_{11}^{\text{ВЫХ}}}{V_{\text{min}}} + 21100 \cdot \frac{P_{\text{охл}}}{P_{\text{min}}} - 100 \cdot \left(\frac{V_{11}^{\text{ВЫХ}}}{V_{\text{min}}}\right)^2 - 7100 \cdot \left(\frac{P_{\text{охл}}}{P_{\text{min}}}\right)^2 - 14590 = \\ &= 1050 \cdot \frac{257}{50} + 21100 \cdot \frac{11}{10} - 100 \cdot \left(\frac{257}{50}\right)^2 - 7100 \cdot \left(\frac{11}{10}\right)^2 - 14590 = 2797 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}\end{aligned}$$

— выходная сторона,

где $V_{\text{min}} = 50 \text{ м}^3 / \text{ч} \cdot \text{м}^2$ — минимальная плотность облива;

$P_{\text{min}} = 10$ ати — минимальное давление в системе охлаждения;

$P_{\text{охл}}$ — максимальное давление в системе охлаждения;

$V_{11}^{\text{ВХ}}$ и $V_{11}^{\text{ВЫХ}}$ — средняя плотность облива рабочего валка на входной и выходной стороне.

б) при наличии других форсунок α_1 задается приближенно (первое приближение $\alpha_1 \approx 2500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$), а затем уточняется непосредственно на стане при адаптации моделей [2**Ошибка! Источник ссылки не найден.**59].

Определение коэффициента контактного теплообмена между полосой и валками:

$$\alpha_2 = 5660 \cdot \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{ср.мин}}} - 1490 = 5660 \cdot \frac{246,248}{200} - 1490 = 5479 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град},$$

где $P_{\text{ср.мин}} = 200$ МПа — минимальное значение $P_{\text{ср}}$,

$P_{\text{ср}}$ — среднее значение нормальных контактных напряжений.

В результате изучения справочных данных коэффициент теплообмена вала с воздухом принимается равным $\alpha_3 = 500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$ [2]. **Ошибка! Источник ссылки не найден..59**].

Вычислим угловую скорость вращения вала:

$$\omega = \frac{v_p}{R} = \frac{1,17 \text{ м/с}}{0,445 \text{ м}} = 2,63 \text{ рад/с},$$

где v_p – скорость листа,

R – радиус вала.

Описание работы программы

Программа написана на языке Delphi версии 7.0 и предназначена для работы на компьютерах с операционной системой Windows. Программа запускается исполняющим файлом heat.exe. В ходе выполнения программы автоматически создаются файлы Rez.txt, которые содержат результаты выполнения программы.

На начальном этапе работы с программой необходимо ввести некоторые начальные параметры, а именно параметры полосы (ее толщина, теплопроводность, теплоемкость, плотность, предел текучести металла, а так же начальную скорость и температуру); параметры стана (расстояние между клетями, количество клеток, коэффициент обжатия для каждой клетки и радиус вала).

На стадии выполнения основной части программы (реализация метода прогонки) из тела программы на каждом временном слое вызывается функция q1, которая возвращает в основную программу значение плотности теплового потока в зависимости от температуры на поверхности. Значение коэффициента теплоотдачи, рассчитывается по формуле для соответствующих зон теплообмена. При ламинарном движении теплового потока расчетное соотношение для теплоотдачи меняется.

Каждый из файлов Rez.txt содержит распределение температуры в направлении движения листа для слоев $y=0$, $y=0.05b$, $y=0.1b$, $y=0.25b$, $y=0.5b$, $y=0.75b$, $y=b$ соответственно.

Результатом работы программы является таблица значений температуры в узлах листа, а также значение средней температуры на поверхностном слое, конечной скорости прокатки и толщины листа. По данным таблиц были построены графики распределения температуры. На основании этих графиков можно судить о характере теплообмена всего процесса.

Анализ результатов

На рисунках 2.33 – 3.43 показано распределение температуры в листе рассчитанных с параметрами характерными для прокатки горячего листа металла.

Из рисунка 2.33 видно, что при контакте листа с рабочим валками, происходит резкое падение температуры на ее поверхности. При прохождении последующих клеток это падение уменьшается, так как скорость листа в результате обжатия увеличивается, последовательно время контакта поверхности полосы с валками уменьшается.

Несмотря на то, что лист охлаждается в неподвижном воздухе и отдает часть своего тепла рабочим валкам, температура в более глубоких слоях листа в момент прохождения клеток повышается, это вызвано с тем, что при деформации металла выделяется больше количества теплоты, чем количество теплоты, которое отлает лист за тот же промежуток времени.

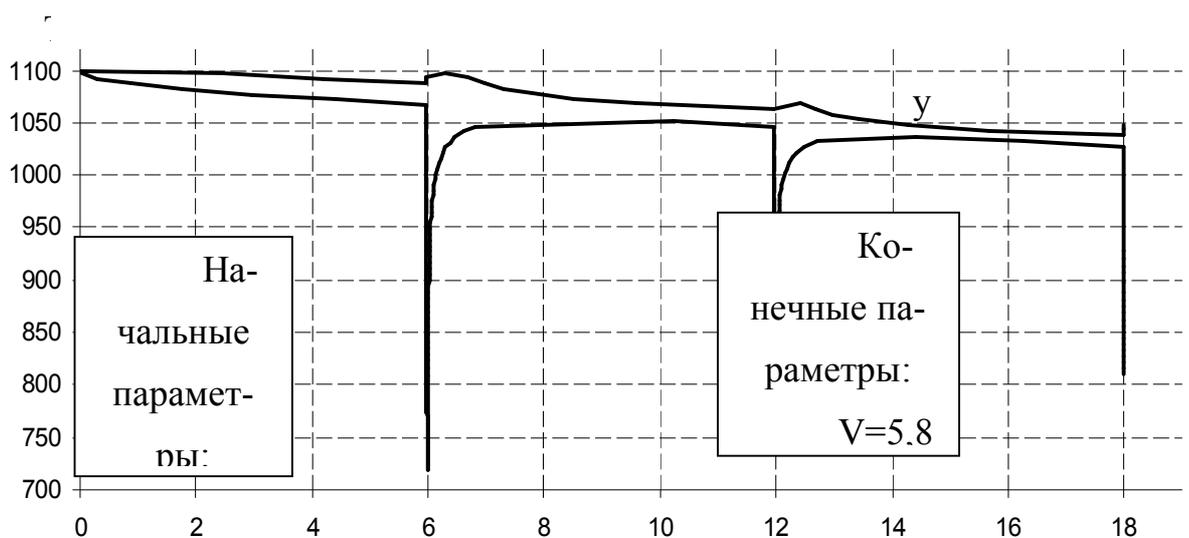


Рис. 2.33. Распределение температуры листа (скорость = 2 м/с, расстояние м/у клетями = 6 м, коэф. обжатия = 0,3)

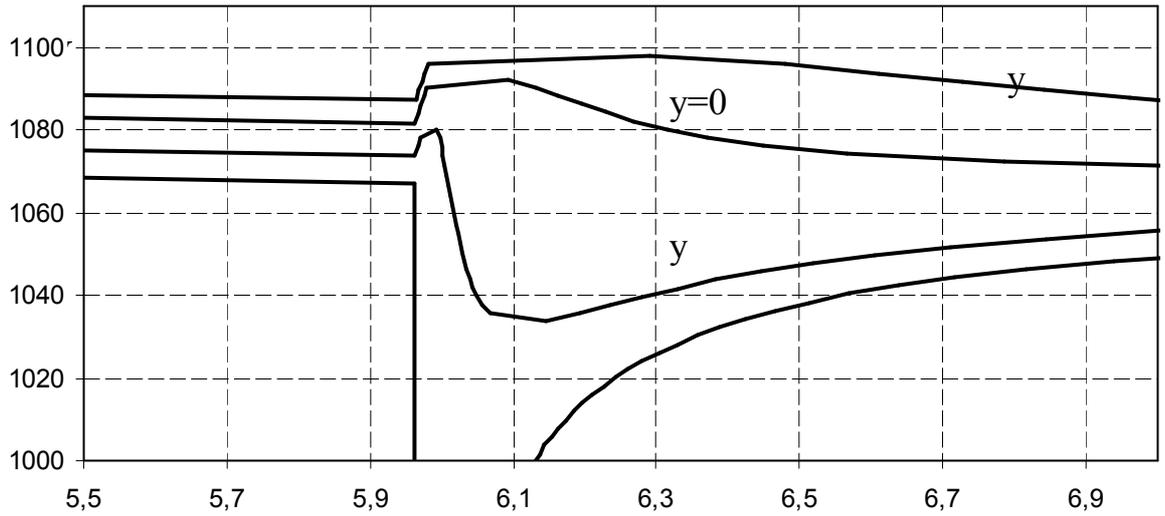


Рис. 2.34. Распределение температуры листа (скорость = 2 м/с, расстояние м/у клетями = 6 м, коэф. обжатия = 0,3)

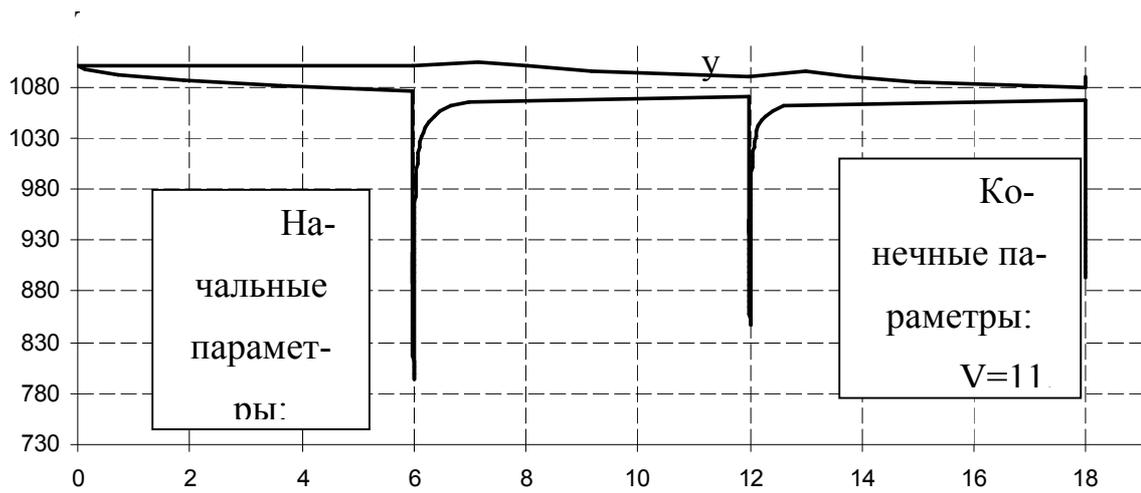


Рис. 2.35. Распределение температуры листа (скорость = 4 м/с, расстояние м/у клетями = 6 м, коэф. обжатия = 0,3)

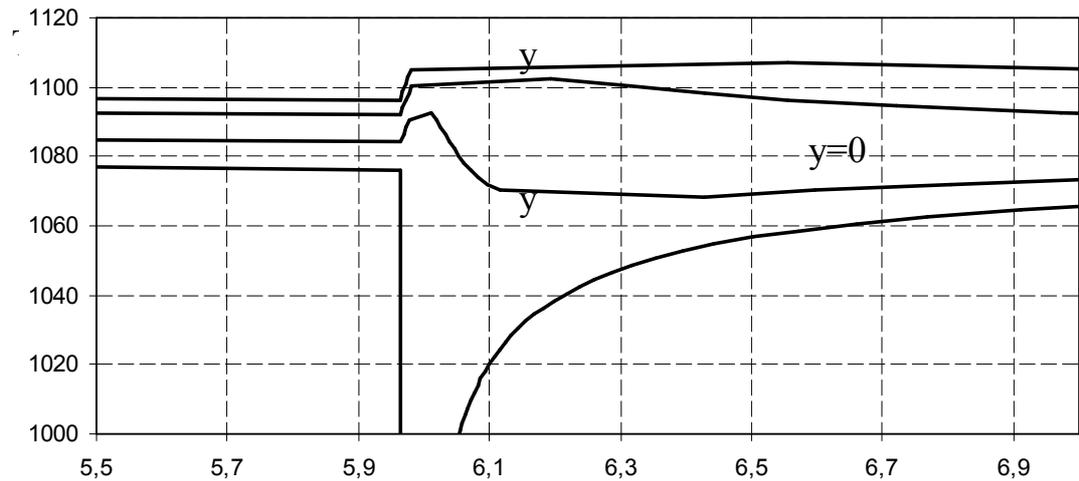


Рис. 2.36. Распределение температуры листа (скорость = 4 м/с, расстояние м/у клетями = 6 м, коэф. обжатия = 0,3)

При увеличении скорости прокатки уменьшается перепад температур, как на поверхности, так и в глубине листа, так как на контакт листа с клетью затрачивается меньше времени. При этом конечная температура листа повышается.

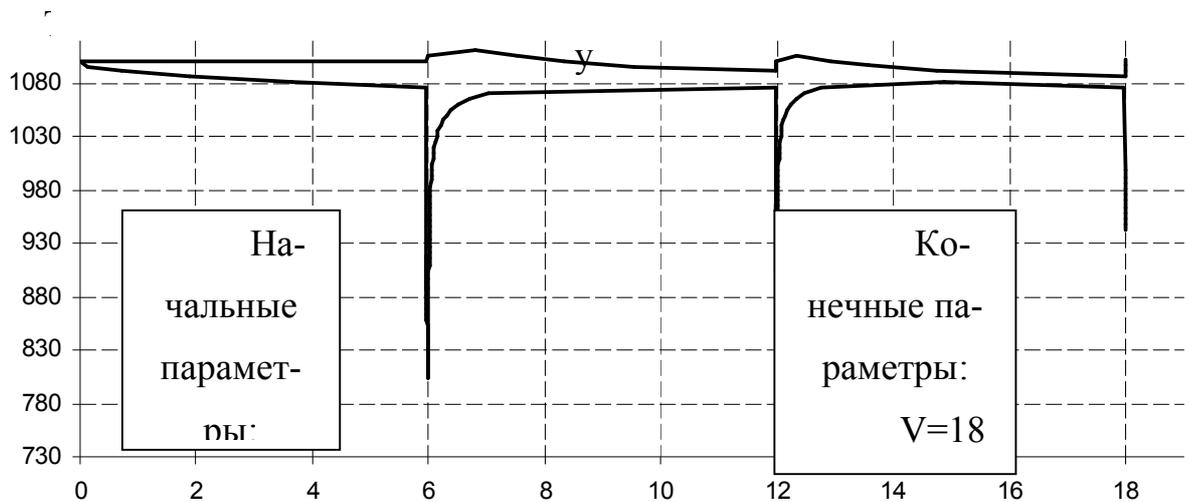


Рис. 2.37. Распределение температуры листа (скорость = 4 м/с, расстояние м/у клетями = 6 м, коэф. обжатия = 0,4)

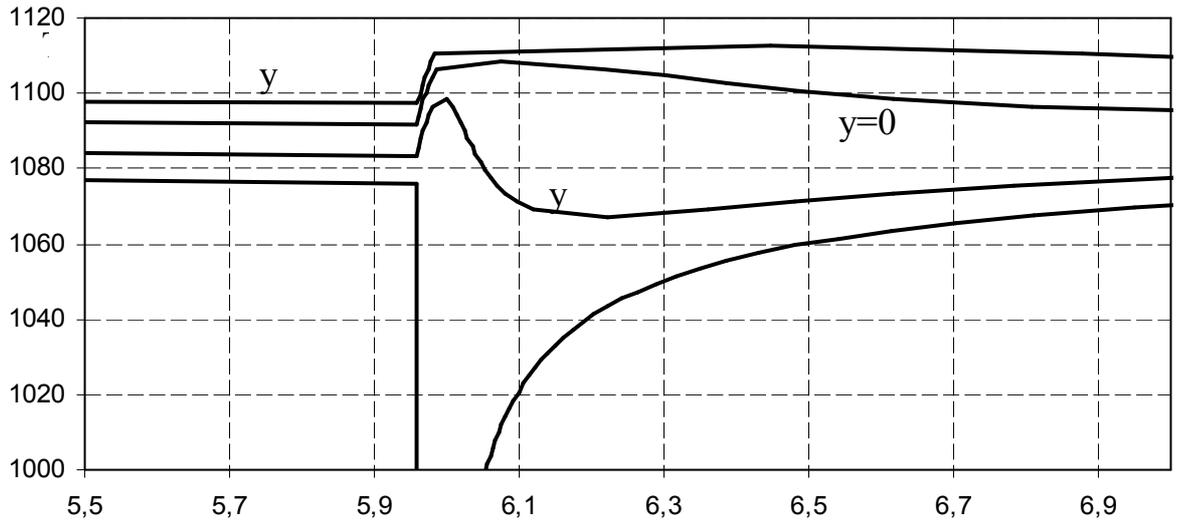


Рис. 2.38. Распределение температуры листа (скорость = 4 м/с, расстояние м/у клетями = 6 м, коэф. обжатия = 0,4)

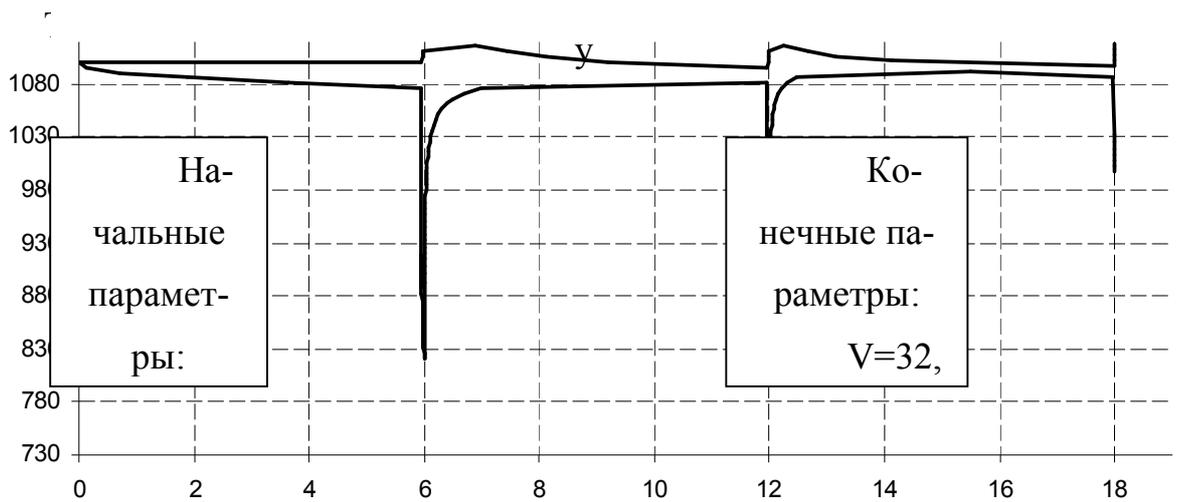


Рис. 2.39. Распределение температуры листа (скорость = 4 м/с, расстояние м/у клетями = 6 м, коэф. обжатия = 0,5)

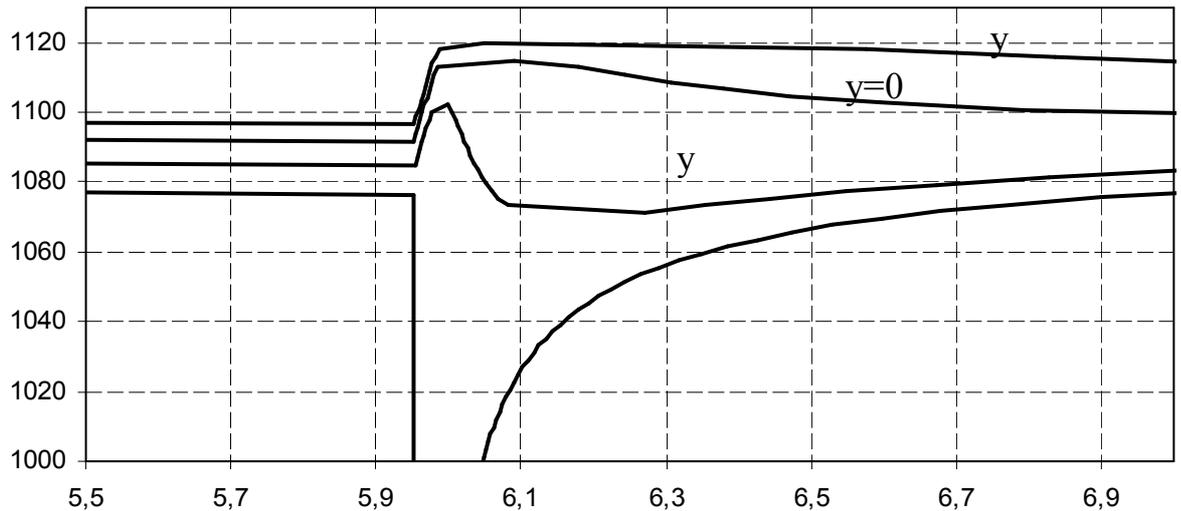


Рис. 2.40. Распределение температуры листа (скорость = 4 м/с, расстояние м/у клетями = 6 м, коэф. обжатия 0,5)

При определенных параметрах скорости, расстояния между клетями и коэффициентом обжатия может сложиться ситуация, что в ходе прокатки средняя температура листа будет повышаться. Так например, при скорости равной 4 м/с, расстоянием между клетями 6 м и коэффициентом обжатия 0,5; при прохождении листом трех клетей температура повысится на 6 °С (рис. 2.39).

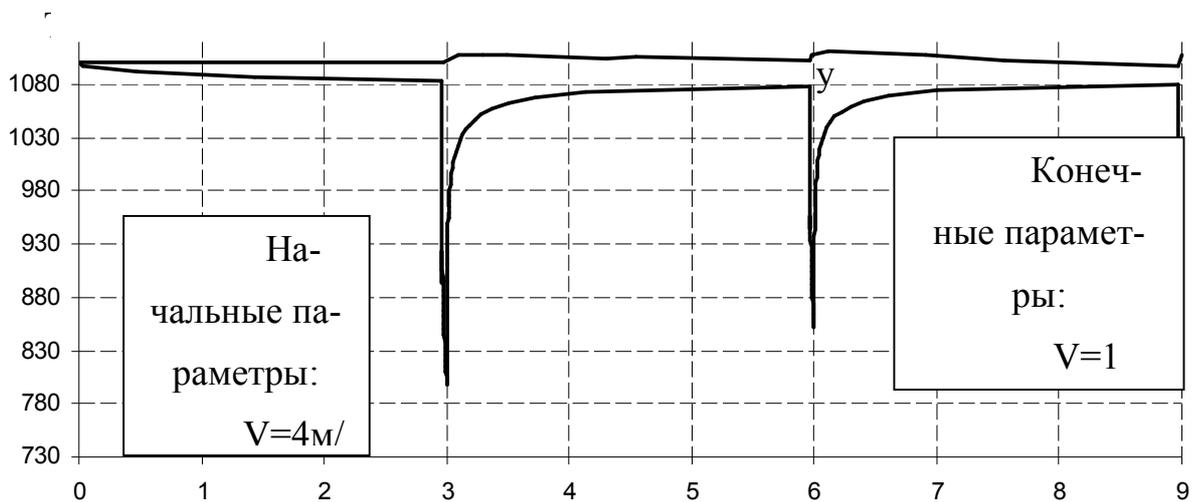


Рис. 2.41. Распределение температуры листа (скорость = 4 м/с, расстояние м/у клетями = 3 м, коэф. обжатия = 0,3)

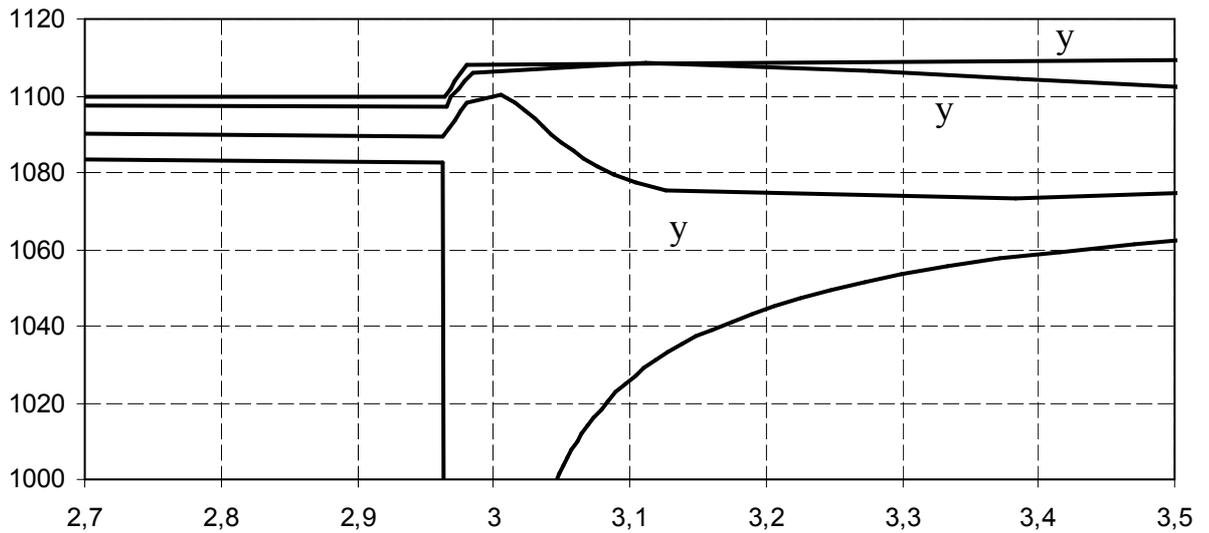


Рис. 2.42 Распределение температуры листа (скорость = 4 м/с, расстояние м/у клетями = 3 м, коэф. обжатия = 0,3)

При следующем наборе параметров, как на рисунках 2.37, 2.38, 2.41, а именно скорость равная 6 м/с, расстояние между валков 6 м, коэффициентом обжатия 0,5; скорость равная 6 м/с, расстояние между валков 3 м, коэффициентом обжатия 0,3. Средняя температура листа в ходе прокатки практически не изменяется.

Программы для расчёта распределения температуры в слябе

Для того чтобы произвести расчёт распределения температуры в слябе, так же произвести расчёт конвективного теплообмена были разработаны две программы на языке программирования Lazarus в ОС Windows.

На рис. 2.43 изображена форма программы для расчёта конвективного теплообмена на поверхности сляба. Начальными данными для этой программы являются:

Минимальная температура поверхности, °С;

Максимальная температура поверхности, °С;

Шаг по температуре, °С;

Характерный размер, м;

Скорость движения, м/с;

Температура среды, °С;

Выходными данными являются: коэффициент теплоотдачи, плотность теплового потока при заданных температурах, а так же критерий Рейнольдса для случая вынужденной конвекции и критерий Рэлея для свободной конвекции. Выходные данные предоставляются в виде таблицы, на основе которых можно построить графики зависимостей указанных параметров теплообмена от температуры.

| Вынужденная конвекция | | Свободная конвекция | | | | | |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|---------------------|------------------|---------------------|
| T, °C | $\nu \cdot 10^{-6}$ | α , W/m·K | q, W/m ² | T, °C | $\nu \cdot 10^{-6}$ | α , W/m·K | q, W/m ² |
| 100 | 1.81 | 1.81 | 188.71 | 100 | 3080.83 | 5.58 | 447.88 |
| 150 | 2.23 | 1.82 | 229.66 | 150 | 2620.88 | 4.58 | 855.83 |
| 200 | 3.03 | 1.82 | 326.34 | 200 | 2340.84 | 3.58 | 1322.46 |
| 250 | 3.93 | 1.82 | 427.76 | 250 | 2081.22 | 2.58 | 1854.81 |
| 300 | 5.03 | 1.82 | 588.57 | 300 | 1841.47 | 1.58 | 2384.88 |
| 350 | 6.33 | 1.82 | 799.09 | 350 | 1621.71 | 0.98 | 2967.1 |
| 400 | 7.83 | 1.82 | 1060.25 | 400 | 1421.88 | 0.42 | 3577.81 |
| 450 | 9.53 | 1.82 | 1379.02 | 450 | 1242.26 | 0.4 | 4213.71 |
| 500 | 11.43 | 1.82 | 1760.41 | 500 | 1082.52 | 0.215 | 4872.49 |
| 550 | 13.53 | 1.82 | 2217.45 | 550 | 952.78 | 0.148 | 5552.21 |
| 600 | 15.83 | 1.8 | 2764.14 | 600 | 842.84 | 0.098 | 6262.51 |
| 650 | 18.33 | 1.8 | 3413.58 | 650 | 752.13 | 0.068 | 6999.31 |
| 700 | 21.03 | 1.8 | 4177.68 | 700 | 672.57 | 0.048 | 7764.88 |
| 750 | 23.93 | 1.8 | 5069.56 | 750 | 602.83 | 0.038 | 8557.81 |
| 800 | 27.03 | 1.78 | 6093.03 | 800 | 542.88 | 0.028 | 9377.34 |
| 850 | 30.33 | 1.78 | 7261.17 | 850 | 492.94 | 0.02 | 10333.17 |
| 900 | 33.83 | 1.78 | 8587.29 | 900 | 452.82 | 0.018 | 11433.51 |
| 950 | 37.53 | 1.78 | 10083.5 | 950 | 422.88 | 0.018 | 12683.88 |
| 1000 | 41.43 | 1.78 | 11751.1 | 1000 | 392.14 | 0.018 | 14083.43 |
| 1050 | 45.53 | 1.78 | 13593.82 | 1050 | 368.4 | 0.018 | 15633.82 |
| 1100 | 49.83 | 1.78 | 15613.95 | 1100 | 348.58 | 0.018 | 17343.95 |

Рис. 2.43 Расчёт конвективного теплообмена

Необходимо отметить, что теплофизические свойства воздуха такие как: коэффициент теплопроводности, плотность, кинематическая вязкость, объёмный коэффициент теплового расширения, критерий Прандтля существенно зависят от температуры.

Во второй программе (рис. 2.44) производится непосредственное вычисление распределение температур внутри сляба по его толщине с учётом конвективной составляющей теплообмена, рассчитанной в предыдущей программе, и теплообмена излучением.

Входными параметрами являются:

Толщина сляба, м;

Начальная температура, °C;

Теплопроводность, Вт/(м·K);

Удельная теплоемкость Дж/(кг·K);

Плотность, кг/м³;

Количество точек;

Шаг по времени, с;

Температура воздуха, °С;

Время процесса, с;

Выходными данными служат распределение температуры по координате. Программа была разработана на основе метода сеток для решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности.

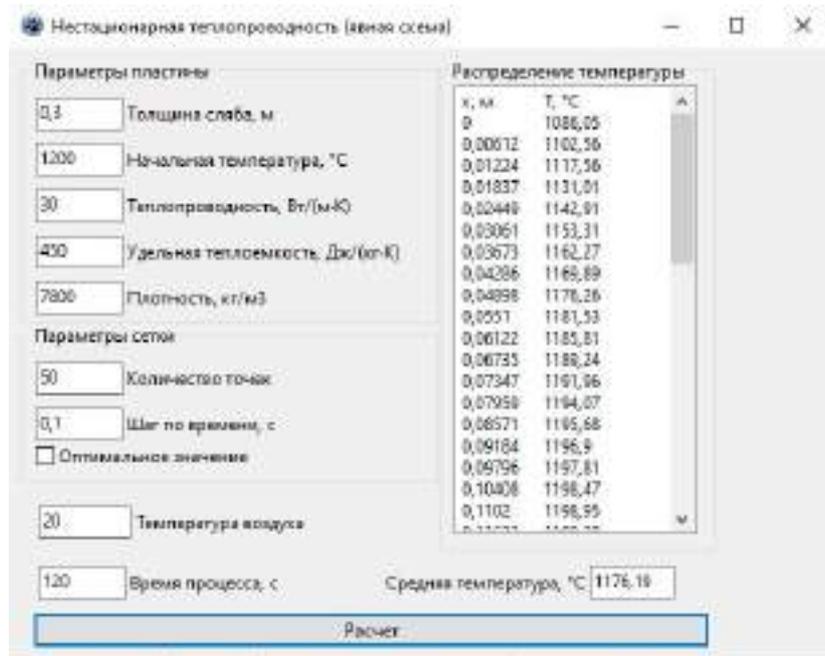


Рис. 2.44. Расчет распределения температуры в слябе

Результаты расчёта

На рисунках 2.45 и 2.46 показаны результаты расчёта зависимости конвективной составляющей теплообмена (плотность теплового потока) от температуры поверхности сляба для верхней и нижней стороны соответственно.

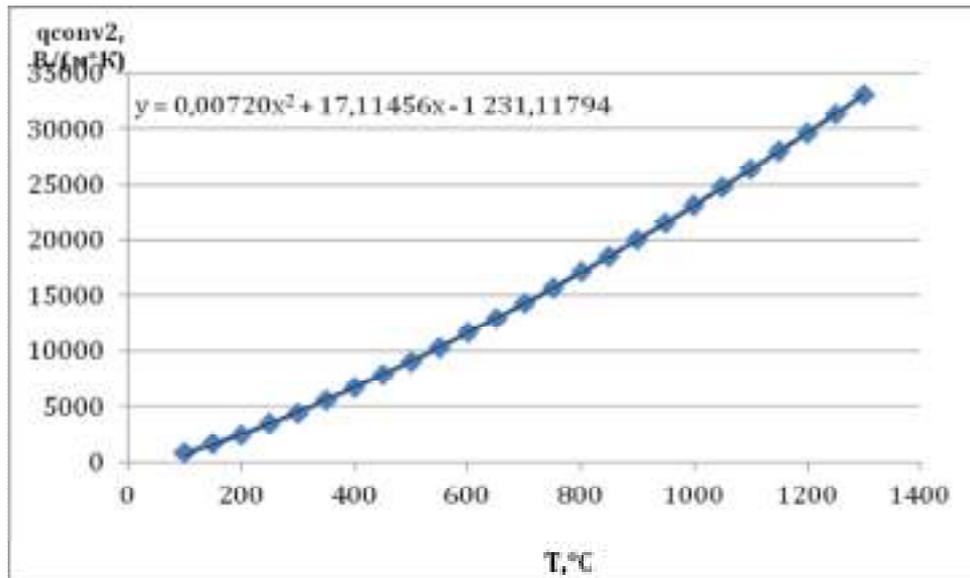


Рис.2.45. Конвективная составляющая плотности теплового потока сверху

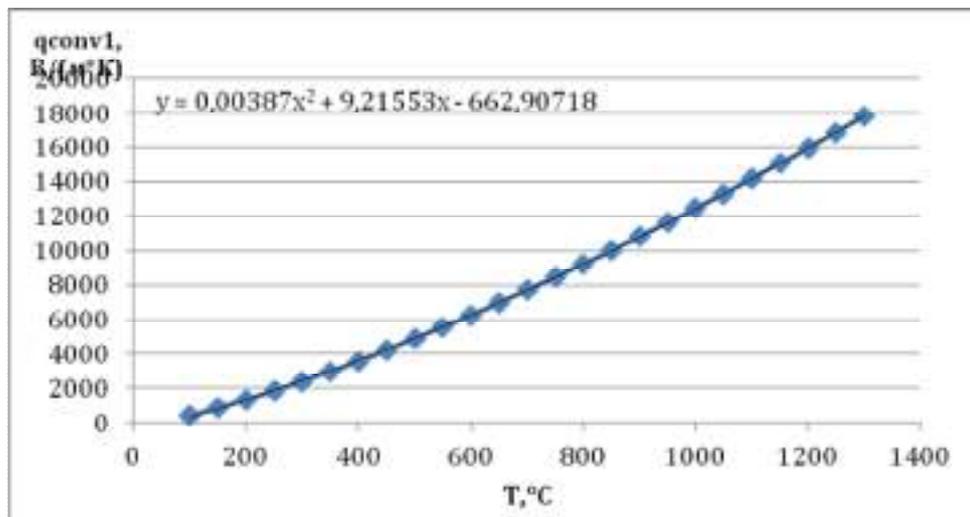


Рис.2.46. Конвективная составляющая плотности теплового потока снизу

По результатам этих расчётов были получены соотношения для расчёта конвективной составляющей плотности теплового потока в виде полиномов 2 степени:

$$q_{conv1} = 0,00387 \cdot T^2 + 9,21553 \cdot T - 662,90718 \text{ - для нижней стороны,}$$

$$q_{conv2} = 0,00720 \cdot T^2 + 17,11456 \cdot T - 1\,231,11794 \text{ - для верхней стороны.}$$

Эти соотношения были использованы для расчёта распределения температуры сляба во второй программе.

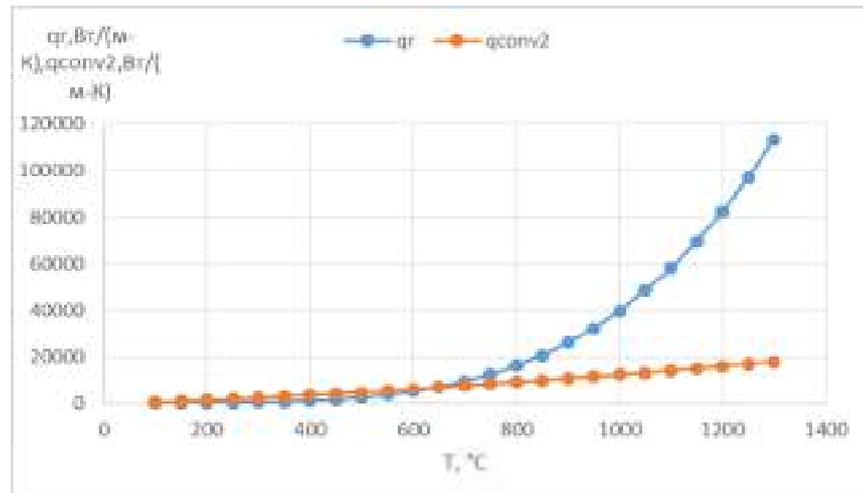


Рис. 2.47. Зависимость конвективного и радиоактивного теплообмена от температуры

При больших температурах, порядка 1300 T°С, основную роль в теплообмене играет составляющая излучения (см. рис. 2.47).

При понижении температуры поверхности до, порядка 650 T°С, конвективная и радиационная составляющая теплообмена становятся примерно одинаковыми. А при температурах ниже 650 T°С конвективная составляющая заметно выше, чем радиационная.

На рис. 2.48 представлены результаты расчёта распределения температуры сляба при разном времени охлаждения. Из рисунка видно, что верхняя сторона сляба остывает заметно быстрее, чем нижняя это можно объяснить тем, что конвективная составляющая теплообмена на верхней поверхности несколько интенсивнее, чем конвективная составляющая на нижней поверхности, за счёт большей скорости потоков холодного воздуха.

Изменение средней температуры сляба от времени представлено на рис.2.49. Ожидаемо, что с течением времени скорость охлаждения сляба уменьшается.

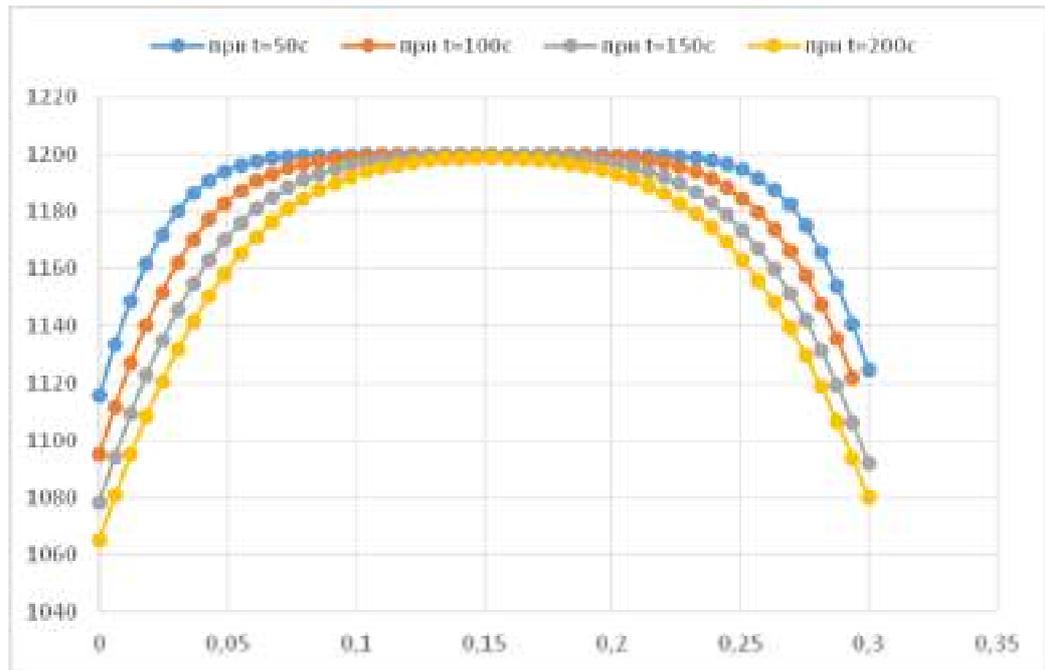


Рис. 2.48. Распределения температуры сляба при разном времени охлаждения

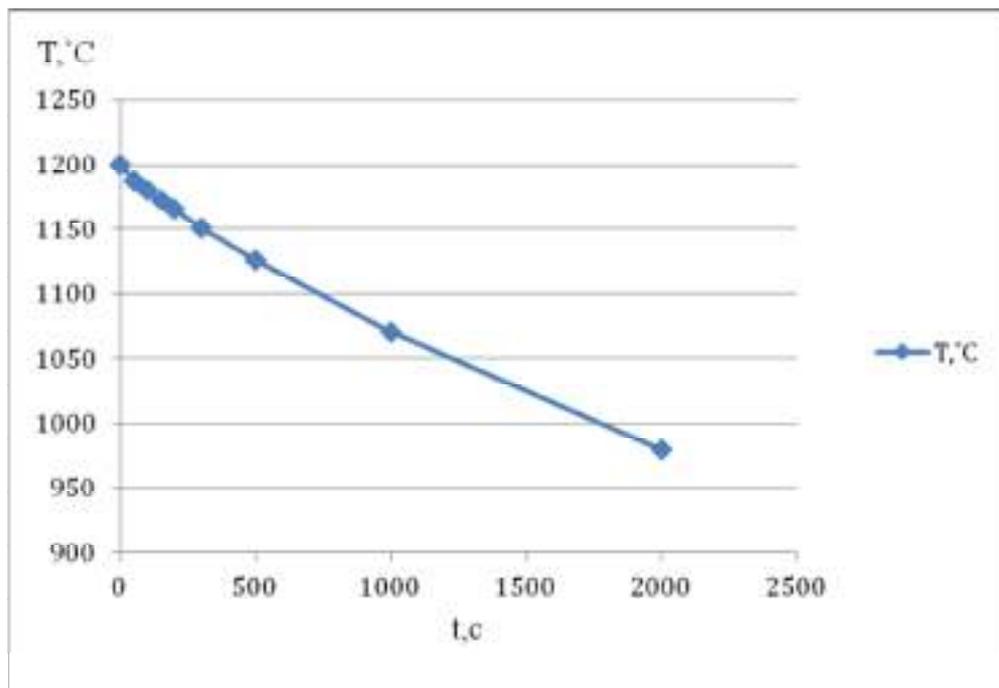


Рис. 2.49. Изменение средней температуры сляба от времени

Данные для построения графика средней температуры сляба в разные моменты времени представлены в таблице 2.10.

Средняя температура сляба в разные моменты времени

| t, с | T, °C |
|------|----------|
| 0 | 1200 |
| 50 | 1187,654 |
| 100 | 1180,211 |
| 150 | 1172,451 |
| 200 | 1165,121 |

2.3.3. Численная реализация математической модели и исследование теплового состояния рабочих валков

Для численной реализации математической модели в разрабатываемый алгоритм были дополнительно введены следующие допущения.

Валок имеет цилиндрическую форму, сплошной без внутреннего охлаждения.

На формирование нестационарного температурного поля валка влияет процесс поверхностного теплообмена валка:

- на боковой поверхности:
 - с полосой металла по дуге захвата в очаге деформации;
 - с охлаждающей жидкостью в виде струй воды;
 - с окружающим воздухом;
- на торцевой поверхности:
 - с окружающим воздухом.

Теплоотдача от рабочего валка опорному валку мала, и ее можно не учитывать.

Количеством тепла, поступающего в валок при трении между полосой и валком, можно пренебречь.

При моделировании теплового состояния валка его геометрические размеры считаем постоянными на протяжении всего процесса прокатки.

Численная реализация модель теплового состояния рабочих валков реализовано производилась методом независимых потоков.

Метод независимых потоков, разработанный автором [2.45] является подходом к построению, безусловно, устойчивых численных алгоритмов и адаптирован к решению смешанной задачи многомерного уравнения теплопроводности в ортогональных системах координат. Расчет потоков по каждому из пространственных направлений выполняется независимо, что позволяет легко распараллеливать алгоритм.

Уравнение теплопроводности в полярной системе координат имеет вид (ограничимся случаем изотопной теплопроводности) [2.43, 2.45, 2.46].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} ar \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} a \frac{\partial T}{\partial \varphi} \quad (2.56)$$

где $a = a(r, \varphi)$ - коэффициент температуропроводности.

Введем потоки:

$$U = ar \frac{\partial T}{\partial r}, \quad V = \frac{a}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \quad (2.57)$$

Тогда аналогом являются уравнения:

$$r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \quad (2.58)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = ar \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) \right] \quad (2.59)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) \quad (2.60)$$

«Усеченные» уравнения, используемые для расчета предварительных значений потоков, имеют вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = ar \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right) \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \quad (2.62)$$

Последовательно рассчитывалось тепловое состояние валка для внешнего слоя валка и при разбиении конечно-разностной сетки определялось распределение тепла вдоль окружности, а также по глубине поверхностного слоя.

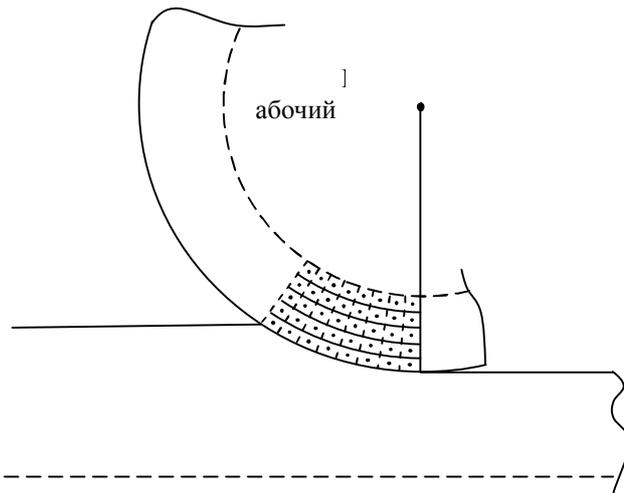


Рис. 2.50. Схема разбиения поверхностного слоя валка конечно-разностной сеткой

Для численного решения и визуализации результатов исследования реализована компьютерная программа [2.55], в которой рассчитывается температура и ее распределение внутри рабочей поверхности валка. Программа реализована в интегрирующей среде Delphi 7 и позволяет графически отображать данное распределение, а также записывать данные в текстовый файл для последующей обработки [2.55]. Рабочее окно программного продукта представлено на рисунке 2.51.

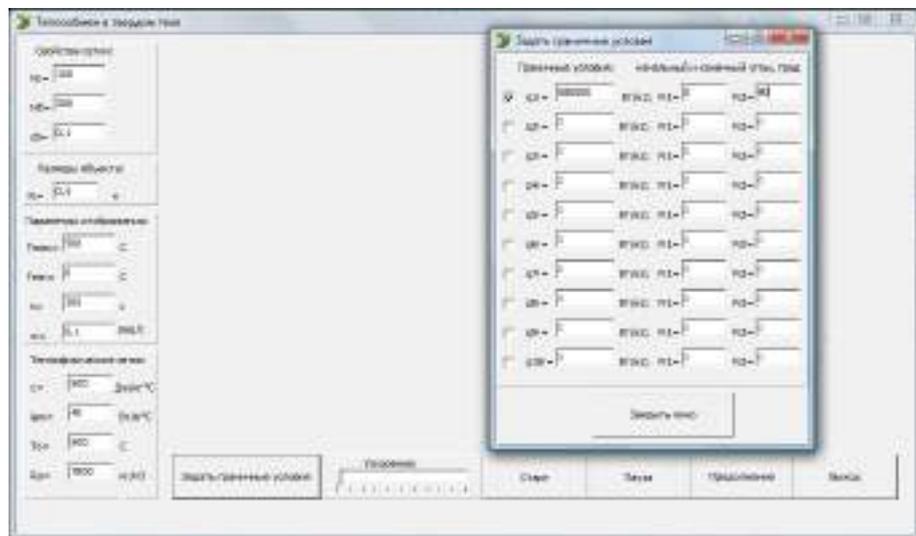


Рис. 2.51. Рабочее окно программного продукта для расчета теплового состояния рабочих валков

Алгоритм работы программы заключается в следующем:

– ввод исходных данных: радиус валка (м), начальная температура (0С), угловая скорость валка (рад/с), теплоемкость (Дж/кг*С), плотность (кг/м3), коэффи-

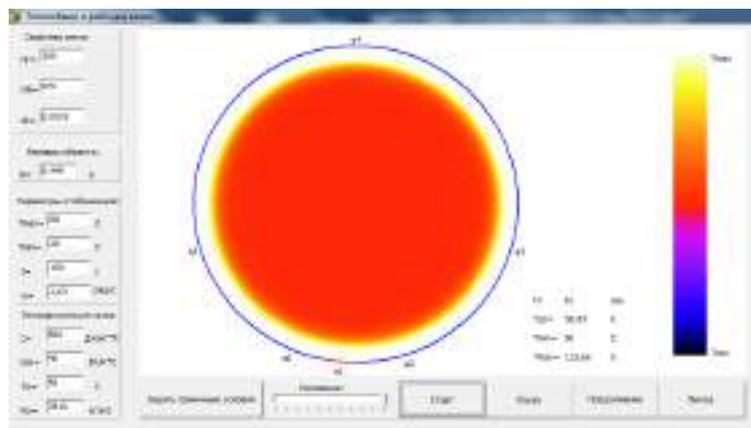
циент теплопроводности ($\text{Вт/с}^*\text{с}$), значение теплового потока (Вт/м^2), время работы валка (сек), ритм прокатки;

– рассчитываются приближенные потоки (значения) температуры, которые изменяются по радиусу валка и по времени, а рассчитанные данные после предварительного расчета подвергаются уточнению;

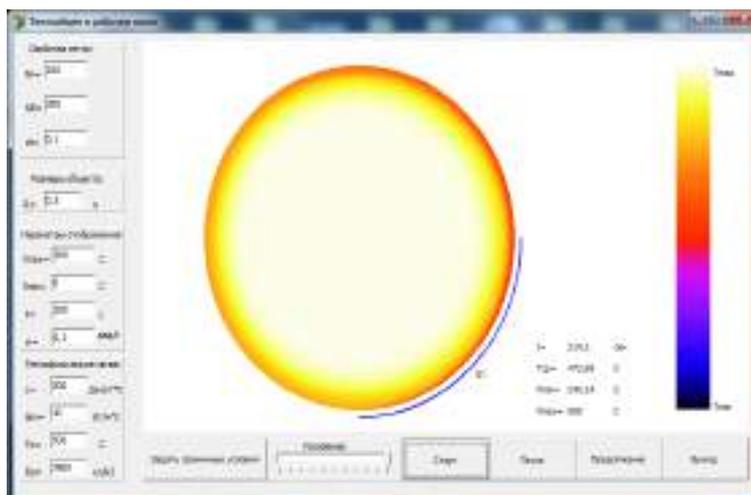
– согласно рассчитанным точным потокам (значениям) уточняется температура в каждой точке твердого тела;

– по расчетным данным строится схематическое изображение вращающегося тела, в соответствии с проградуированной шкалой температур.

Результаты работы программы, описывающее распределение температуры по сечению рабочего валка, представлены на рисунках 2.52.



а)



б)

Рис. 2.52. Рабочее окно программного продукта для демонстрации результатов расчета теплового состояния рабочих валков

2.3.4. Исследование процесса окалинообразования в технологии горячей прокатки

В прокатном производстве термином «окалина» обозначаются окислы металла, находящиеся на поверхности проката. Зачастую оставляемые окалиной на поверхности прокатной продукции углубления различной величины, классифицируют как «рябизна» или «оспа», и называют «браком по окалине».

Окалина имеет сложное, слоистое строение и в зависимости от температуры окисления и состава газовой фазы может состоять из трех (FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3), двух (FeO , Fe_3O_4 или Fe_2O_3) или одного (FeO или Fe_3O_4) слоя. Из литературных данных известно, что рост окалины происходит как на ее внешней, так и на внутренней поверхности.

По данным зарубежных исследователей (Lundberg, S.-E., Gustavsson, T.) твердость окалины при температуре прокатки 9000С для FeO , Fe_2O_4 и Fe_2O_4 составляет соответственно 105, 366, и 516 HV, распределение этих слоёв представлено на рис. 2.54.

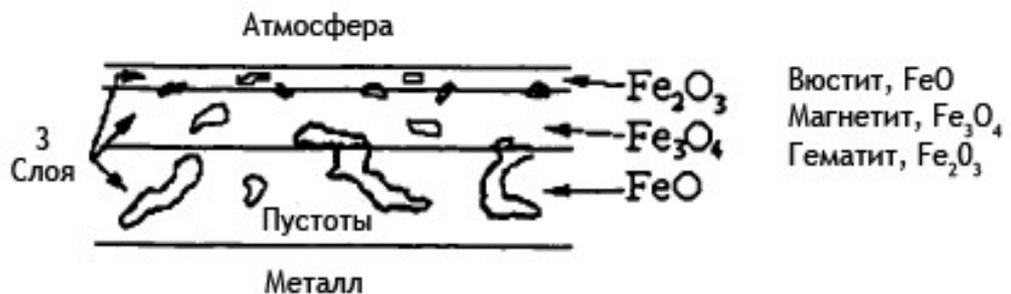


Рис. 2.53. Распределение слоев окалины по толщине обрабатываемого металла.

Основные причины образования окалины и виды дефектов связанных с окалиной

Причинами образования первичной вкатанной и не полностью удаленной окалины, образовавшейся в процессе нагрева металла в печи и в черновой группе клеток, являются:

поверхностные дефекты слитков, горячекатаных слябов, раскатов и полос в виде поверхностных трещин, царапин, надрывов, деформационных рванин, отпечатков, следов абразивной зачистки и других дефектов;

нарушения режимов нагрева слитков, слябов в нагревательных устройствах (оплавление, перегрев);

нерациональные технологические режимы работы вертикального, горизонтального черновых окатиноломателей, а также чистового горизонтального окатиноломателя, некачественное удаление окалина гидросбивами стана горячей прокатки;

повышенная выработка рабочих валков чистовых клетей стана;

образование на валках сетки разгара, других повреждений поверхности валков.

Вторичная вкатанная окалина – вкатанные в поверхность металла частички окалина, которые разбросаны по поверхности в виде точек и штрихов. Эта окалина образуется на поверхности горячекатаной полосы после удаления первичной окалина в окатиноломателе и гидросбивом. Дефект образуется вследствие вкатывания вторичной (воздушной, прокатной) окалина на линии чистовых клетей стана горячей прокатки. Образованию вторичной окалина способствует большое удельное давление металла на валки при прокатке, а также дефекты поверхности рабочих валков стана горячей прокатки и дефекты поверхности прокатываемой полосы.

К основным видам дефектов связанных с окалиной, можно отнести следующие:

Наличие окалина на поверхности заготовки, преимущественно красного цвета

Остатки окалина красного цвета представляют собой дефект поверхности в виде прерывистых дорожек различной формы или отдельные мазки окалина красного цвета, вытянутые в направлении прокатки. Дорожки красной окалина наблюдаются преимущественно на кромках и концах нетравленных полос. После травления в местах расположения дефекта могут оставаться невытравленные участки окалина темно-серого цвета.

Дефект характерен для сталей с высоким содержанием кремния. Остатки окалины красного цвета часто сопутствуют дефектам поверхности в виде отслоений металла, рванин, раскатанных пузырей, плен.

В процессе предварительного нагрева перед прокаткой происходит сильное механическое сцепление окалины с материалом основы, образующимся в стали с высоким содержанием кремния. Другими причинами образования остатков окалины красного цвета являются: соединения окислов, имеющих на поверхности раскатов, с окислами, образующимися в полостях, вскрывающихся при нагреве и прокатке полос с дефектами газовые пузыри, рванины и другие; образование слоя гематита (Fe_2O_3) на поверхности основной воздушной окалины вследствие более легкого доступа воздуха к кромкам и концам полосы в рулоне.

Наличие окалины в виде пятен

Дефект выявляется только на поверхности протравленных полос. Он представляет собой участки не вытравившейся окалины, преимущественно черно-серого цвета со слегка размытыми границами.

Причинами образования остатков окалины в виде пятен окалины являются:

увеличение интенсивности поражения поверхности металла окалиной вследствие перегрева металла в нагревательных печах, повышения температуры конца прокатки и смотки полос, а также увеличения массы рулона;

повышение толщины слоя окалины из-за неплоскостности и неплотной смотки горячекатаных полос в рулоны;

недостаточная твердость и повышенная выработка бочек рабочих валков чистовых клетей стана;

некачественная подготовка поверхности бочек рабочих и опорных валков стана;

нарушение технологических обжатий, натяжения, охлаждения и других параметров прокатки;

нарушение технологии работы и исправности оборудования окалиновзламывающего.

Теоретическое описание проблемы

Для расчета текущей толщины сформированного слоя окалины, существует несколько подходов. Так в работе [2.60] авторами предложено использовать методику, основанную на кривых изотермического роста [2.61-2.65]. В данной работе авторы делают попытку расширить и уточнить предложенный ранее метод расчета.

В качестве базовой формулы для расчета текущей толщины сформированного слоя окалины (h_{OK}) предложено использовать эмпирическую формулу:

$$h_{OK} = \Delta m \cdot \frac{M_{AX}}{M_X} \rho, \quad (2.63)$$

где, M_{AX} – молекулярный вес соединения;

M_X – вес отрицательного компонента, приходящегося на молекулу поверхностного соединения;

ρ – плотность поверхностного соединения;

Δm – приращение слоя окалины, привес, г/см².

В уравнении (2.63) неизвестный параметр Δm можно определить несколькими путями.

Первый подход основан на физическом представлении процесса окисления металла. При этом необходимо учитывать, что численное значение параметра Δm напрямую зависит от времени контакта с поверхностью горячекатаных полос.

Базовое значение Δm можно определить из простых химических реакций: баланс масс в реакции образования вюстита (FeO) при взаимодействии одного моля железа (m_{Fe}) с одним молем кислорода (m_O):

$$n_{Fe} = \frac{m_{Fe}}{M_{Fe}} = \frac{m_O}{M_O}, \quad (2.64)$$

приращение слоя окалины Δm :

$$\Delta m = m_O = \frac{m_{Fe} M_O}{M_{Fe}} \quad (2.65)$$

где M_{Fe} - молярная масса железа, равная 55,847 г/моль;

M_O - молярная масса кислорода, равная 15,999 г/моль.

масса оксидов:

$$\begin{cases} m_{FeO} = m_{Fe} + m_O = m_O \left(1 + \frac{M_{Fe}}{M_O} \right) = 4,491\Delta m; \\ m_{Fe_3O_4} = m_{Fe} + m_O = m_O \left(1 + \frac{3M_{Fe}}{4M_O} \right) = 3,618\Delta m; \\ m_{Fe_2O_3} = m_{Fe} + m_O = m_O \left(1 + \frac{2M_{Fe}}{3M_O} \right) = 3,327\Delta m. \end{cases} \quad (2.66)$$

В выражениях (2.66) отсутствует параметр время, поэтому, при расчете параметра Δm получается усредненное значение.

Для более точного расчета значения Δm воспользуемся результатам аппроксимации графических решений кривых изотермического роста окалина из известных подходов

$$\Delta m = K_{II} \sqrt{t}, \quad (2.67)$$

где, K_p - параболическая константа окисления, г/(см² мин^{1/2});

t - время окисления, мин.

Численное моделирование роста слоя окалина в зависимости от температурного состояния поверхности полосы и времени окисления можно представить следующей зависимостью

$$e_i = K_{Pi} \sqrt{\left(\frac{e_{i-1}}{K_i} \right)^2 + \Delta \tau}, \quad (2.68)$$

где e_i и e_{i-1} - текущий и начальный слои окалина, мкм;

K_p - истинное значение константы окисления в текущий момент времени;

K_{Pi} - константа окисления в рассматриваемый момент времени;

$\Delta \tau = \tau_i - \tau_{i-1}$ - время окисления на участке изменения константы окисления,

с.

При этом для численного расчета необходимо выполнения следующего условия

На основе представленного математического подхода, был произведён численный эксперимент на примере чистовой группы клетей стана горячей прокатки со следующими условиями:

количество клетей в чистовой линии – семь;

линейная скорость вращения рабочих валков последней клетки 520 м/мин;

установившаяся температура полосы после чистового окатиноломателя 9500С;

длина каждого участка окисления 6 м,

конечная толщина полосы 2,5 мм.

марка прокатываемой полосы: низкоуглеродистая сталь (Ст 3, сталь 10, 08пс по ГОСТ 16523-97)

Результаты усредненных расчетов приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11

Суммарная толщина оксидов (мкм) на поверхности полосы из низкоуглеродистой марки стали, в процессе окисления в чистовой линии клетей стана №7-№13.

| Номер клетки | Fe ₂ O ₃ (мкм) | Fe ₃ O ₄ (мкм) | FeO (мкм) |
|---------------------------|---|---|--------------|
| № 7-8 | 0,361472 | 2,320657 | 38,76005 |
| № 8-9 | 0,624555 | 4,01148 | 67,0008 |
| № 9-10 | 0,841807 | 5,408509 | 90,33458 |
| № 10-11 | 1,024206 | 6,581791 | 109,9313 |
| № 11-12 | 1,183967 | 7,609905 | 127,1035 |
| №12-13 | 1,307913 | 8,518198 | 142,2915 |
| № 13-участок до рольганга | 1,309972 | 9,31411 | 155,7069 |

Проверка адекватности полученных численных значений, была произведена с применением метода физического моделирования. В Магнитогорском Государственном технической университете им. Г.И. Носова функционирует научно-исследовательский институт «Наносталей» в котором установлен современный исследовательский комплекс Gleeble, 3500, который представляет собой высокоскоростной пластометр с возможностью программирования неограниченного числа стадий обработки металлов с постоянной или переменной по ходу обработки температурой или скоростью деформации. Нагрев образцов комплекса Gleeble 3500 осуществляется прямым пропусканием тока, что позволяет нагревать образ-

цы со скоростью до $10\ 000^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и/или поддерживать постоянную равновесную температуру. Благодаря высокой теплопроводности захватов, возможно осуществлять высокие скорости охлаждения. Дополнительная система охлаждения позволяет достигать скорости охлаждения свыше $10\ 000^{\circ}\text{C}/\text{с}$ на поверхности образца. Это позволяет использовать комплекс для моделирования процесса окалинообразования в чистовых группах клетей стана горячей прокатки

Цель проведения эксперимента: на основе моделирования реальных условий прокатки на участке чистовых групп клетей стана горячей прокатки, смоделировать условия образования окалины и определить толщину сформированного слоя и произвести проверку адекватности предлагаемых методик.

Условия проведения эксперимента

Материал заготовки- сталь низкоуглеродистая 08 пс ГОСТ 16523-97).

Исследуемый образец- заготовка диаметром 10 и 8 мм, длиной 80 мм.

Объекта моделирования - стан 2000 горячей прокатки ОАО «ММК», технологические параметры приведены в таблице 2.

Скорость нагрева образцов - $300^{\circ}\text{C}/\text{с}$

Скорость охлаждения образцов принималась равной $250\dots 300^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Выходные параметры эксперимента - толщина образованного слоя окалины, $\mu\text{м}$.

Таблица 2.12

Технологические параметры прокатки стали 08пс на стане 2000 горячей прокатки ОАО «ММК» в чистовой группе клетей

| Технологические параметры | Значение технологических параметров | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 40,2 | 38,8 | 31,9 | 28,1 | 23,8 | 21,6 | 15,2 |
| Обжатие, % | 40,2 | 38,8 | 31,9 | 28,1 | 23,8 | 21,6 | 15,2 |
| Скорость прокатки, м/с | 1,8, | 2,9 | 4,3 | 5,9 | 7,2 | 10 | 12 |
| Время выдержки (машинное время прокатки), с | 7 | 9 | 13 | 15 | 18 | 23 | 27 |
| Температура металла $t, ^{\circ}\text{C}$ | 1080 | 1000 | 980 | 900 | 890 | 880 | 870 |

Примечание к таблице 2.12.

В условиях действующего производства измерение температуры производится после черновой группы клетей, за шестой клетью (t_6) и на выходе из чис-

товой группы клеток, за 13-ой клетью (t_{13}). Поэтому определение температуры поверхности металла на интервале чистовых групп клеток ($T_7 - T_{12}$) возможно либо дополнительными средствами измерения, либо по аналитическим выражением с использованием аппарата математического моделирования. Экспериментальные данные для определения температуры поверхности полосы при помощи пирометра или тепловизор не позволяет точно определить фактическую температуру из за большого числа возмущающих факторов: интенсивное охлаждение валков и полосы, наличие слоя окалины и т.д. Поэтому расчет температуры поверхности листа производился аналитическим способом.

Скорость нагрева и охлаждения образцов принималась максимально возможной для исключения воздействия побочных факторов;

Температура образца фиксировалась при помощи хромель-алюмелевая термопары.

Результаты эксперимента приведены на рис.2.54, на которых визуально видно сформированный слой окалины.



а

б

Рис. 2.54 Результаты моделирования процесса окалинообразования.

На образцах визуально заметно образование слоя окалины.

а – моделирование окалинообразования в клетки №8-9

б – моделирование окалинообразования в клетки №12-13

Для определения численного значения толщины сформированного слоя окалины ($h_{ок}$) был использован бесконтактный способ измерения шероховатости, волнистости и формы поверхности, позволяющий определять 2-х и 3-х мерные микротопографические характеристики поверхностей – интерференционный микроскоп Contour GT K1 (фирма Bruker, США) (рис. 2.56.а), расположенный в научно-исследовательском центре «Микротопография» ВГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Результаты исследования приведены на рис.2.56.б-2.56.е.

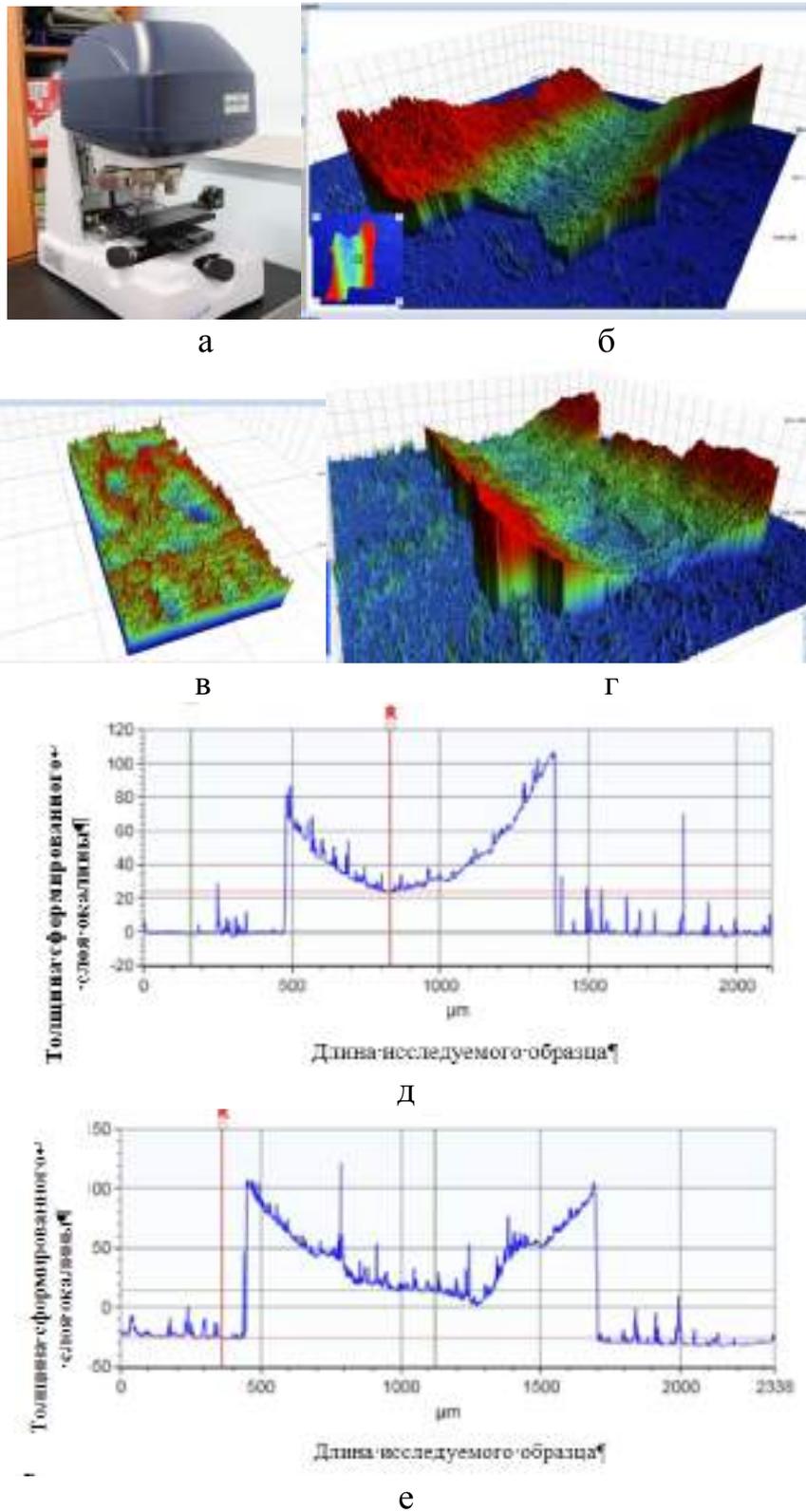


Рис. 2.55. а – интерференционный микроскоп Contour GT K1 фирма Bruker, США; б, в, г – определение 3-х мерных микротопографических характеристик сформированного слоя окислы.; д, е – определение 2-х мерных микротопографических характеристик сформированного слоя окислы. На рисунке отчетливо видно, что толщина слоя окислы составляет порядка 100 мкм;

Таким образом, из представленных положений представлен математический подход к описанию процесса окалинообразования применительно к участку чистовых групп клетей станов горячей прокатки. С целью проверки адекватности предложенной методики воспроизведен лабораторный эксперимент, позволяющий численно определить толщину сформированного слоя «вторичной» окалины на участке чистовых групп клетей стана. Адекватность предлагаемой модели составила от 10% до 30%. Полученные данные могут быть использованы в разработке и проектировании оборудования для эффективной борьбы с проблемой «вторичной» окалины. Это позволит повысить экологическую безопасность производства и снизить техногенную нагрузку на окружающую среду и здоровье человека.

2.4. Моделирование узла системы гидромеханического удаления окалины и выявление закономерностей влияния конструктивных особенностей на количество удаляемой окалины

Одной из основных причин, приводящих к образованию брака или несоответствующей продукции (НП) при производстве горячекатаных полос с последующим проявлением дефекта является «вкатанная» окалина. Особенность данного дефекта заключается в том, что он проявляется на последующих переделах (травления, холодной прокатки, отделки) и кроме того, информация в листопрокатные цеха горячей прокатки поступает только через определенное время, что не позволяет оперативно устранить данный дефект. Поэтому основная задача специалистов технологов – предупредить проявления данного дефекта. Помимо этого существуют достаточно жесткие ограничения по экологической безопасности металлургического производства. Известно, что локальной техногенной аномалией с точки зрения экологии, является зона металлургических комбинатов, в твердых выбросах которых содержится от 22000 до 310000 мг/кг железа. Концентрация железа в травильных водах черных металлов достигает 5000-7000 мг/л [2.64-2.67]. Попадая в окружающую среду железо влияет на качество природных вод, интенсивность развития фитопланктона и качественный состав микрофлоры. Токсичность соединений железа в воде резко увеличивается в щелочной среде. Содержание железа в воде выше 1-2 мг/л значительно ухудшают ее органолептические свойства, придавая неприятный вяжущий вкус и бурый цвет. Такая вода становится малопригодной для использования в технических целях [2.68].

Снижение окалинообразования, или удаление окалины с поверхности горячекатаной продукции может существенно снизить абразивный износ валков, т.к. наиболее интенсивный износ рабочих поверхностей инструмента наблюдается на финишных стадиях обработки, и повысить качество производимой продукции.

Таким образом, существует необходимость изучения причин образования окалины, проведении комплекса физического моделирования процесса окалинообразования и последующего исследования полученных результатов, предложение ряда технических мероприятий для ее удаления, а также и обобщение результатов исследования с учетом требований по экологической безопасности металлургического производства.

Анализ общедоступных данных взятых по одному из переделов по производству горячекатаной продукции стана 2000 горячей прокатки на предприятии ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» показывает, что в 2019 г. количество несоответствующей продукции по дефекту «вкатанная окалина» составила порядка 2628 т., что составляет порядка 30% от всей продукции, переведенной в категорию несоответствующая продукция.

Как правило, на современных станах горячей прокатки предусмотрены следующие системы удаления окалины: механический способ, заключается в использовании оборудования - окалиноломателей (черновая стадия обработки), гидромеханический способ заключается в использовании систем гидравлического удаления окалины (гидросбивов), которые установлены на клетях в непрерывной черновой группе и перед чистовой группой клетей.

Температура металла на входе в чистовые группы клетей составляет 1020-1080 °С, время нахождения металла в клетях - 30...60 сек, температура конца прокатки составляет 830..8700С. За это время на поверхности металла возникают процессы, приводящие к образованию тонкого слоя окалины, которую многие авторы называют «воздушной» или вторичной, (рис.2.56).

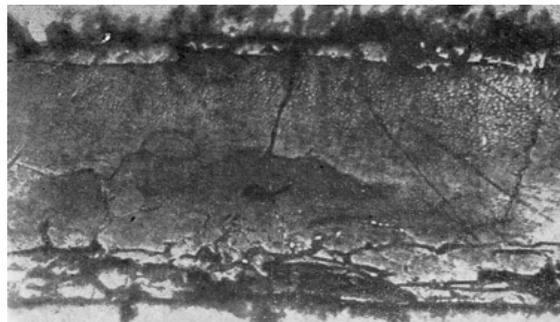


Рис. 2.56. Строение воздушной окалины, образовавшейся на заготовке при 950...1000 °С в течении 10с. (x600)

Термин «воздушная» связан, прежде всего, с образованием мелкодисперсной пыли преимущественно за последними клетями, которая в качестве мелкодисперсного абразива попадает в узлы трения валковых систем, и отрицательно влияет на качество полосы.

Также наличие мелкодисперсной пыли отрицательно влияет и на здоровье обслуживающего персонала. Такие производственные процессы, как зачистка поверхности и удаление поверхностных пороков (окалины) металла, неизменно сопряжены с угрозой попадания железосодержащей пыли и испарений в дыхательные пути. В этом случае железо вызывает локальное раздражение легких и желудочно-кишечного тракта. Исследования показывают, что продолжительный контакт с пылью, содержащей железо и другие металлы, может привести к функциональному расстройству легких. Попадание в дыхательные пути пыли, содержащей оксиды кремния или железа, может привести к пневмокониозу. Находящийся в пыли оксид железа может выполнять роль «ко-канцерогенного» вещества, способствующего развитию ракового заболевания, в том случае, когда он воздействует на организм одновременно с собственно канцерогенными веществами [2.69].

Одним из перспективных направлений борьбы с воздушной или вторичной окалиной - установка дополнительных систем, позволяющих устранять окалину с поверхности листов и работающих по принципу гидросбива, но с учетом меньшей толщины сформированного слоя окалины. Авторы назвали данную систему - «мини гидросбивы». Непосредственно «мини гидросбивы» можно установить как дополнительное оборудование, так и реконструировать уже установленные системы межклетьевого охлаждения полосы. Более подробно вопросы, связанные с разработкой и проектированием данных систем освещены в работах [2.70-2.73].

2.5. Исследование влияния технологических режимов горячей прокатки на отсортировку по дефекту «вкатанная окалина», на примере широкополосного стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК»

Известно, что с увеличением толщины прокатываемой полосы, она менее интенсивно охлаждается и требует меньшей скорости транспортировки для достижения нужной температуры металла при смотке. Более тонкий металл, наобо-

рот, требует более быстрой транспортировки. Такое изменение скорости прокатки приводит к температурному соответствию (балансу), но в то же время является причиной разной степени окисленности поверхности металла с следовательно одной из причин образования дефекта «вкатанная окалина».

Согласно проведенным исследованиям, при прокатке тонкой полосы, которая транспортируется с большей скоростью, время воздействия окружающей атмосферы и охлаждающей воды меньше, соответственно, меньше и толщина окалины. С увеличением толщины металла на нем образуется больше окалины (рис. 2.56). Таким образом, взаимосвязанные параметры – скорость полосы и ее толщина существенно влияют на окисление металла. Для решения данного вопроса необходимо выполнение ряда условий-строгое соблюдение идентичных температурных условий в каждой точке полосы одной толщины при горячей прокатке обеспечивает незначительные изменения толщины окалины по длине и ширине полос – в пределах 1 – 2мкм (рис. 2.57).

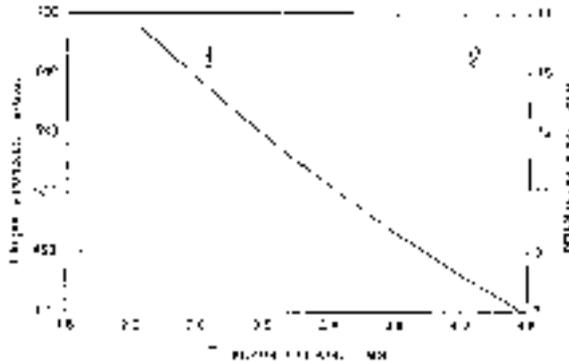


Рис. 2.57 Изменение скорости движения полосы (1) и толщины окалины (2) в зависимости от толщины полосы

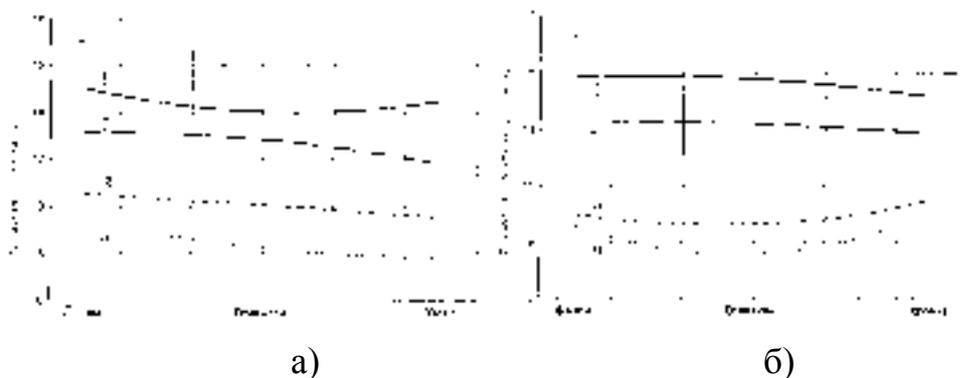


Рис. 2.58 – Изменение толщины окалины по длине (а) и ширине (б) полос толщиной 4,3 (1), 3,5 (2), 2,5 (3) и 2,0 мм (4)

В значительной мере возможность механического или химического удаления окалины зависит от ее количества, состава и структуры, на которые в свою очередь, влияют температура, время выдержки, состав и химический состав окисляющего изделия, а также особенности охлаждения или нагрева металла в процессе горячей деформации и после нее. Поэтому, для выбора способа удаления окалины нужен индивидуальный подход для каждого производства.

При удалении окалины на поверхность раската через сопла подается вода, имеющая определенную форму струи и высокую скорость. В физическом отношении типичный механизм процесса удаления окалины представлен ниже:

разрушение слоя окалины под действием высокой энергии падающей струи воды;

отделение слоя окалины в результате различной усадки основного металла и окалины при резком ударном охлаждении;

отрыв окалины под действием взрывообразного испарения капель воды под ее слоем;

смывание отделившейся окалины в результате наклонного направления струи из сопла.

Специфические свойства струи, которые необходимы для удаления окалины, зависят от следующих технологических параметров сопел: распределение форсуночной воды, распределение давления в струе, угол расширения струи, угол углубления струи и объемный расход.

Важнейшей характеристикой сопла является давление удара при встрече с поверхностью раската, которое определяется как частное от деления усилия струи на площадь поверхности, подвергнутой удару (Н/мм²). [2.71-2.74]

Давление в сопле, размер сопла и угол струи линейно влияют на давление удара. Высота сопла оказывает влияние по экспоненциальному закону; при этом (независимо от угла струи) изменяются одновременно два параметра: ширина струи и ее глубина.

Таким образом, наиболее влияющим параметром является высота струи. При сокращении расстояния от сопла до поверхности раската в два раза давление удара о поверхность раската увеличивается примерно в четыре раза. Следовательно для получения экономически выгодной конструкции следует стремиться к

возможно более короткому расстоянию от сопла до раската, причем на практике необходимо учитывать потери тепла раскатом и скорость его движения.

Расчет установки удаления окалины следует выполнять по ожидаемому виду окалины. Наибольшая доля первичной окалины образуется в печи. Для того чтобы печную окалину можно было легко удалять, печи должны работать в окислительном режиме. При этом образуется толстый, сухой и легко удаляемый слой окалины. С помощью охлаждения можно достичь различной усадки окалины и основного металла. При этом на границе раздела между ними возникают тангенциальные силы среза, которые приводят к образованию трещин в окалине.

Иначе обстоит дело при образовании тонкой и прочно держащейся окалины, которая возникает тоже при окислительном режиме работы печи на высоколегированных и низкоуглеродистых сталях. При удалении окалины ввиду прочного соединения ее тонкого слоя с основным металлом нельзя просто использовать эффект различной усадки. В этом случае необходимо дробление и смывание, что требует более высокого давления удара о поверхность и меньшей водяной нагрузки на единицу площади поверхности. Это возможно только при небольшом расстоянии струи до раската и применении сопел малого размера.

Методика проведения исследований

Для устранения всех вышеперечисленных дефектов связанных с образованием окалины, на листовом стане горячей прокатки 2000 ПАО «ММК» была произведена модернизация основного оборудования. Производственной компанией «Spraying System» был установлен новый гидросбив окалины перед клетью №1. С целью изучения работы нового гидросбива был реализован промышленный эксперимент. Специалистами было разработано три режима прокаток,

вариант 1 – при включенном гидросбиве №1, выключить гидросбивы №5,6;

вариант 2 – при включенном гидросбиве №1, выключить 2 гидросбива черновой группы в другом варианте (№3,5 или №3,6);

вариант 3 – при включенном гидросбиве №1, выключить один из гидросбивов черновой группы (№3,5,6), при этом уменьшить расход воды на гидросбиве №1.

В ходе проведения эксперимента фиксировались следующие параметры:

1. расход воды на каждый гидросбив, суммарный расход воды при работе всех гидросбивов, рабочее давление воды в системе гидросбива.

2. при проведении опытных прокаток дополнительно фиксировались температура нагрева слябов, скорость движения раската по промежуточному рольгангу, количество включенных энкопанелей, температура на промежуточном рольганге, температура конца прокатки, длина горячих концов полосы, температура смотки полос.

3. Отбирались пробы на определение величины потери металла с окалиной и фазового состава образовавшихся окислов. Из каждой пробы вырезали образцы для определения толщины слоя окалины на поверхности горячекатаных полос. Пробы отбирались с 1-го и 2-го витка рулона.

Сравнительная характеристика гидросбива №1 фирм НКМЗ и «Spraying System» представлена в таблице 2.13.

Таблица 2.13

Сравнительные характеристики гидросбивов

| № п/п | Характеристики гидросбива | | НКМЗ | Spraying Systems |
|-------|--|------|--|------------------------------------|
| 1 | Вид форсунок | | Ринкос (Ижевск), (копия Lehler) (гидросбив №3,5,6) | Spraying Systems (гидросбив №1) |
| 2 | Угол раскрытия струи, ° | | 30 | 10 |
| 3 | Расход воды, м3/час | верх | 90 | 310,8 |
| | | низ | 90 | 255,7 |
| 4 | Расстояние до полосы, мм | верх | 250 | 237 |
| | | низ | 250 | 147 |
| 5 | Суммарный расход воды, м3/час | | 282 | 537,5 |
| 6 | Давление, бар | | 150 | 150 |
| 7 | Удельная сила удара струи, Н/мм ² | верх | 0,41 | 1,12 |
| | | низ | 0,41 | 1,44 |
| 8 | Удельная энергия удара, кДж/м ² | верх | 4 | 42 |
| | | низ | 4 | 42 |
| 9 | Количество коллекторов | верх | 2 | 1 |
| | | низ | 2 | 1 |
| 10 | Количество сопел на коллекторе | верх | 30 | 47 |
| | | низ | 30 | 87 |

В период опытно-промышленной эксплуатации гидросбива №1 производства фирмы «Spraying Systems» было произведено 77385 полос и отобрано 5365 проб для осмотра качества поверхности.

Результаты исследования

На пробах, поступающие на исследование на поверхности визуально наблюдались темные или светлые полосы и по внешнему виду сложно определить причину образования дефектов. Результаты анализа партий, пробы от которых поступили на исследование в отдел контроля производства (ОКП) приведены в таблице 2.14.

Из таблицы 2.14 видно, что из 3374,8 тонны переведенных в категорию несоответствующая продукция (НП) с дефектом «недотрав» на 47% на пробах отмечена «вкатанная окалина».

Таблица 2.14

Анализ проб, поступивших на исследование

| Первоначальная причина дефекта | Группа поверхности | Отмечено ОКП, т | По дефектам | | | | |
|--------------------------------|--------------------|-----------------|-------------------|---------|-------------------|-------------|--------------------|
| | | | Вкатанная окалина | Плена | Вкатанные частицы | загрязнения | Мех. травмирование |
| недотрав | всего | 3374.8 | 1574.2 | 1184.9 | 196.3 | 298.4 | 121.0 |
| | | 100% | 47% | 35% | 6% | 9% | 4% |
| | В т.ч. I группа | 496.8 | 158.48 | 175.2 | 143.5 | 19.63 | 0 |
| | | 100% | 32% | 35% | 29% | 4% | 0% |
| плена | всего | 13340.0 | 934.3 | 10909.3 | 215.2 | 36.3 | 1244.7 |
| | | 100% | 7% | 82% | 2% | 0% | 9% |
| | В т.ч. I группа | 2608.1 | 49.5 | 2379.9 | 0.0 | 0.0 | 178.7 |
| | | 100% | 2% | 91% | 0% | 0% | 7% |

Анализ проводился за период с марта по октябрь 2020 года

Часть проб (35%) с первоначальной классификацией дефекта поверхности «недотрав» по результатам заключений металлоскопов определены, как дефект

«плена». Аналогично часть проб (7%) с первоначальной классификацией дефекта поверхности «плена» по результатам заключений металлоскопов определены, как дефект «недотрав». Кроме того, причиной образования дефектов темные или светлые полосы явилось наличие: вкатанных части (6 и 2 % соответственно для дефектов «недотрав» и «плена»), поверхностных углеродсодержащих загрязнений (9 и 0%) и механического травмирования. В связи ужесточением технологии горячей прокатки при производстве подката для 1 группы отделки поверхности, дефект «вкатанная окалина» был отмечен на 32 и 2 % партий.

Анализ глубины залегания дефектов представлен в таблице 2.14.

По результатам литературного поиска и на основании имеющегося опыта были разработаны технические и технологические мероприятия:

Таблица 2.15

Анализ глубины залегания дефектов

| Первоначальная причина дефекта | | Вкатанная окалина | | |
|--------------------------------|---|-------------------|------------------|----------------|
| | | Всего | Глубина | |
| | | | не более 0.02 мм | больше 0.02 мм |
| недотрав | т | 1554.5 | 1251.8 | 302.6 |
| | % | 100% | 81% | 19% |
| плена | т | 934.3 | 621.4 | 313.0 |
| | % | 100% | 67% | 33% |
| Итого | т | 2488.8 | 1873.2 | 615.6 |
| | % | 100% | 75% | 25% |

- для более качественного удаления печной окалины с разогретой заготовки были заменены коллектора с форсунками гидросбива №1 на новые, производства фирмы «Спреин Системс»

В период пуска работали по варианту №1 (выключены гидросбивы №5,6), затем перешли на вариант №3 (выключен гидросбив №6 без уменьшения расхода воды).

При этом ни на одной из них не выявлено дефекта «вкатанная окалина». При визуальном наблюдении за работой гидросбива можно отметить, что качест-

во удаления окалины с поверхности слябов улучшилось по сравнению с гидросбивом старой конструкции за счет более высокой удельной силы удара струй и уменьшения расстояния от сопел до поверхности сляба.

Брак по остаткам окалины на подкате для холоднокатаной полосы благодаря модернизации установок гидросбива сократился в общей сложности на 55%.

Период эксплуатации гидросбива №1 фирмы «Spraying Systems» с 02.05.2019 по 31.10.2020 характеризовался следующими показателями:

брак по дефекту «окалина» полученный в цехе горячей прокатки составил 0,006% или 115 т (0,013% или 243 т за аналогичный период 2017 года);

несоответствующей продукции по дефекту «окалина» не было (0,003 % или 55 т за аналогичный период 2019 года);

несоответствующая продукция (в.ч. второй сорт) полученные на х/к прокате по дефекту «окалина» 0,06% или 405 т (0,12% или 709 т за аналогичный период 2019 года). Брак и несоответствующая продукция снижены более чем в 2 раза.

Совершенствование технологии листовой горячей прокатки с целью снижения дефекта «вкатанная окалина»

С целью определения влияния температурно-скоростных режимов горячей прокатки на количество и фазовый состав окалины, было принято решение использовать в качестве объекта исследования подкат для жести ПАО «ММК». Для сравнения были взяты марки стали: 08Ю, 08пс по ГОСТ 9045-93, 08пс для оцинкования, 006/IF. Технологический процесс производства жести включает в себя выплавку, разливку, горячую прокатку на непрерывном широкополосном стане 2000, травление горячекатаной полосы в растворе соляной кислоты, роспуск, холодную прокатку на пятиклетевом стане 1200, термическую обработку (отжиг в колпаковых печах (КП) или в агрегате непрерывного отжига (АНО)) и дрессировку.

Горячую прокатку полос из стали марок 08пс ($C \leq 0.06\%$, $Mn 0.20-0.30\%$, $Si \leq 0.06\%$, $S \leq 0.025\%$, $P \leq 0.020\%$, $Cr \leq 0.06\%$, $Ni \leq 0.06\%$, $Cu \leq 0.20\%$, $N \leq 0.008\%$, $Al 0.02-0.05\%$) на стане 2000 толщиной 2,0 – 2,3мм проводили по четырем схемам, в зависимости от вида термической обработки подката (периодической – в колпаковых печах, или непрерывной – в агрегате непрерывного отжига) и температуры раска-

та, указанным в таблице 2.16. При этом температура раската перед чистовой группой клетей (Т6) для первого диапазона ширин (2.0x1400-1500мм, 2.1x1400-1575мм, 2.2x1400-1650мм, 2.3x1400-1715мм) выдерживалась в диапазоне 1050 – 1080 °С, а для второго диапазона ширин (2.0- более 1500мм, 2.1- более 1575мм, 2.2- более 1650мм, 2.3- более 1715мм) – в диапазоне 1070 – 1100 °С. Для анализа были отобраны партии с температурой за клетью №6 менее 1070 и более 1080, т.е. исключили партии с переходной температурой 1070-1080 0С

Горячую прокатку полос размером 2.0 – 2.3 мм из стали марок 08Ю, 08пс по ГОСТ 9045-93, 08пс для оцинкования, 006/IF на стане 2000 производили по режимам показанным в таблице 2.16. При этом на всех исследуемых партиях температура конца прокатки находилась в пределах 865 – 875 °С (за исключением марки 006/IF – 880 – 910 °С), поэтому Ткп исключили из рассмотрения факторов, влияющих на окалинообразования.

Таблица 2.16

Температурные режимы прокатки

| Схема прокатки | Температурный режим, °С | | | Вид отжига |
|----------------|-------------------------|---------|---------|-------------------|
| | Т6 | Ткп | Тсм | |
| I | ≤ 1070 | 854-877 | 653-697 | Колпаковый отжиг |
| II | ≤ 1070 | 860-878 | 711-731 | Непрерывный отжиг |
| III | ≥ 1080 | 860-882 | 659-684 | Колпаковый отжиг |
| IV | ≥ 1080 | 864-880 | 720-732 | Непрерывный отжиг |

Таблица 2.17

Температурные режимы прокатки

| Марка стали | Температурный режим, °С | | | Вид отжига |
|----------------|-------------------------|---------|---------|-------------------|
| | Т6 | Ткп | Тсм | |
| 08Ю хк | ≤ 1070 | 864-895 | 542-573 | Колпаковый отжиг |
| 08пс хк | ≤ 1070 | 860-888 | 560-595 | Колпаковый отжиг |
| 08пс оцинковка | ≥ 1080 | 858-882 | 645-675 | Непрерывный отжиг |
| 006/IF | ≥ 1080 | 892-921 | 711-745 | Непрерывный отжиг |

Для сравнения был взят объем поставленного подката для цехов холодной прокатки и количество металлопроката переведённого в несоответствующую продукцию по дефекту «вкатанная окалина» см. таблицу 2.18.

Таблица 2.18

Производство в поток цехам холодной прокатки

| Параметр | I схема | II схема | III схема | IV схема |
|----------------------------|---------|----------|-----------|----------|
| Вид отжига | КП | АНО | КП | АНО |
| T _б | ≤ 1070 | ≤ 1070 | ≥ 1080 | ≥ 1080 |
| Объем прокатанных полос, т | 99280 | 38255 | 39501 | 9989 |
| Объем отсортировки, т | 156,98 | 27,82 | 229,98 | 14,00 |
| % отсортировки | 0,158% | 0,073% | 0,582% | 0,140% |

Анализ данных, приведенный в таблице 2.18 показывает, что снижение температуры за клетью №6 уменьшает отсортировку по дефекту «вкатанная окалина». На подкате для колпакового отжига в 3,7 раза, а на подкате для АНО в 1,9 раз.

Перед задачей рулонов на НТА производили отбор проб от заднего и переднего конца полосы по ходу прокатки на стане 2000 на расстоянии не менее 6 метров. Далее вырезались карточки размером 100x100мм с середины по ширине полосы. Авторами работы разработана методика по определению толщины слоя окалины, основанная на весовом методе. При определении толщины полагали, что окалина распределена равномерно по всей поверхности образца. После стравливания окислов с основного металла, их взвешивали и по формуле (1) определяли толщину окисленного слоя. Средние значения количества окалины представлены в таблице 2.19. Результаты расчетов толщины слоя окалины представлены в таблице 2.20. Зависимость количества окалины от температуры смотки для переднего и заднего концов полосы, а также средние значения между ними представлены на рисунке 2.56. Зависимость толщины слоя окалины от температуры смотки графически представлена на рисунке 2.56.

$$h = m / (\rho \cdot b \cdot l), \quad (2.71)$$

где m – масса окислов, мг; ρ – плотность окалины (приняли на основании литературных данных 5600 кг/м³); b, l – размеры образца, мм.

Значения количества окалины

| Марка стали | Температура смотки, °С | Среднее значения по количеству окалины, г/м ² | | Средние значения по переднему и заднему концам, г/м ² |
|----------------|------------------------|--|--------------|--|
| | | передний конец | задний конец | |
| 08Ю хк | 542-573 | 61,3 | 49 | 55,15 |
| 08пс хк | 560-595 | 64 | 47 | 55,5 |
| 08пс оцинковка | 645-675 | 76 | 68 | 72 |
| 006/IF | 711-745 | 91,9 | 87 | 89,45 |
| АНО 08пс | 712-735 | 89,7 | 80,4 | 85,05 |
| КП 08пс | 660-690 | 73 | 69,2 | 71,1 |

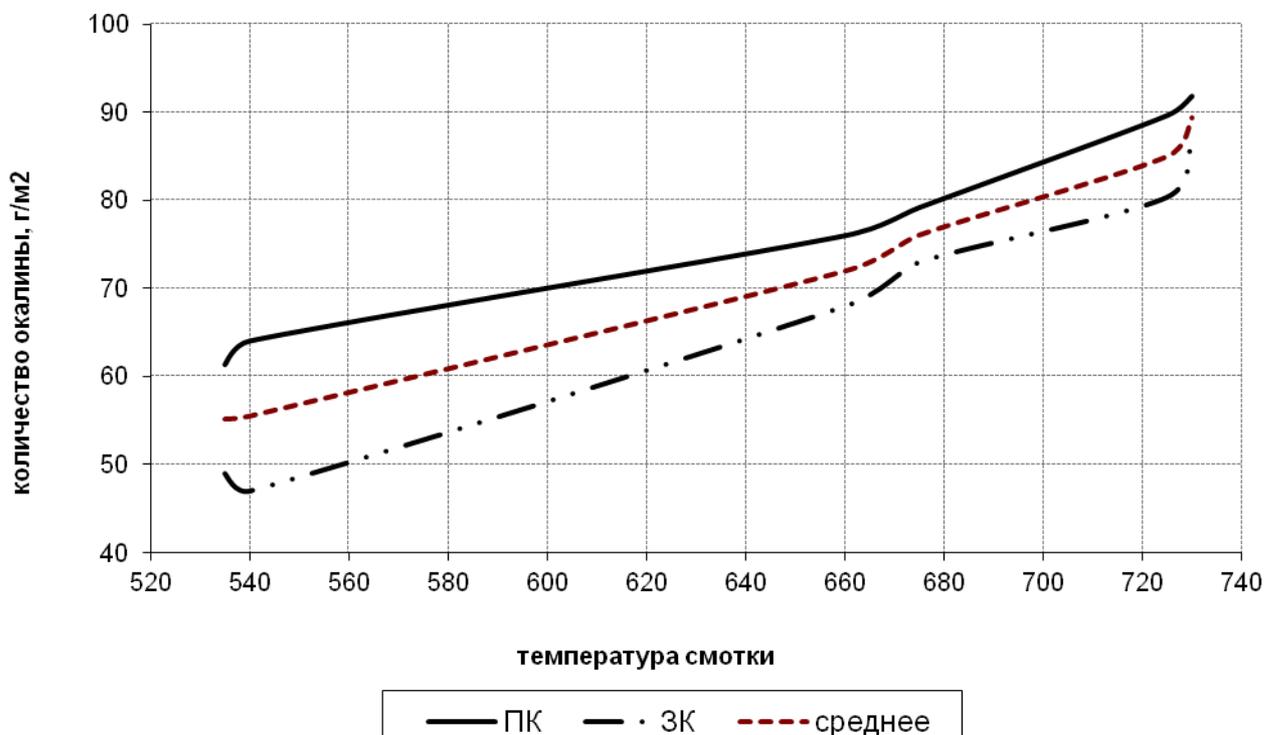


Рис. 2.59 Зависимость количества окалины от температуры смотки

На потерю металла с окалиной значительное влияние оказывает температура смотки полос, изменяющаяся в ходе опыта на 170 °С. Анализ влияния температуры смотки на толщину слоя окалины показал, что изменение температуры смотки от 560 до 730 0С приводит к увеличению слоя окалины от 55,15 г/м² до 89,45 г/м². В пересчете по формуле (2.71) потери металла с окалиной составят от 0,010 до 0,016 мм.

Окалинообразования на переднем и заднем концах полосы

| Марка стали | Температура смотки, 0С | Среднее значения по толщине окалины, мм | | Средние значения по переднему и заднему концам, мм |
|----------------|------------------------|---|--------------|--|
| | | передний конец | задний конец | |
| 08Ю хк | 542-573 | 0.011 | 0.009 | 0.010 |
| 08пс хк | 560-595 | 0.011 | 0.008 | 0.010 |
| 08пс оцинковка | 645-675 | 0.014 | 0.012 | 0.013 |
| 006/IF | 711-745 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| АНО 08пс | 712-735 | 0.013 | 0.012 | 0.013 |
| КП 08пс | 660-690 | 0.016 | 0.014 | 0.015 |

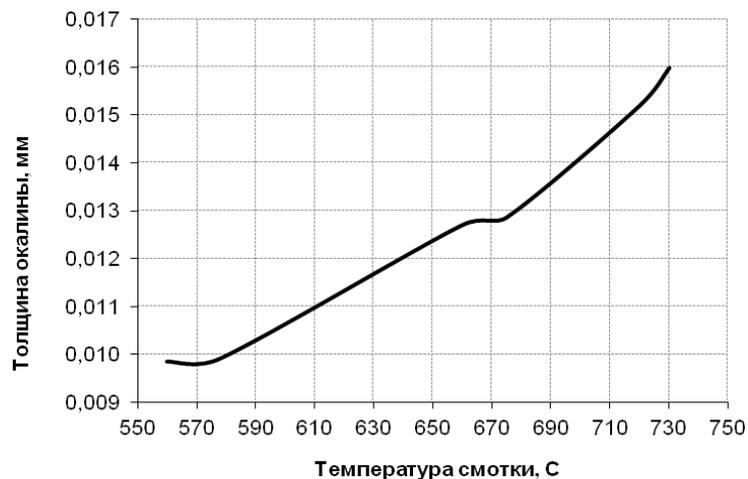


Рис. 2.61. Зависимость толщины слоя окалины от температуры смотки

- для изучения влияния температуры за 6 клетью на отсортировку по дефекту «вкатанная окалина» в соответствии с которым, предлагалось выдерживать температуру после черновой стадии обработки в диапазоне 1030...1070 °С

- для исследования влияния температуры смотки на толщину слоя окалины проведен выборочный отбор проб рулонов, смотанных с различной температурой смотки.

Введён в работу самоочищающийся фильтр в системе охлаждения валков, заменены коллектора с форсунками гидросбивов и внесены изменения режимов горячей прокатки.

3. РАЗРАБОТКА НАУЧНО ОБОСНОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ДВИЖУЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА

3.1 Источники ошибок анализа и методы повышения качества элементного анализа рентгенофлуоресцентным методом

Этапы аналитического контроля состоят из многочисленных операций, требующих значительных затрат времени и ресурсов. При этом каждый этап включает в себя как объективные, так и субъективные источники ненадежности. Поэтому вычисляя общую погрешность результатов всего аналитического контроля, необходимо суммировать случайные и систематические погрешности, которые возникли при выполнении всех этапов контроля: пробоотбора, пробоподготовки и измерения аналитического сигнала.

Систематической погрешностью считается та погрешность, которая закономерно изменяется во времени при повторных измерениях либо же остается постоянной. В этапах пробоотбора и пробоподготовки систематическими погрешностями являются:

- Некорректная методика разделки проб, включая сегрегацию, пережог при сушке, отбрасывание недоистертых частиц и т.д.;
- Изменение объекта в процессе пробоотбора: сегрегация, испарение, разрушение гранул, возникновение реакций (катализ при контакте с устройствами, разложение, окисление);
- Потеря частей пробы с образующейся пылью, особенно если минеральный и химический состав пыли отличается от таковых для основной пробы;
- Потеря воды, серы, кадмия, рения, талия, ртути и других высоколетучих компонентов в процессе истирания пробы. Эти потери вызваны как диспергированием, так и увеличением температуры твердого вещества в процессе истирания. При этом происходит рост поверхности, приводящий к повышению скорости реакций с атмосферой. Это может вызывать как

окисление (например, сера) так и восстановление компонентов пробы (например, ртуть). Также необходимо учитывать потери летучих соединений в процессе хранения проб;

- Попадание в пробу материалов механических частей устройств используемых для дробления и истирания, например, загрязнение от истирания в ступке, загрязнение железом в результате истирания металлических частей. В том случае, когда дробящие части изготовлены из чугуна или слаболегированной стали, загрязнение пробы может достигать 5-6 %.
- Изменение состава пробы в промежутке времени между отбором пробы и ее анализом; это особенно важно при анализе на углерод и кислород, а также при определении газов в металлах;
- Загрязнение проб: 1) материалами от предыдущих партий; 2) объектами иной природы при использовании оборудования без предварительной очистки.
- Влияние на состав пробы воды вне зависимости от ее природы: химическая, физико-химическая (адсорбционная и осмотическая) или физическая (макрокапиллярная влага и микрокапиллярная). В случае с твердыми веществами, содержание воды изменяется в зависимости от ряда факторов, в частности температуры, влажности, степени измельчения;
- В процессе хранения твердых проб происходит их загрязнение сурьмой и хлором если они хранятся в пластмассовой таре. Растворы при хранении могут вымывать компоненты сосудов, что приводит к их загрязнению. Также на состав растворов влияет нарушение состояния равновесия, приводящее к выпадению осадка или сорбционным процессам на поверхностях сосудов;
- Ликвация, а также взаимодействие компонентов расплавов металлов с материалом контейнера, со шлаком и атмосферой;
- Низкая квалификация персонала, занимающегося отбором проб;

- Несовершенство методического обеспечения процессов разложения проб, разделения и концентрирования определяемых компонентов (недостаточная частота применяемых реактивов, неправильный выбор растворителя или плавня).

Причинами появления случайных погрешностей могут служить следующие факторы:

1. Недоизмельченность проб;
2. Малое число инкрементов (разовых проб) для составления генеральной пробы;
3. Опущение части параметров объекта влияющих на результат анализа. Например, могут быть потеряны в виде пыли мелкие частицы при отборе гранулированных проб в момент переключения конвейера.
4. Высокая степень неоднородности проб.

Систематическую погрешность опробования практически невозможно обнаружить, поскольку не существует стандартизированных образцов или образцов сравнения для выявления данной погрешности. Поэтому негативные аспекты устраняются либо прямыми опытами, либо косвенно.

Как следствие, устранение систематических погрешностей возможно при условии чистоты оборудования и рабочего места в целом, точного соблюдения правил и схем разделки проб, а так же применение надежных аттестованных методик разложения проб, разделения и концентрирования компонентов.

Влияние случайной погрешности может быть минимизировано увеличением числа проб либо анализом дублирующих проб.

При создании процедуры опробования важно правильно определить погрешность этапов отбора и подготовки проб и их вклад в общую ошибку анализа. Для этого применяется дисперсионный анализ. Следуя разработанной методике, отбирается n серий точечных проб, при этом получается n генеральных проб. Каждая генеральная проба разбивается на k аналитических проб, каждая из которых анализируется. Полученные данные обрабатываются статистическими

методами.

Итоговая погрешность опробования и химического анализа выражается полной дисперсией, состоящей из дисперсий каждого этапа аналитического исследования:

$$S_{\Sigma}^2 = S_{п.о.}^2 + S_{п.п.}^2 + S_{ан.}^2, \quad (3.1)$$

где S - стандартное отклонение;

$S_{п.о.}^2$ - дисперсия пробоотбора;

$S_{п.п.}^2$ - дисперсия пробоподготовки;

$S_{ан.}^2$ - дисперсия химического анализа.

В свою очередь, $S_{п.о.}^2$ складывается из дисперсии *распределения* и дисперсии *состава*. Дисперсия *распределения* зависит от числа разовых проб, использованных для формирования исходной пробы. С увеличением числа точечных проб она уменьшается. Дисперсия *состава* определяется фракционным составом, химическим и петрографическим составом материала. Она может быть уменьшена путем увеличения массы пробы.

Для однородных материалов составляющие дисперсии, связанные с процедурами пробоподготовки и измерения, обычно невелики, и основной вклад в ошибку вносится процессом пробоотбора. В случае неоднородных материалов зачастую бывает необходимо использовать сложную многоэтапную процедуру подготовки проб. В этом случае полная дисперсия в основном определяется процессами пробоподготовки.

Для анализа наиболее важной величиной является дисперсия опробования $S_{опр.}^2$, представляющая собой сумму дисперсий пробоотбора и пробоподготовки так как она характеризует реальную дисперсию анализируемого объекта.

$$S_{опр.}^2 = S_{п.о.}^2 + S_{п.п.}^2. \quad (3.2)$$

Погрешность опробования не должна превышать погрешность измерения. Погрешность опробования можно оценить, исходя из известной погрешности измерения и установленной в процессе эксперимента суммарной погрешности, по

формуле

$$S_{\text{опр}}^2 = S_{\Sigma}^2 - S_{\text{ан}}^2. \quad (3.3)$$

Дисперсия измерения $S_{\text{ан}}^2$, может быть определена путем анализа аттестованных стандартных образцов, степень однородности которых достаточно высока, чтобы считать его гомогенным. Согласно критерию ничтожных погрешностей можно пренебречь составляющей погрешности, которая втрое меньше суммы остальных составляющих. Поэтому в том случае, когда

$$S_{\text{ан}}^2 \leq \frac{S_{\text{опр}}^2}{3} \quad (3.4)$$

погрешность опробования $S_{\text{опр}}^2$ будет определяться полной дисперсией S_{Σ}^2 .

В случае, если задача аналитического контроля решается с применением спектрометров, установленных непосредственно над конвейером и ведущих непрерывное измерение материала возникает возможность устранения части погрешностей, в частности, полностью устраняется ошибка пробоподготовки, поскольку в этом случае материал анализируется непосредственно.

Однако в случае применения рентгенофлуоресцентного спектрометра влияние могут оказывать другие источники ошибок. Неудовлетворительный контроль за переменными в процессе их измерения, вызываемый сильными колебаниями состава анализируемого материала при неизменных поправочных коэффициентах при градуировке. Подобная ситуация показана на рисунке 3.1. В данном случае при градуировке были использованы образцы с небольшим разбросом концентраций (красная пунктирная линия на рисунке), при такой градуировке в области других концентрациях при данном сигнале I_x будет значительным расхождение между измеренной и действительной концентрациями ΔC_x . Зелёной линией показана правильная градуировка, а синей – насколько результаты при неправильной градуировке будут отличаться от реальных.

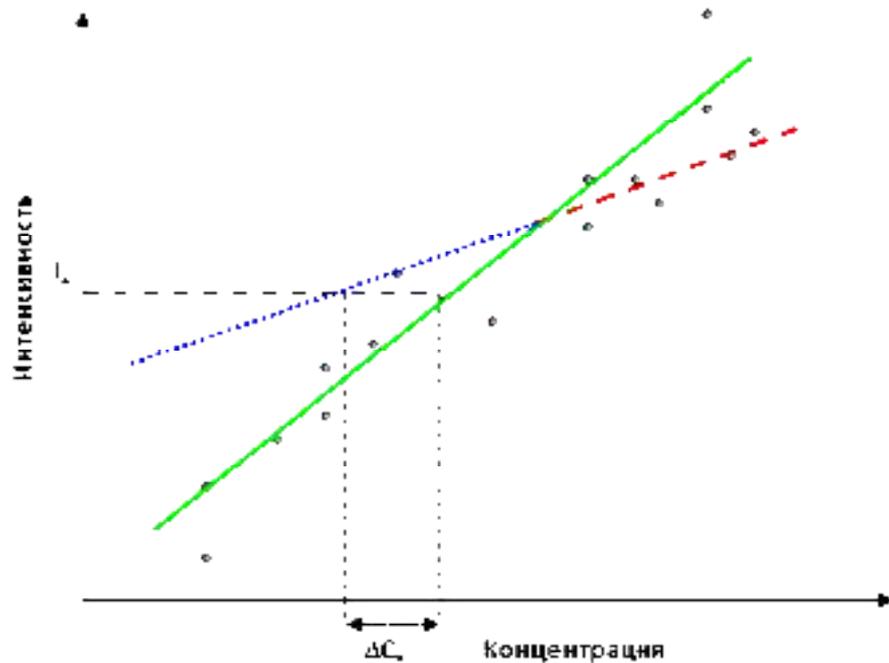


Рис. 3.1. Примеры правильной и некорректной градуировки прибора

Малая глубина проникновения возбуждающего излучения в образец и еще меньшая глубина выхода характеристического собственного излучения, так же как и взаимодействие между излучением и атомами, являются причинами того влияния, которое оказывают на результаты рентгеноспектрального анализа зернистость и минералогический состав порошкообразных образцов или состояние поверхности материала.

Ошибки, допускаемые при снятии данных и в вычислениях вследствие отклонения оптимального расстояния между исследуемым материалом и детектором. На рисунке 3.2 наглядно продемонстрирована такая ситуация, когда из-за превышения оптимального расстояния вторичное излучение не попадает в окно детектора, вследствие чего количество регистрируемых фотонов резко сокращается, соответственно результаты анализа будут либо равными нулю, либо занижены в зависимости от степени нарушения.

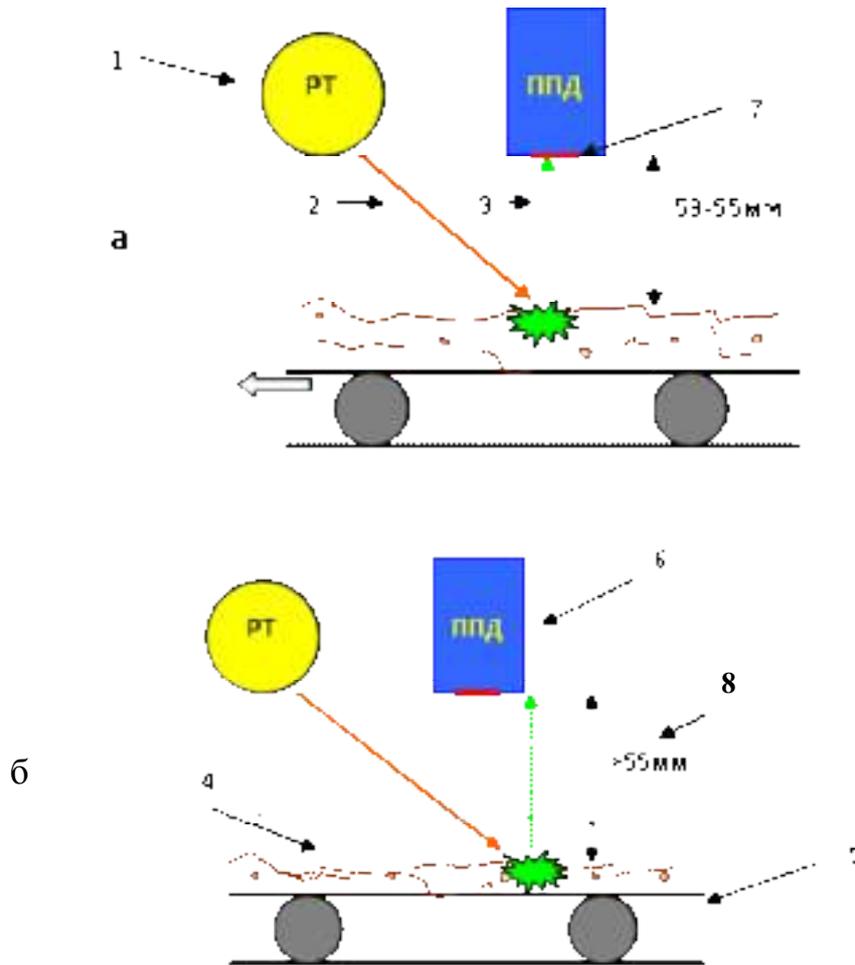


Рис. 3.2. Схема измерения аналитического сигнала при оптимальном (а) и недостаточном (б) расстоянии между детектором и слоем материала: 1 – рентгеновская трубка; 2 – первичное излучение рентгеновской трубки; 3 – вторичное характеристическое излучение материала; 4 – исследуемый материал; 5 – ленточный конвейер; 6 – полупроводниковый детектор; 7 – окно детектора; 8 – расстояние между исследуемым материалом и детектором.

Рентгеновские фотоны, формирующие спектр, зарегистрированный от анализируемого материала, поглощаются детектором анализатора в течение всей продолжительности одного измерения t . Таким образом, накопленный рентгеновский спектр определяется средним составом измеряемого материала за все время измерения.

Для компенсации выявляемых систематических погрешностей необходимо, при возможности использовать методы компенсации [3.1,3.2]. Для случая, когда систематическая погрешность вызывается отклонением расстояния между

спектрометром и материалом такая модель может быть построена на базе проведения предварительных измерений [3.3,3.4]. В работе [3.3] предложен метод определения расстояния между спектрометром и материалом по «мертвому» времени детектора в процессе измерения спектра. Метод имеет хорошую точность, но не различает приближение материала к спектрометру удаление материала от спектрометра.

Для определения толщины воздушной прослойки между спектрометром и материалом можно использовать характеристическую линию аргона, которая возникает при возбуждении атомов аргона воздуха первичным излучением. При этом при увеличении расстояния между спектрометром и материалом интенсивность характеристических линий меняется как за счет того, что меняются условия измерения и происходит общее изменение интенсивности спектра регистрируемой детектором, так и за счет того, что воздушная прослойка в разной мере поглощает различные рентгеновские фотоны. На рисунке 3.3 представлен график, на котором показана какая доля фотонов различных элементов, в зависимости от их энергии, поглощается воздухом.

Как видно из рисунка 3.3 разных фотоны энергий по-разному поглощаются воздухом, и как следствие, учитывать влияние расстояния между спектрометром и материалом надо для каждой характеристической линии в отдельности.

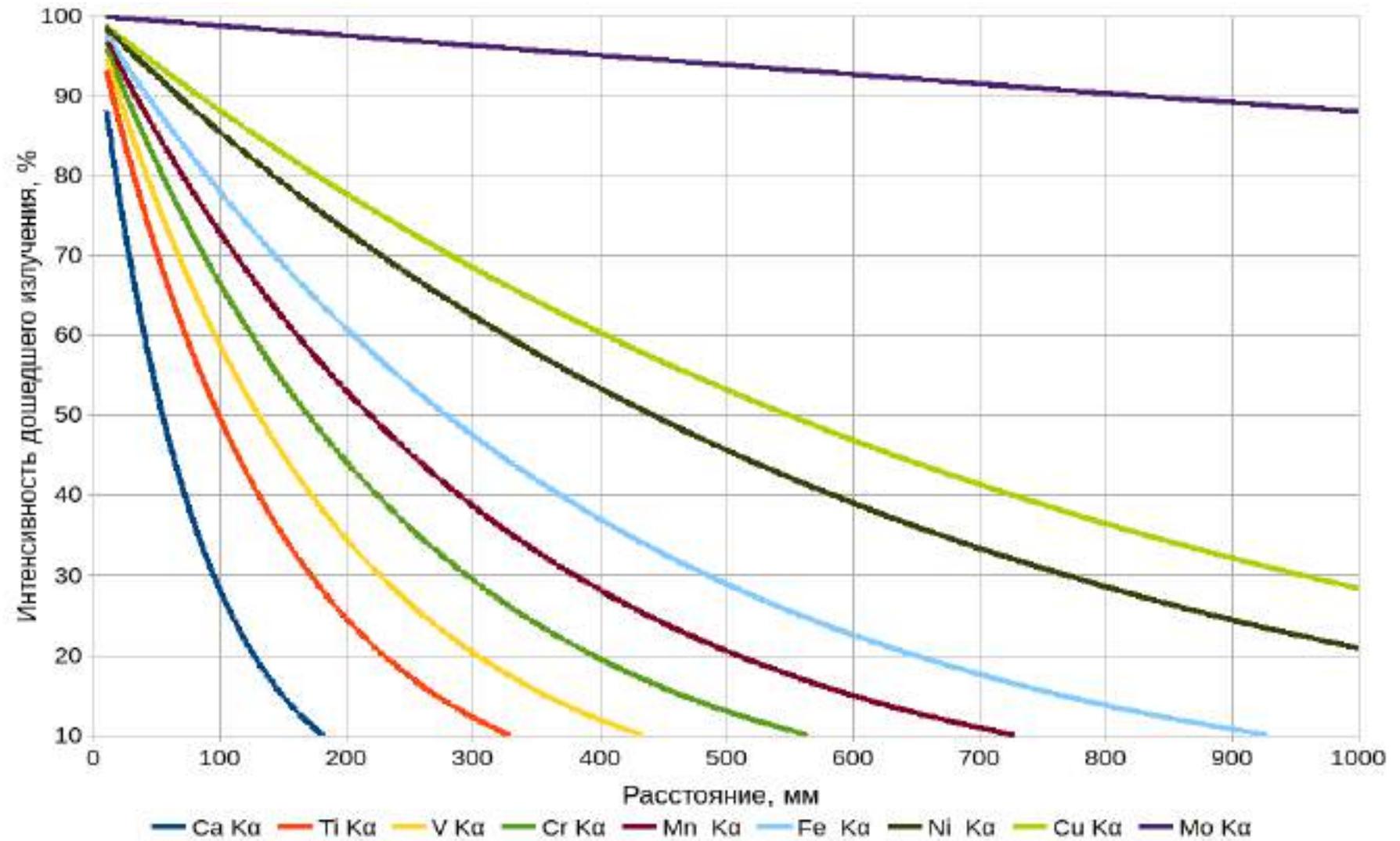


Рис.3.3. Зависимость относительной интенсивности излучения от толщины прослойки воздуха между спектрометром и материалом.

3.2 Испытания и апробация метода деконволюции, проведение лабораторных и промышленных испытаний с внедрением результатов в существующие АСУ ТП горно-обогатительных и металлургических предприятий

Изучение возможности использования предлагаемой методики проводилось в лабораторных условиях учебно-исследовательской лаборатории «TekTerra» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на конфигурациях спектрометра с измерительным узлом, соответствующим оптимальному расстоянию между спектрометром и материалом в 55 мм. Характеристики установки представлены в таблице 3.1.

Предварительно предполагали использовать пробы техногенного магнетитового сырья – отходы тяжелосреднего обогащения магнетитов Саткинского месторождения, для чего изучался элементный и минеральный состав проб [3.5, 3.6] но ввиду сложного минерального состава и высокой ошибки определения Mg решили остановиться на сырье с ценным компонентом, представленном более тяжелыми элементами – Fe и Cu.

Для проведения исследований использовалось 8 стандартных образцов железорудной смеси (ЖРС), 9 стандартных образцов агломерата и 12 стандартных образцов различных железосодержащих материалов (ЖСМ). Состав образцов, которые были использованы для работы, приведен в таблице 3.2.

Таблица 3.1

Характеристики установки для анализа железосодержащих материалов

| | |
|--|---------------|
| Спектрометр | CON-X 02 |
| Материал анода рентгеновской трубки | Mo |
| Фильтр первичного излучения | Не применялся |
| Напряжение на аноде, кВ | 30 |
| Анодный ток, мкА | 100 |
| Время измерения, секунд | 300 |
| Среда измерения | Воздух |
| Расстояние между поверхностью образца и детектором, мм | 55 |

Перед началом работ все подготовленные стандартные образцы, за исключением государственных стандартных образцов (ГСО), были тщательно гомогенизированы и проверены на однородность в соответствии с требованиями ГОСТ 27872-88 «Методика изготовления и аттестации стандартных образцов состава горных пород и минерального сырья» по содержанию основных элементов: Fe, Si, Ca, Mg, Al. Паспорта ГСО, которые использовались в работе, представлены в приложении.

При проведении исследований каждый стандартный образец был измерен 5 раз на рабочих параметрах. После каждого измерения образец перемешивался, перед тем как его повторно устанавливали под спектрометр. Это позволило устранить влияние остаточной неоднородности образцов. Кроме того были проведены измерения стандартных образцов на более коротких и более длинных временных интервалах, а также на различных расстояниях между спектрометром и поверхностью образца. Также производились измерения, позволяющие оценить воспроизводимость анализа. Для этого каждый стандартный образец устанавливался в под спектрометр и оставлялся для проведения непрерывных измерений в течение 12 часов на рабочих параметрах.

Таблица 3.2

Химический состав стандартных образцов, использованных для проведения лабораторных исследований

| Номер пробы | Тип материала | Содержание элементов, массовая доля | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | | Fe | Si | Ca | Mg | Al | Ti | P | S | Cr | Mn | Zn | O |
| 3942 | Агломерат ОАО "ММК" | 57,60 | 3,06 | 5,40 | 1,18 | 1,09 | 0,19 | 0,03 | - | 0,03 | 0,25 | 0,05 | 31,14 |
| 3943 | | 57,40 | 2,99 | 5,59 | 1,16 | 1,11 | 0,18 | 0,03 | - | 0,03 | 0,25 | 0,05 | 31,21 |
| 3944 | | 57,00 | 3,08 | 6,12 | 1,24 | 1,06 | 0,18 | 0,03 | - | 0,02 | 0,25 | 0,05 | 30,96 |
| 3945 | | 56,40 | 3,08 | 6,41 | 1,25 | 1,06 | 0,18 | 0,04 | - | 0,02 | 0,26 | 0,05 | 31,25 |
| 3946 | | 56,00 | 3,04 | 6,85 | 1,21 | 1,04 | 0,17 | 0,03 | - | 0,02 | 0,26 | 0,05 | 31,32 |
| 3947 | | 55,60 | 3,05 | 7,36 | 1,27 | 1,09 | 0,18 | 0,03 | - | 0,04 | 0,02 | 0,29 | 31,08 |
| 3948 | | 55,20 | 3,03 | 7,68 | 1,29 | 1,11 | 0,17 | 0,03 | - | 0,04 | 0,01 | 0,29 | 31,14 |
| 3949 | | 54,80 | 3,01 | 8,04 | 1,26 | 1,10 | 0,17 | 0,03 | - | 0,04 | 0,02 | 0,29 | 31,24 |
| ЖРС1 | | Железорудная смесь ОАО "ММК" | 58,20 | 2,91 | 4,37 | 0,79 | 0,87 | - | - | - | - | 0,69 | - |
| ЖРС2 | 58,40 | | 3,32 | 4,36 | 0,77 | 0,95 | - | - | - | - | 0,71 | - | 29,96 |
| ЖРС3 | 60,60 | | 2,90 | 4,44 | 0,82 | 0,86 | - | - | - | - | 0,73 | - | 28,15 |
| ЖРС4 | 59,10 | | 3,07 | 3,94 | 0,76 | 0,85 | - | - | - | - | 0,72 | - | 30,05 |
| ЖРС5 | 59,50 | | 2,92 | 3,54 | 0,74 | 0,87 | - | - | - | - | 0,68 | - | 30,19 |
| ЖРС6 | 59,60 | | 2,92 | 2,97 | 0,70 | 0,83 | - | - | - | - | 0,70 | - | 30,74 |
| ЖРС7 | 58,50 | | 3,12 | 3,08 | 0,74 | 0,94 | - | - | - | - | 0,66 | - | 32,96 |
| ЖРС8 | 59,50 | | 2,51 | 2,74 | 0,63 | 0,76 | - | - | - | - | 0,69 | - | 33,18 |
| ЖРС9 | 59,10 | | 2,85 | 2,99 | 0,65 | 0,85 | - | - | - | - | 0,71 | - | 32,84 |
| ЖСМ1 | Концентрат обожжённых сидеритов | 48,50 | 4,17 | 1,54 | 6,48 | 1,02 | - | 0,02 | 0,12 | - | 1,39 | 0,02 | 36,75 |

| Номер пробы | Тип материала | Содержание элементов, массовая доля | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|----|------|------|-------|
| | | Fe | Si | Ca | Mg | Al | Ti | P | S | Cr | Mn | Zn | O |
| ЖСМ2 | Карадырская аглоруда | 52,40 | 12,74 | 0,14 | 0,18 | 1,25 | - | 0,01 | 0,04 | - | 1,03 | 0,05 | 32,15 |
| ЖСМ3 | Колошниковая пыль | 45,90 | 5,17 | 3,36 | 0,88 | 1,22 | - | 0,03 | 0,36 | - | 0,20 | 0,48 | 25,40 |
| ЖСМ4 | Концентрат Лебединского ГОК | 67,00 | 3,78 | 0,36 | 0,12 | 0,05 | - | 0,01 | 0,08 | - | 0,03 | 0,01 | 28,56 |
| ЖСМ5 | Аглоруда Михайловского ГОК | 52,90 | 12,75 | 0,74 | 0,19 | 0,58 | - | 0,02 | 0,40 | - | 0,03 | 0,01 | 32,40 |
| ЖСМ6 | ГСО Р1Г | 66,00 | 5,17 | 0,12 | 0,23 | 0,15 | - | - | 0,03 | - | - | - | 28,31 |
| ЖСМ7 | ГСО Р22б | 67,30 | 2,35 | 0,10 | 0,14 | 0,13 | - | 0,02 | 0,03 | - | - | - | 29,93 |
| ЖСМ8 | ГСО Р3б | 58,72 | 2,62 | 3,19 | 1,49 | 1,32 | 1,49 | 0,00 | 0,01 | - | 0,18 | - | 30,98 |
| ЖСМ9 | ГСО Р5е | 55,80 | 4,00 | 6,64 | 1,17 | 1,36 | 0,17 | 0,03 | 0,04 | - | 0,67 | - | 30,13 |
| ЖСМ10 | Аглоруда Стойленского ГОК | 54,90 | 6,17 | 0,94 | 0,31 | 1,56 | - | 0,11 | 0,26 | - | 0,05 | 0,05 | 35,66 |
| ЖСМ11 | Концентрат Соколовско-Сарбайского ГОК | 65,30 | 3,43 | 0,64 | 0,57 | 0,69 | - | 0,02 | 0,19 | - | 0,15 | 0,01 | 29,00 |
| ЖСМ12 | Концентрат Михеевского ГОК | 65,10 | 5,90 | 0,19 | 0,14 | 0,11 | - | 0,01 | 0,01 | - | 0,02 | 0,01 | 28,53 |

После этого с помощью программного комплекса AssayKit [3.7] были определены интенсивности характеристических линий элементов, а также линий когерентного и некогерентного рассеяния линий рентгеновской трубки. Основываясь на методе стандарта фона [3.8, 3.9] были построены графики зависимости отношения интенсивности аналитической линии к линии некогерентного рассеяния характеристической линии анода рентгеновской трубки в зависимости от концентрации элемента в образце.

Далее все полученные спектры были обработаны по предлагаемому методу деконволюции (см. Отчет этап 1). После обработки из спектров также были рассчитаны интенсивности характеристических линий и линий рассеяния рентгеновской трубки и получены отношения интенсивностей аналитических линий к линии некогерентного рассеяния рентгеновской трубки. На рисунках 3.4-3.6 представлены графики зависимости отношения характеристических линий соответствующего элемента к некогерентному пику рассеяния линии молибдена для исходных спектров и для спектров, обработанных, по предлагаемой нами методике. Отношения интенсивностей характеристических линий к линии некогерентного рассеяния линии молибдена представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Результаты расчета отношения интенсивностей характеристических линий к линии некогерентного рассеяния молибдена

| Образец | Содержание элемента, массовая доля | | | Результат исходных спектров | | | Результат обработанных спектров | | |
|---------|------------------------------------|------|-------|-----------------------------|------|--------|---------------------------------|------|--------|
| | Ca | Mn | Fe | Ca | Mn | Fe | Ca | Mn | Fe |
| 3942 | 5,40 | 0,25 | 57,60 | 3,53 | 1,74 | 187,77 | 3,88 | 2,63 | 207,81 |
| 3943 | 5,59 | 0,25 | 57,40 | 3,66 | 1,76 | 187,97 | 4,03 | 2,68 | 221,88 |
| 3944 | 6,12 | 0,25 | 57,00 | 3,93 | 1,64 | 182,97 | 4,33 | 2,80 | 207,67 |
| 3945 | 6,41 | 0,26 | 56,40 | 4,21 | 1,81 | 184,10 | 4,63 | 3,14 | 205,97 |
| 3946 | 6,85 | 0,26 | 56,00 | 3,90 | 1,61 | 166,61 | 4,51 | 2,82 | 197,41 |
| 3947 | 7,36 | 0,02 | 55,60 | 4,68 | 1,70 | 179,73 | 5,15 | 1,76 | 198,21 |
| 3948 | 7,68 | 0,01 | 55,20 | 4,72 | 1,71 | 178,02 | 5,20 | 1,95 | 193,05 |

| Образец | Содержание элемента, массовая доля | | | Результат исходных спектров | | | Результат обработанных спектров | | |
|---------|------------------------------------|------|-------|-----------------------------|------|--------|---------------------------------|------|--------|
| | Ca | Mn | Fe | Ca | Mn | Fe | Ca | Mn | Fe |
| 3949 | 8,04 | 0,02 | 54,80 | 4,89 | 1,70 | 175,91 | 5,38 | 1,13 | 204,87 |
| ЖРС1 | 4,37 | 0,69 | 58,20 | 2,01 | 3,75 | 179,05 | 3,11 | 4,04 | 213,64 |
| ЖРС2 | 4,36 | 0,71 | 58,40 | 1,98 | 3,72 | 179,29 | 3,06 | 4,74 | 238,22 |
| ЖРС3 | 4,44 | 0,73 | 60,60 | 2,02 | 3,70 | 181,26 | 3,12 | 5,07 | 266,68 |
| ЖРС4 | 3,94 | 0,72 | 59,10 | 1,80 | 3,74 | 184,16 | 2,78 | 4,52 | 234,10 |
| ЖРС5 | 3,54 | 0,68 | 59,50 | 1,69 | 3,87 | 184,49 | 2,61 | 4,68 | 244,80 |
| ЖРС6 | 2,97 | 0,70 | 59,60 | 1,54 | 3,96 | 188,06 | 2,38 | 4,11 | 231,76 |
| ЖРС7 | 3,08 | 0,66 | 58,50 | 1,41 | 4,03 | 193,23 | 2,18 | 4,85 | 233,40 |
| ЖРС8 | 2,74 | 0,69 | 59,50 | 1,50 | 3,94 | 190,16 | 2,32 | 4,10 | 241,67 |
| ЖРС9 | 2,99 | 0,71 | 59,10 | 1,38 | 4,00 | 191,92 | 2,14 | 4,67 | 250,78 |
| ЖСМ1 | 1,54 | 1,39 | 48,50 | 1,83 | 5,05 | 180,29 | 1,35 | 6,78 | 147,61 |
| ЖСМ2 | 0,14 | 1,03 | 52,40 | 0,45 | 6,63 | 209,59 | 0,50 | 5,42 | 192,86 |
| ЖСМ3 | 3,36 | 0,20 | 45,90 | 1,890 | 2,13 | 85,81 | 2,08 | 2,97 | 149,69 |
| ЖСМ4 | 0,36 | 0,03 | 67,00 | 0,32 | 2,57 | 262,05 | 0,35 | 1,97 | 298,43 |
| ЖСМ5 | 0,74 | 0,03 | 52,90 | 0,43 | 2,13 | 194,15 | 0,47 | 1,71 | 173,44 |
| ЖСМ6 | 0,12 | - | 66,00 | 0,29 | - | 237,69 | 0,31 | - | 293,16 |
| ЖСМ7 | 0,10 | - | 67,30 | 0,26 | - | 249,55 | 0,29 | - | 325,10 |
| ЖСМ8 | 3,19 | 0,18 | 58,72 | 2,26 | 2,50 | 208,46 | 2,49 | 2,70 | 243,01 |
| ЖСМ9 | 6,64 | 0,67 | 55,80 | 3,47 | 2,93 | 179,60 | 4,28 | 4,43 | 215,70 |
| ЖСМ10 | 0,94 | 0,05 | 54,90 | 0,72 | 2,22 | 219,95 | 0,79 | 2,10 | 208,64 |
| ЖСМ11 | 0,64 | 0,15 | 65,30 | 0,60 | 2,92 | 242,21 | 0,66 | 2,47 | 305,72 |
| ЖСМ12 | 0,19 | 0,02 | 65,10 | 0,37 | 2,48 | 249,64 | 0,41 | 1,39 | 301,23 |

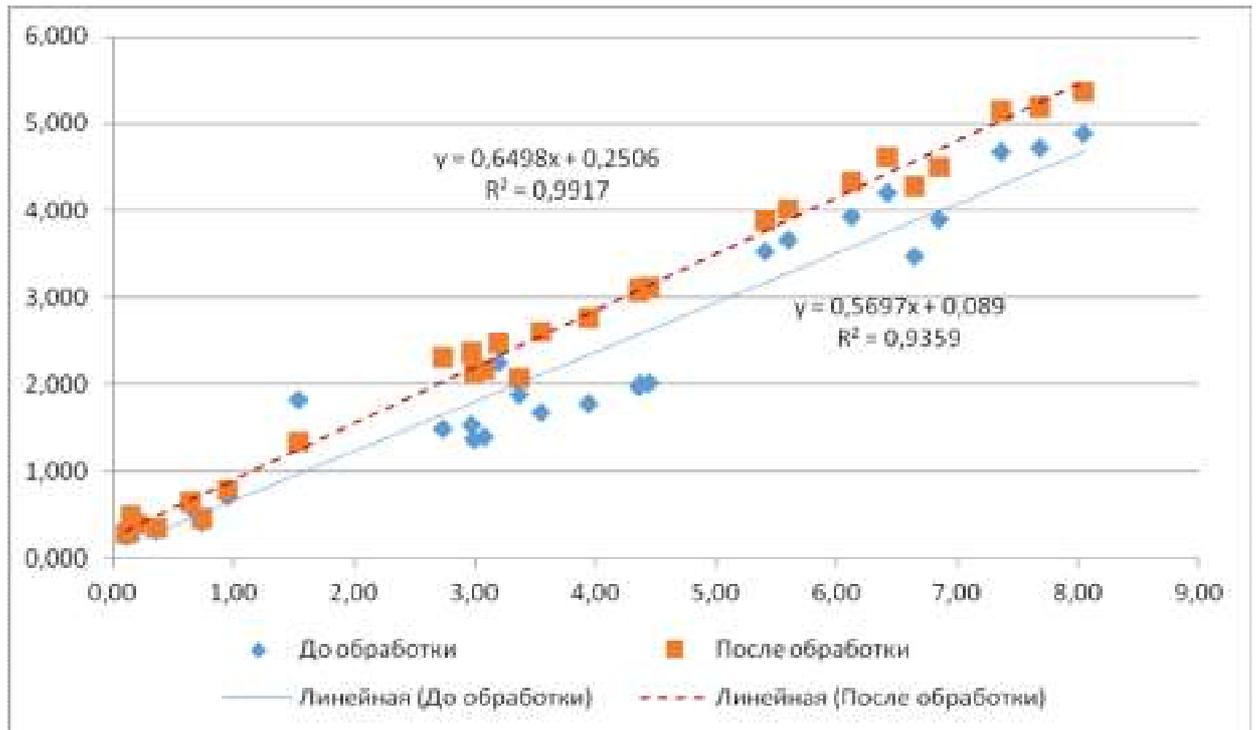


Рис. 3.4. Результаты сопоставления отношений характеристической линии кальция к пику некогерентного рассеяния молибдена

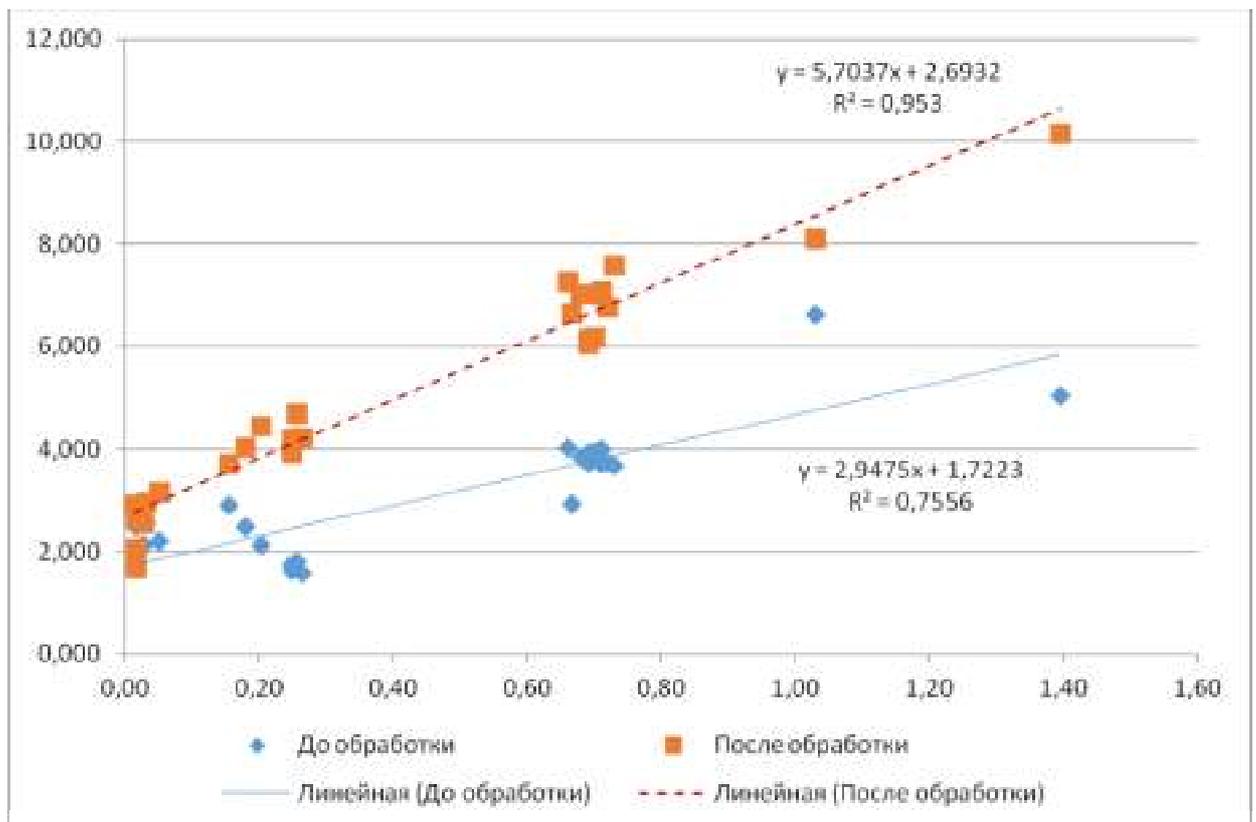


Рис. 3.5. Результаты сопоставления отношений характеристической линии марганца к пику некогерентного рассеяния молибдена

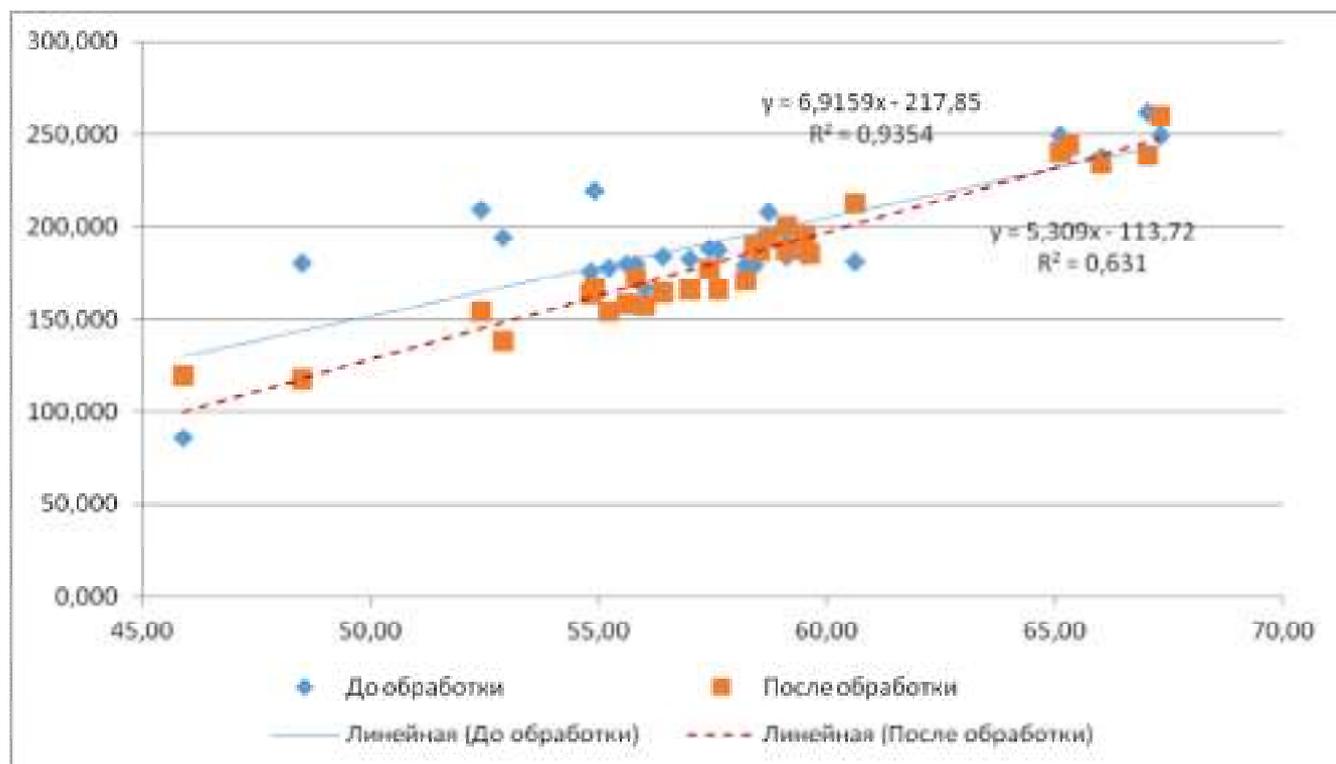


Рис. 3.6. Результаты сопоставления отношений характеристической линии железа к пику некогерентного рассеяния молибдена

Как можно видеть из таблицы 3.3 и рисунков 3.4-3.6 при применении предлагаемого метода деконволюции зависимость отношения становится более линейной, что особенно хорошо видно на железе и марганце, поскольку эти элементы имеют близкие по значению энергии, что приводит к их частичному наложению, как это видно из спектров. Деконволюция позволяет не только сделать линии элемента более четкими, но и разделяет перекрывающиеся характеристические линии элементов, что позволяет определять их содержание более точно.

В ходе дальнейшей работы, исходя из имеющихся спектров, были определены концентрации элементов, чьи характеристические линии отвечали критерию аналитичности. Результаты определения концентраций элементов представлены в таблице 3.4.

Результаты расчета химического состава стандартных образцов

| Образец | Содержание элемента, массовая доля | | | | | | | | |
|---------|------------------------------------|------|-------|-----------------------------|------|-------|---------------------------------|------|-------|
| | Паспортный состав образца | | | Результат исходных спектров | | | Результат обработанных спектров | | |
| | Ca | Mn | Fe | Ca | Mn | Fe | Ca | Mn | Fe |
| 3942 | 5,40 | 0,25 | 57,60 | 6,04 | 0,01 | 56,79 | 5,47 | 0,21 | 57,69 |
| 3943 | 5,59 | 0,25 | 57,40 | 6,27 | 0,01 | 56,83 | 5,70 | 0,31 | 57,53 |
| 3944 | 6,12 | 0,25 | 57,00 | 6,75 | 0,03 | 55,88 | 6,19 | 0,26 | 57,12 |
| 3945 | 6,41 | 0,26 | 56,40 | 7,23 | 0,03 | 56,10 | 6,55 | 0,37 | 56,39 |
| 3946 | 6,85 | 0,26 | 56,00 | 6,70 | 0,04 | 52,80 | 6,80 | 0,31 | 56,55 |
| 3947 | 7,36 | 0,02 | 55,60 | 8,06 | 0,01 | 55,27 | 7,48 | 0,16 | 55,39 |
| 3948 | 7,68 | 0,01 | 55,20 | 8,14 | 0,01 | 54,95 | 7,75 | 0,08 | 55,35 |
| 3949 | 8,04 | 0,02 | 54,80 | 8,42 | 0,01 | 54,55 | 8,08 | 0,11 | 54,49 |
| ЖРС1 | 4,37 | 0,69 | 58,20 | 3,38 | 0,69 | 55,15 | 4,48 | 0,57 | 58,86 |
| ЖРС2 | 4,36 | 0,71 | 58,40 | 3,32 | 0,68 | 55,19 | 4,44 | 0,56 | 59,20 |
| ЖРС3 | 4,44 | 0,73 | 60,60 | 3,39 | 0,67 | 55,56 | 4,53 | 0,62 | 60,89 |
| ЖРС4 | 3,94 | 0,72 | 59,10 | 3,00 | 0,68 | 56,11 | 4,00 | 0,61 | 59,27 |
| ЖРС5 | 3,54 | 0,68 | 59,50 | 2,80 | 0,73 | 56,17 | 3,60 | 0,57 | 60,28 |
| ЖРС6 | 2,97 | 0,70 | 59,60 | 2,55 | 0,76 | 56,84 | 3,12 | 0,50 | 59,34 |
| ЖРС7 | 3,08 | 0,66 | 58,50 | 2,32 | 0,78 | 57,82 | 3,08 | 0,52 | 58,95 |
| ЖРС8 | 2,74 | 0,69 | 59,50 | 2,47 | 0,75 | 57,24 | 2,91 | 0,56 | 60,04 |
| ЖРС9 | 2,99 | 0,71 | 59,10 | 2,28 | 0,77 | 57,57 | 2,99 | 0,57 | 60,52 |
| ЖСМ1 | 1,54 | 1,39 | 48,50 | 3,05 | 1,13 | 55,38 | 1,59 | 1,14 | 49,69 |
| ЖСМ2 | 0,14 | 1,03 | 52,40 | 0,64 | 1,67 | 60,90 | 0,25 | 0,84 | 53,40 |
| ЖСМ3 | 3,36 | 0,20 | 45,90 | 3,16 | 0,14 | 37,58 | 3,26 | 0,17 | 47,12 |
| ЖСМ4 | 0,36 | 0,03 | 67,00 | 0,41 | 0,29 | 70,78 | 0,39 | 0,18 | 67,40 |
| ЖСМ5 | 0,74 | 0,03 | 52,90 | 0,59 | 0,14 | 57,99 | 0,64 | 0,19 | 54,83 |
| ЖСМ6 | 0,12 | - | 66,00 | 0,35 | - | 66,19 | 0,21 | 0,03 | 66,96 |
| ЖСМ7 | 0,10 | - | 67,30 | 0,31 | - | 68,43 | 0,18 | 0,01 | 67,93 |
| ЖСМ8 | 3,19 | 0,18 | 58,72 | 3,81 | 0,27 | 60,69 | 3,30 | 0,11 | 60,78 |
| ЖСМ9 | 6,64 | 0,67 | 55,80 | 5,94 | 0,41 | 55,25 | 6,56 | 0,51 | 57,31 |
| ЖСМ10 | 0,94 | 0,05 | 54,90 | 1,10 | 0,17 | 62,85 | 1,00 | 0,18 | 56,37 |
| ЖСМ11 | 0,64 | 0,15 | 65,30 | 0,89 | 0,41 | 67,04 | 0,71 | 0,13 | 65,55 |
| ЖСМ12 | 0,19 | 0,02 | 65,10 | 0,50 | 0,26 | 68,44 | 0,22 | 0,19 | 65,12 |

Для определения точности при различных временных интервалах спектры стандартных образцов были обработаны аналогично описанному выше. На рисунках 3.7-3.9 показаны результаты определения точности анализа в зависимости от времени набора спектра и наличии и отсутствии предварительной обработки спектра.

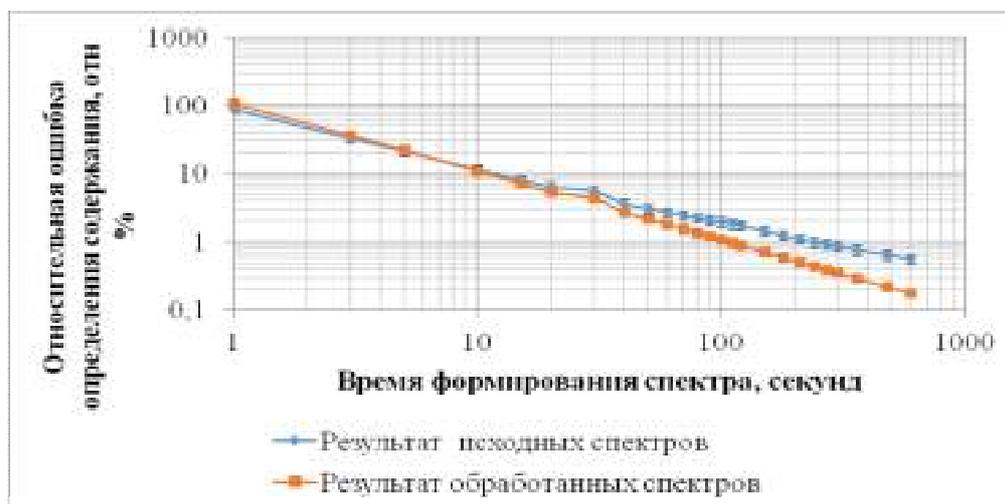


Рис. 3.7. График ошибки определения содержания железа в зависимости от времени формирования спектра. Планки погрешностей показывают доверительный интервал при вероятности 95%

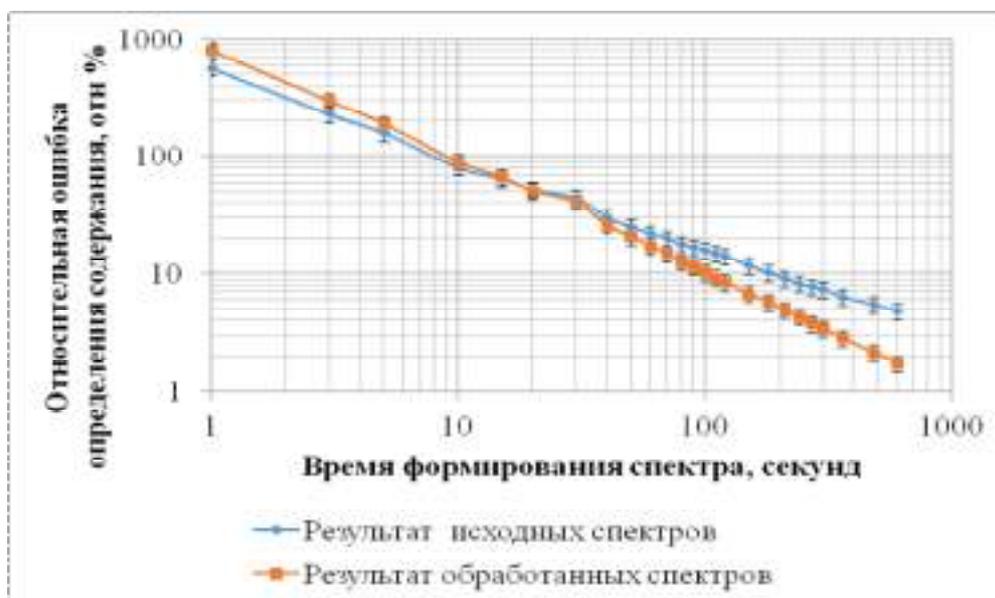


Рис.3.8. График ошибки определения содержания оксида кальция в зависимости от времени формирования спектра. Планки погрешностей показывают доверительный интервал при вероятности 95%

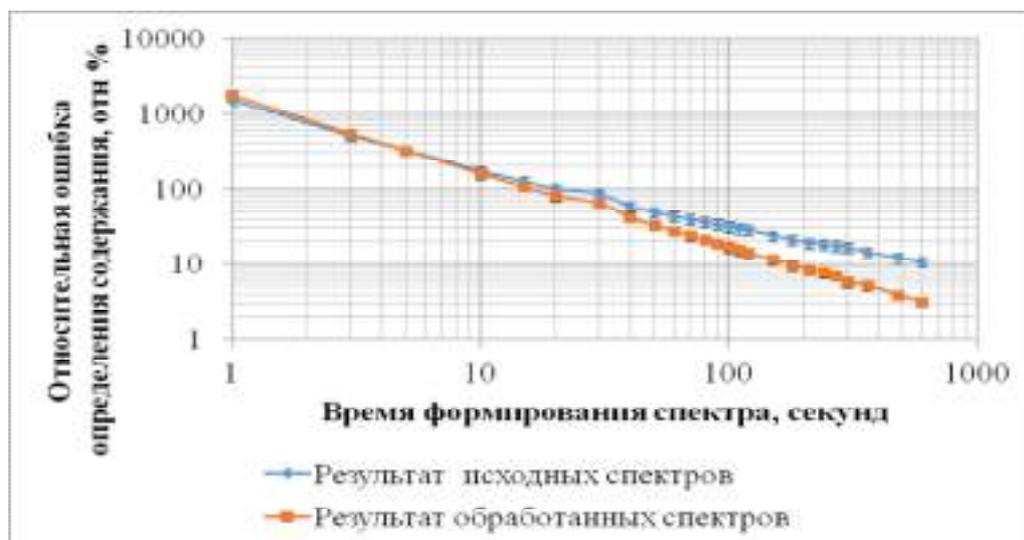


Рис. 3.9. График ошибки определения содержания оксида марганца в зависимости от времени формирования спектра. Планки погрешностей показывают доверительный интервал при вероятности 95%

Как видно из рисунков 3.7-3.9, разработанный метод деконволюции не дает улучшения на очень коротких временных интервалах (менее 20 секунд), но показывает хорошие результаты при более длительных интервалах формирования спектра. Это связано с тем, что при коротких временных интервалах в детектор поступает недостаточно фотонов, чтобы сформировать форму линий в спектре. Это мешает правильно определить соответствующую функцию и границы характеристической линии и даёт некорректные результаты.

Определение расстояния между спектрометром и материалом предлагается вести по интенсивности характеристической линии аргона (массовая доля в воздухе 1,2%). В таблице 3.5 представлена средняя интенсивность характеристической линии аргона в зависимости от расстояния между материалом и спектрометром. Границы в 30 мм и 70 мм вызваны конструкцией измерительного узла спектрометра, так как за их пределами область отбора излучения детектором расходится с фокусным пятном рентгеновской трубки.

Зависимость интенсивности характеристической линии аргона от расстояния между спектрометром и материалов

| Расстояние от спектрометра до материала, мм | Средняя интенсивность линии Ar K α |
|---|---|
| 30 | 784,60 |
| 35 | 1432,83 |
| 40 | 1967,11 |
| 45 | 2370,67 |
| 50 | 2811,67 |
| 55 | 3042,15 |
| 60 | 3244,67 |
| 65 | 3478,83 |
| 70 | 3607,67 |

На основании данных таблицы 3.5 была построена модель учета и компенсации колебаний расстояния между спектрометром и материалом. Для построения модели были использованы справочные данные о массовом коэффициенте поглощения воздухом различных энергий [3.10]. При этом интенсивность характеристической линии нормировалась на базовое расстояние (55мм) поскольку именно для этого расстояния делались все остальные расчеты.

Изменение расстояния между спектрометром и детектором не только влияет на изменение поглощения излучения воздухом, но и на размер поверхности с которой собирает информацию детектор и которая облучается рентгеновской трубкой.

Предполагая рентгеновскую трубку и детектор точечными источниками света внутри спектрометра и зная геометрические параметры измерительного узла и углов отбора и падения излучения нами была получена модель, позволяющая рассчитывать площадь поверхности в зависимости от расстояния.

$$S = 2 \int_{\pi}^0 \left(\frac{z \cdot \sin(\varphi)}{-\sin(\varphi) \cos(\psi) + \frac{\cos(\varphi)}{c}} - \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{(\cos(\varphi) \cdot \cos(\psi) + \frac{\sin(\varphi)}{c}) \cdot z}{-\sin(\varphi) \cdot \cos(\psi) + \frac{\cos(\varphi)}{c}} \right) \right) d\varphi \quad (3.5)$$

где S – площадь пересечения областей засветки рентгеновской трубки и сбора информации детектором, мм^2 ; φ и ψ – углы падения первичного и отбора вторичного излучений соответственно; z – расстояние между спектрометром и материалом, мм .

Подставив фактические углы отбора и проинтегрировав, получили выражение

$$S = 0,519z^2 \quad (3.6)$$

Также отсюда было найдено расстояние, на котором наблюдается наибольшая поверхность, что соответствует 39 мм и совпадает с экспериментальными данными.

На рисунке 3.10 представлены результаты измерения характеристических линий железа, кальция и марганца при различных расстояниях.

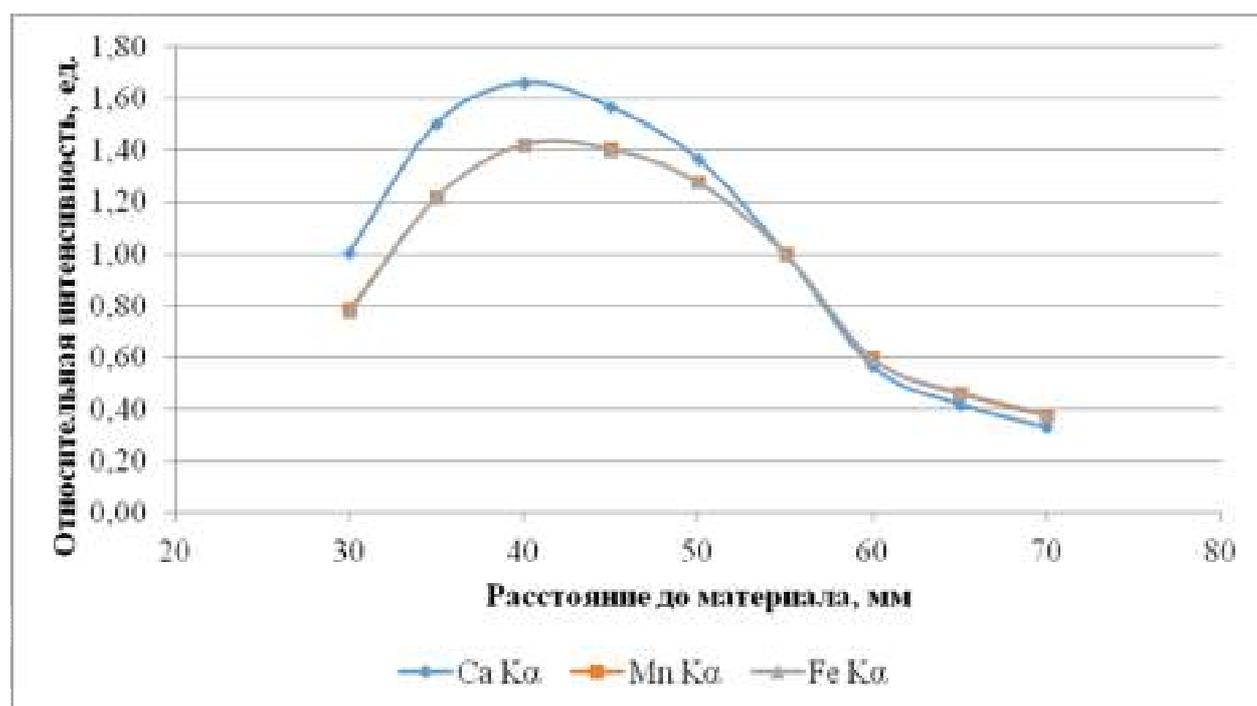


Рис. 3.10. Зависимость интенсивности характеристических линий от расстояния.

На рисунке 3.11 представлены те же интенсивности, но с поправкой на изменяющееся расстояние.

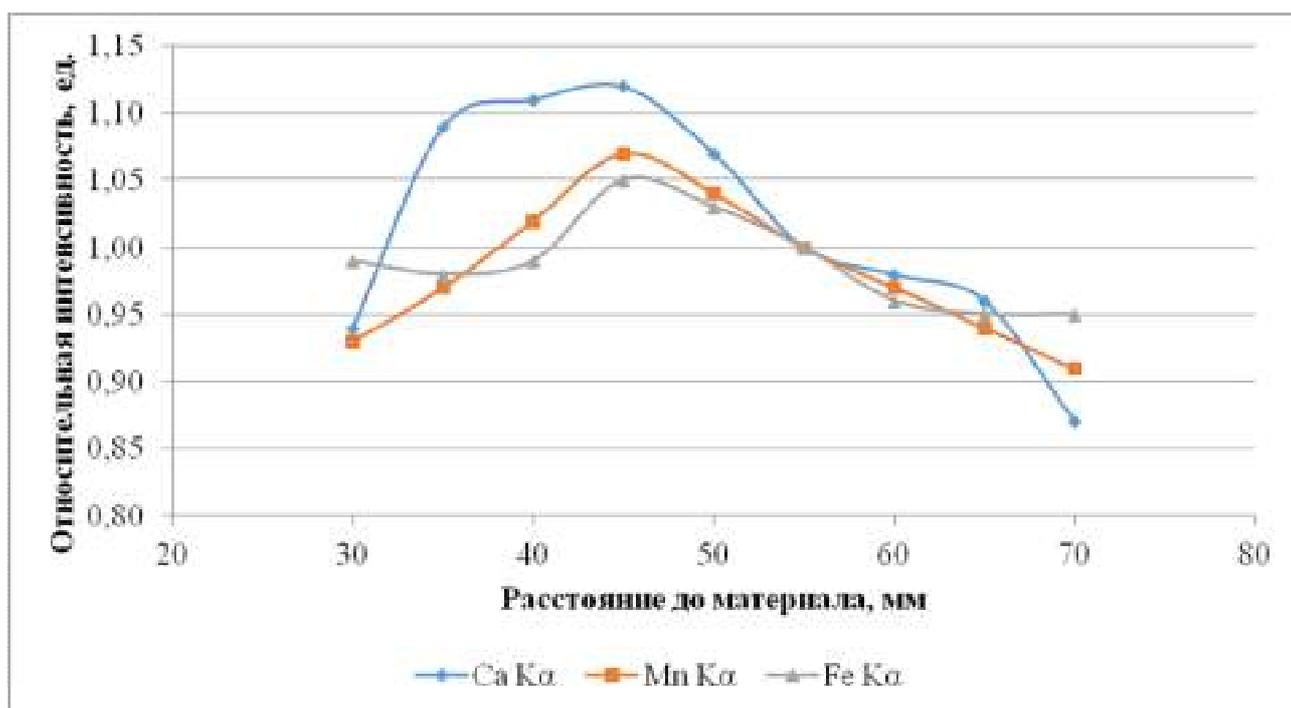


Рис. 3.11. Результат компенсации колебаний расстояния по разработанной модели

Поскольку результаты лабораторных исследований оказались успешны, то были проведены промышленные испытания предлагаемого нами метода повышения точности анализа и деконволюции спектров. Испытания проводились на агломерационных фабриках №3 и №4 ПАО «Магнитогорский Metallургический Комбинат», где действуют автоматизированные системы аналитического контроля железорудной смеси (ЖРС), поступающей на агломерацию.

Для контроля правильности химического анализа ЖРС производился отбор проб. Для этого использовались механизированные пробоотборники, входящие в комплекс системы аналитического контроля.

Согласно нашим расчетам по ГОСТ 15054-80 [3.11] при имеющихся характеристиках технологического потока и вариации качества ЖРС требуется отбирать

$$n = \left(\frac{K \cdot \sigma}{\beta_{\text{отб}}} \right)^2 = \left(\frac{2 \cdot 1,7}{0,6} \right)^2 = 32 \text{ пробы,} \quad (3.7)$$

где K – коэффициент равный двум при вероятности 95%, β – погрешность пробоотбора, σ – среднеквадратичное отклонение содержания железа в руде.

Минимальная масса точечной пробы должна составлять:

$$m_T = \frac{Q \cdot b}{3,6 \cdot v} = \frac{600 \cdot 0,1}{3,6 \cdot 25} = 0,667 \text{ кг}, \quad (3.8)$$

где Q – производительность потока руды, т/ч; b – ширина щели пробоотсекающего устройства, м; v – скорость движения пробоотсекающего устройства, м/с.

Период отбора проб должен составлять:

$$\tau = \frac{60 \cdot M}{Q \cdot n} = \frac{60 \cdot 600}{600 \cdot 32} = 1,9 \text{ минут}, \quad (3.9)$$

где M – масса партии, т, n – число точечных проб, Q – производительность потока руды, т/ч.

Минимальная масса генеральной пробы, согласно ГОСТ 15054-80 [3.11] определяется по формуле Ричардса-Чечотта:

$$m = Kd^2 = 0,05 \cdot 10^2 = 5 \text{ кг} \quad (3.10)$$

Пробоотборник отбирает пробу 1,5-2,5кг каждые 1,5 минуты. Таким образом, масса отбираемой генеральной пробы составляла от 48 до 80 кг, что означает, что параметры отбора проб согласуются с требованиями ГОСТ.

Пробы, отбираемые пробоотборником, объединялись по 4 в соответствие каждому измерению спектрометра

Также была определена масса железорудной смеси, участвующей в непрерывном анализе. Для этого была определена глубина проникновения первичного излучения, а также глубина выхода излучения для основных элементов. При этом общая масса определялась по формуле:

$$m = Kd^2 = 0,05 \cdot 10^2 = 5 \text{ кг} \quad (3.11)$$

где d – диаметр пятна, с которого детектор собирает информацию (23мм), h – глубина проникновения рентгеновских лучей, V – скорость движения конвейера (1,3 м/с), τ – время экспозиции одного спектра (300 секунд), ρ – насыпная плотность ЖРС (3000 кг/м³).

Для определения глубины проникновения рентгеновских лучей была

рассчитана эффективная глубина поглощения железорудной смеси. Ввиду того что ось детектора расположена нормально к материалу, угол отбора излучения составляет 90° , то есть $\sin(\psi) = 1$. Угол падающего излучения, согласно технической документации, составляет 58° .

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\bar{\mu}} = \left(\frac{\mu(E)}{\sin \phi} + \frac{\mu(E')}{\sin \psi} \right)^{-1} = \frac{\lambda(E) \lambda(E') \sin \phi}{\lambda(E) \sin \phi + \lambda(E')} \quad (3.12)$$

Рассчитанная средняя глубина проникновения составляет $h=0,30$ мм. Тогда масса материала участвующего в анализе за время получения одного спектра получается:

$$m = d \cdot h \cdot V \cdot \tau \cdot \rho = 0,023 \cdot 0,0003 \cdot 1,3 \cdot 300 \cdot 3000 = 8,07 \text{ кг}, \quad (3.13)$$

что превышает минимальную массу генеральной пробы. За время прохождения часовой партии (600 т) с помощью непрерывного анализа будет проанализировано около 96 кг ЖРС.

Однако непрерывный анализ сканирует лишь поверхность материала, а следовательно необходимо убедиться в том, что подаваема по конвейеру ЖРС смесь достаточно однородна по всему объему. Для этого был поставлен следующий эксперимент: отобрали 3,2 кг ЖРС совком с транспортёра. Делили пробу и получали две пробы по 1,6 кг. Высушивали обе пробы в сушильном шкафу при температуре 105°C и измельчали на щековой дробилке до крупности 0-10 мм. Каждую пробу делили на две части и получали четыре пробы по 0,8 кг. Затем измельчали все пробы на валковой дробилке до крупности 0-3 мм. Каждую пробу делили ещё на 4 части и получали 16 проб по 0,2 кг. Доизмельчали все 16 проб на виброистирателе до крупности 0-0,071 мм. Каждую из проб делили и получили 64 пробы для анализа. В каждой пробе в лаборатории ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» определяли содержание железа, оксидов кремния и кальция.

В приложении представлены результаты анализа всех полученных проб. В таблице 3.6 показан результат определения среднеквадратичного отклонения, и дисперсии результатов анализа железорудной смеси.

Как видно из таблицы 3.6 все три основных компонента железорудной смеси

распределены достаточно равномерно, поскольку их среднее квадратичное отклонение не превышает ошибки определения лабораторными методами. Таким образом ЖРС можно считать достаточно однородной для того чтобы определять химический состав всей массы материала на основе рентгенофлуоресцентного анализа.

Таблица 3.6

Результаты определения однородности ЖРС.

| Погрешности стадий анализа | Содержание железа | Содержание SiO ₂ | Содержание CaO |
|---|-------------------|-----------------------------|----------------|
| Среднее значение по итогам анализа всех проб | 57,42 | 5,07 | 5,17 |
| Среднее квадратичное отклонение | 0,38 | 0,09 | 0,15 |
| Дисперсия | 0,14 | 0,01 | 0,02 |
| Погрешность лабораторного метода анализа, согласно НД ОАО «ММК» | 0,40 | 0,13 | 0,16 |

В ходе промышленного эксперимента было получено более 200 спектров. Результаты анализа всех проб, представлены в приложении Б. На рисунках 3.12-3.14, представлены результаты промышленного эксперимента. Как видно из рисунков 3.12-3.14, предлагаемая нами обработка спектров позволят повысить точность анализа. В таблице 3.7 представлены в результаты определения статистических характеристик при сравнении значений концентраций, получаемых без обработки спектров и при обработке спектров, согласно предлагаемой методике.

Таблица 3.7

Результаты расчета ошибок определения анализа

| Статистический параметр | Результат исходных спектров | | | Результат обработанных спектров | | |
|---------------------------------|-----------------------------|--------|-------|---------------------------------|------|------|
| | Fe | CaO | MnO | Fe | CaO | MnO |
| Среднее квадратичное отклонение | 0,52 | 0,31 | 0,17 | 0,21 | 0,15 | 0,06 |
| Дисперсия | 0,27 | 0,10 | 0,028 | 0,04 | 0,02 | 0,01 |
| Относительная ошибка, отн. % | 0,87 | 7,3636 | 16,55 | 0,35 | 3,44 | 5,82 |

Таким образом, можно заключить, что на железорудных смесях, используемых

на ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» разработанная методика даёт прирост точности анализа, что позволит обеспечить более эффективное управление технологическим процессом в рамках существующей на ПАО «ММК» системы АСУ ТП.

Другим материалом, на котором производились испытания были сульфидные медно-цинковые руды, добываемые на ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат» (ПАО «Гайский ГОК»), входящий в холдинг «Уральской горно-металлургической компании» («УГМК»). Здесь были проведены испытания на недробленной руде, поднимаемой из шахты [3.12].

Также были проведены испытания на медном концентрате АО «Учалинский горно-обогатительный комбинат» (АО «Учалинский ГОК»), также входящий в холдинг УГМК.

Изучение возможности использования предлагаемой методики проводилось в лабораторных условиях лаборатории «ТекТерра» на конфигурациях спектрометра с измерительным узлом, соответствующим оптимальному расстоянию между спектрометром и материалом в 55 мм и измерительным узлом соответствующим оптимальному 200 мм.

Было использовано 11 стандартных рудных материалов сульфидной медно-цинковой руды, крупностью 0-1мм. Химический состав стандартных образцов представлен в таблице 3.8.

Таблица 3.8

Паспортный состав стандартных образцов

| Номер пробы | Содержание элементов, масс % | | | | | | | | |
|-------------|------------------------------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|
| | Cu | Zn | S | Fe | Ca | Mg | Si | Al | O |
| 632 | 1,47 | 0,41 | 9,20 | 8,01 | 0,39 | 0,52 | 30,55 | 8,28 | 41,17 |
| 633 | 0,22 | 0,30 | 50,10 | 44,90 | 0,03 | 0,07 | 0,41 | 3,17 | 0,80 |
| 635 | 1,52 | 0,84 | 12,20 | 10,77 | 0,32 | 0,06 | 32,82 | 3,44 | 38,03 |
| 636 | 2,67 | 0,57 | 30,00 | 26,97 | 0,34 | 0,19 | 14,12 | 3,06 | 22,07 |
| 637 | 2,05 | 0,50 | 44,20 | 38,25 | 0,06 | 0,02 | 5,76 | 0,00 | 9,15 |
| 638 | 3,20 | 0,66 | 40,10 | 34,46 | 0,30 | 0,12 | 8,27 | 0,00 | 12,89 |
| 639 | 2,61 | 0,56 | 46,40 | 40,22 | 0,25 | 0,06 | 3,25 | 0,00 | 6,65 |

| Номер пробы | Содержание элементов, масс % | | | | | | | | |
|-------------|------------------------------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|
| | Cu | Zn | S | Fe | Ca | Mg | Si | Al | O |
| 640 | 2,09 | 1,82 | 37,20 | 31,61 | 0,72 | 0,02 | 10,09 | 0,00 | 16,44 |
| 641 | 1,94 | 0,32 | 37,20 | 32,47 | 0,32 | 0,02 | 10,84 | 0,00 | 16,88 |
| 642 | 1,89 | 1,43 | 40,60 | 34,80 | 0,32 | 0,02 | 7,63 | 0,00 | 13,30 |

В таблице 3.9 представлены параметры установки соответствующие расстоянию между спектрометром и материалом 55 мм.

Таблица 3.9

Параметры рабочей установки на оптимальном расстоянии до материала 55 мм

| | |
|---|---------------|
| Спектрометр | CON-X 02 |
| Материал анода рентгеновской трубки | Mo |
| Фильтр первичного излучения | Не применялся |
| Напряжение на аноде | 25 кВ |
| Анодный ток | 50 мкА |
| Время измерения | 300 секунд |
| Среда измерения | Воздух |
| Расстояние между поверхностью образца и спектрометром | 55 мм |

Линии элементов, расположенных рядом в Периодической системе элементов, имеют близкие энергии характеристических линий и, как следствие, эти линии могут перекрываться. В таком случае получаемый спектральный сигнал является суммой интенсивностей двух или более рентгеновских линий, что искажает расчет соответствующих концентраций. На рисунке 3.15 показано перекрывание $K\alpha$ и $K\beta$ линий анализируемых элементов. Рисунок представляет собой простое наложение спектров профилей Cu и Zn, измеренных в условиях, аналогичных условиям анализа.

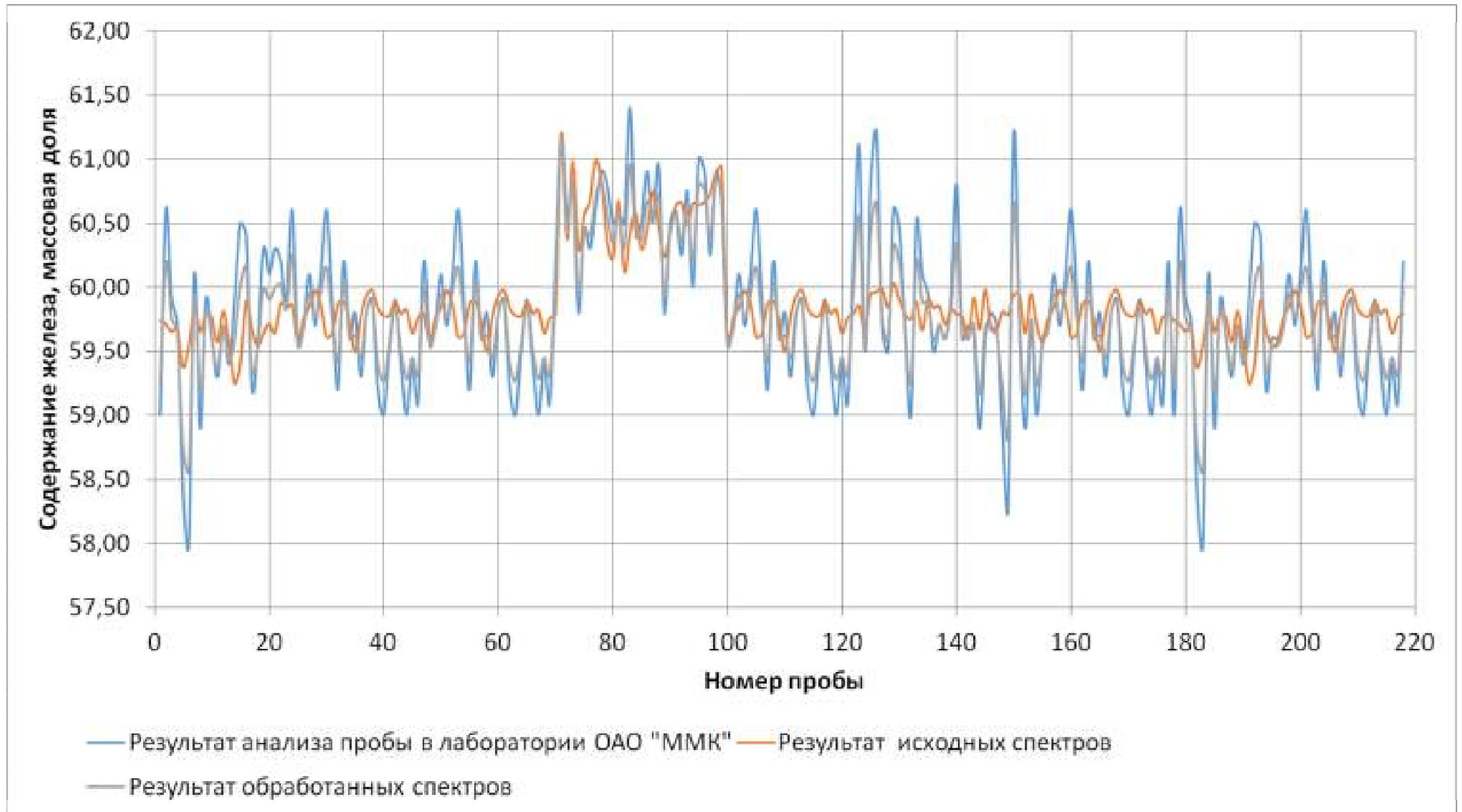


Рис. 3.12. Сравнение результатов определения содержания железа в ЖРС.

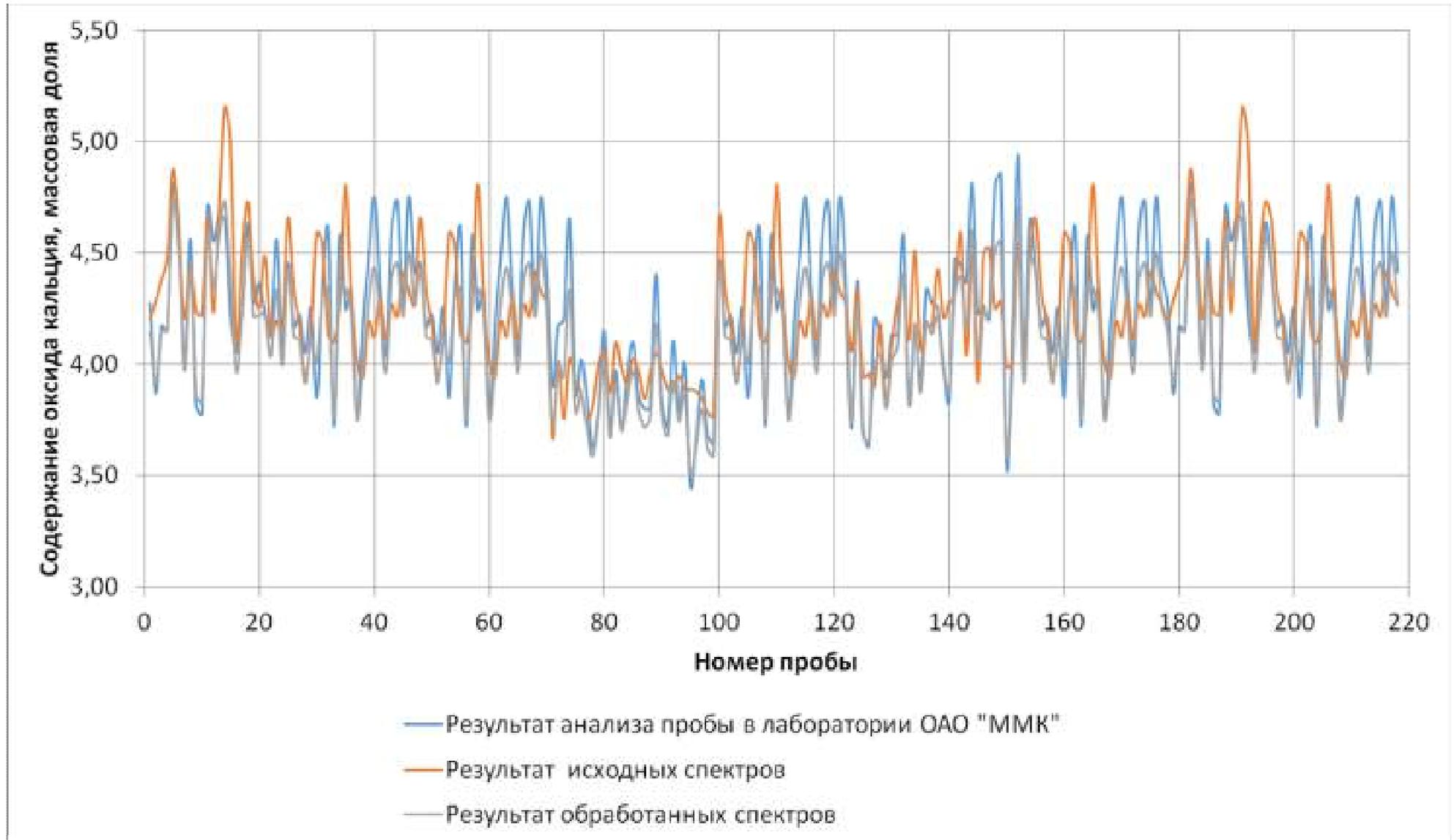


Рис. 3.13. Сравнение результатов определения содержания оксида кальция в ЖРС.

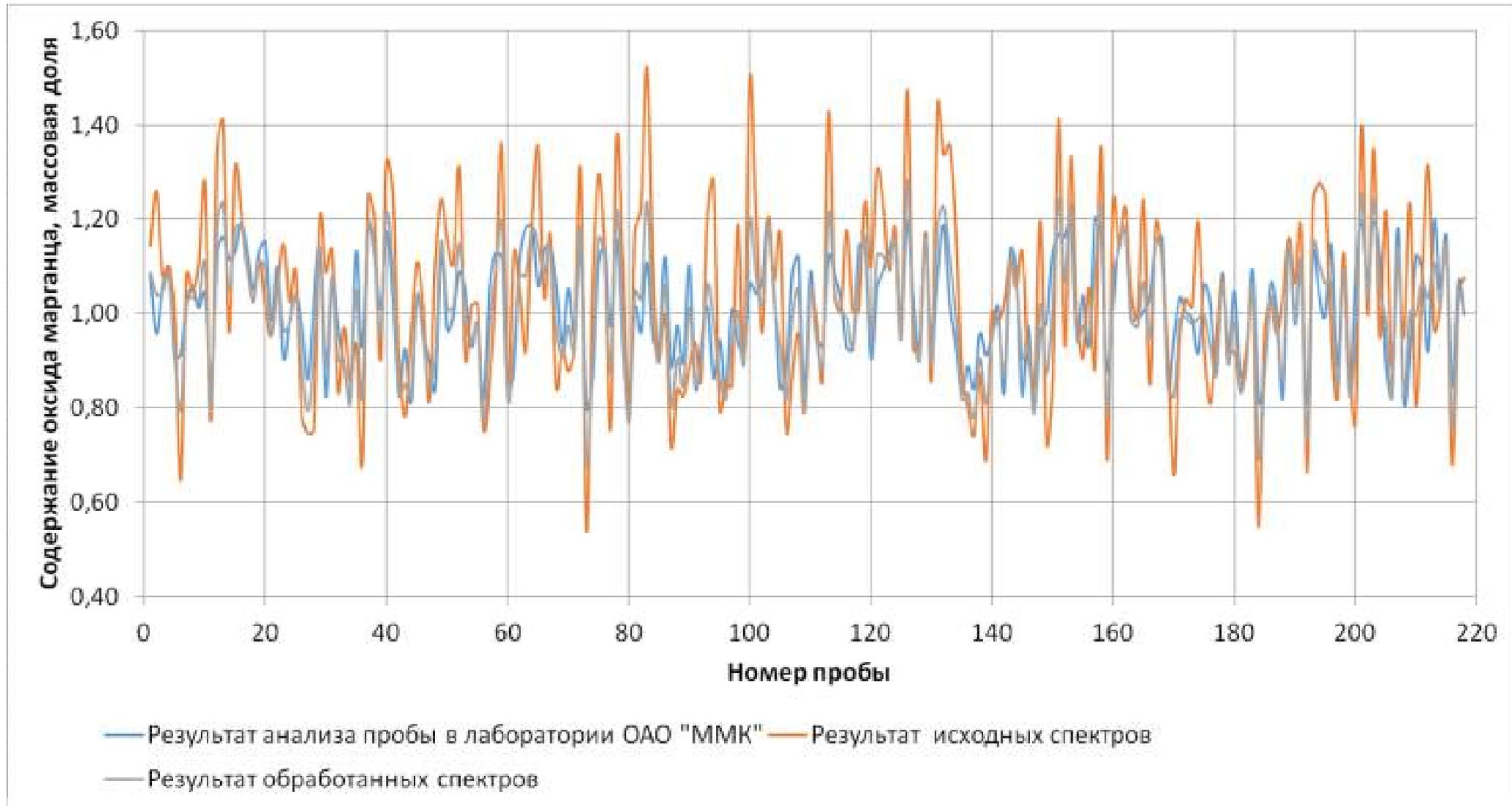


Рис. 3.14. Сравнение результатов определения содержания оксида марганца в ЖРС.

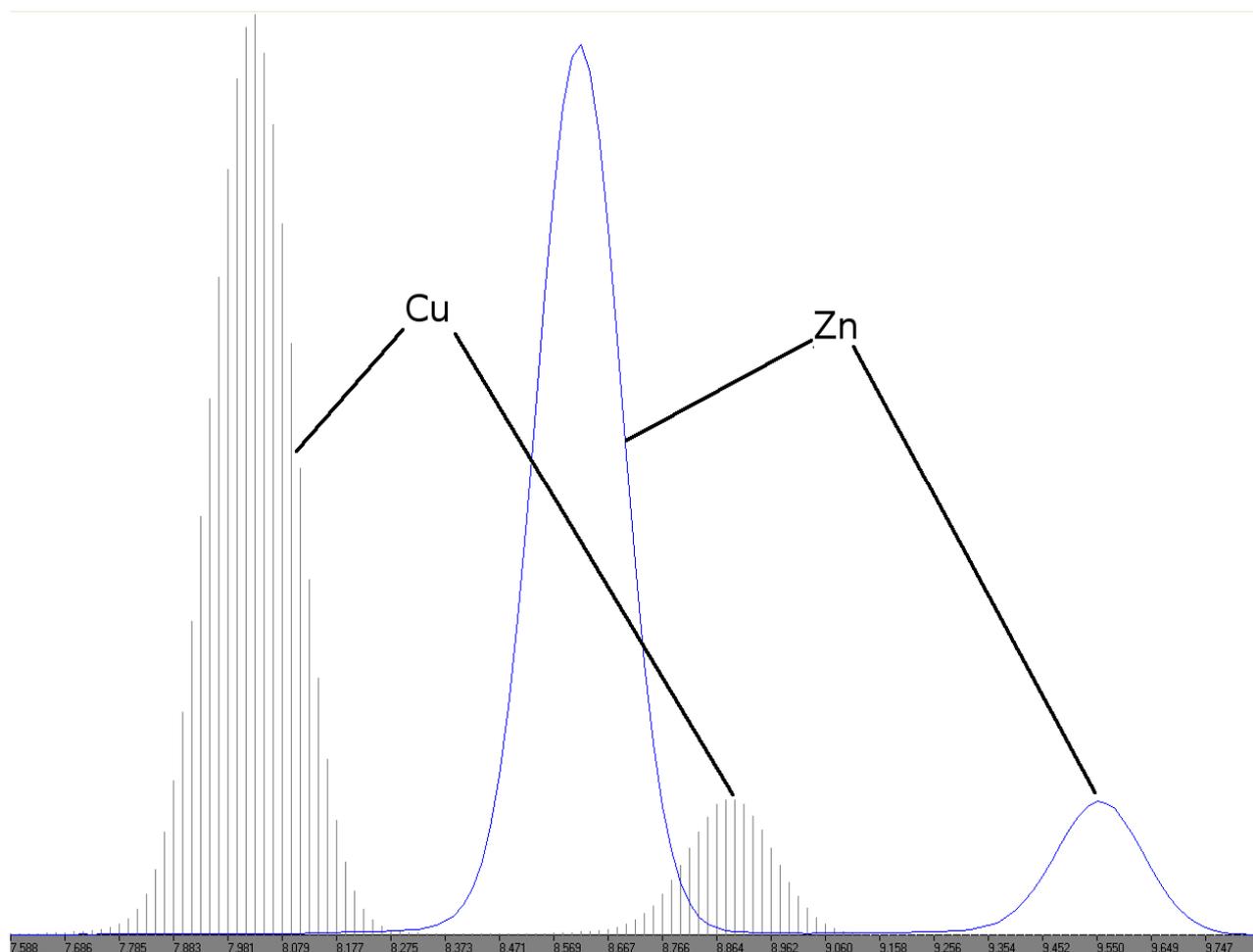


Рис. 3.15. Частичное перекрывание характеристических линий меди и цинка

Полученные спектры были обработаны с помощью предлагаемой методики деконволюции. Затем на основании исходных спектров и модифицированных был произведен расчет элементных составов проб. Расчет состава образцов производился методом фундаментальных параметров с помощью программного комплекса AssayKit [3.7]. Результаты определения представлены в таблице 3.10 и на рисунках 3.16-3.20.

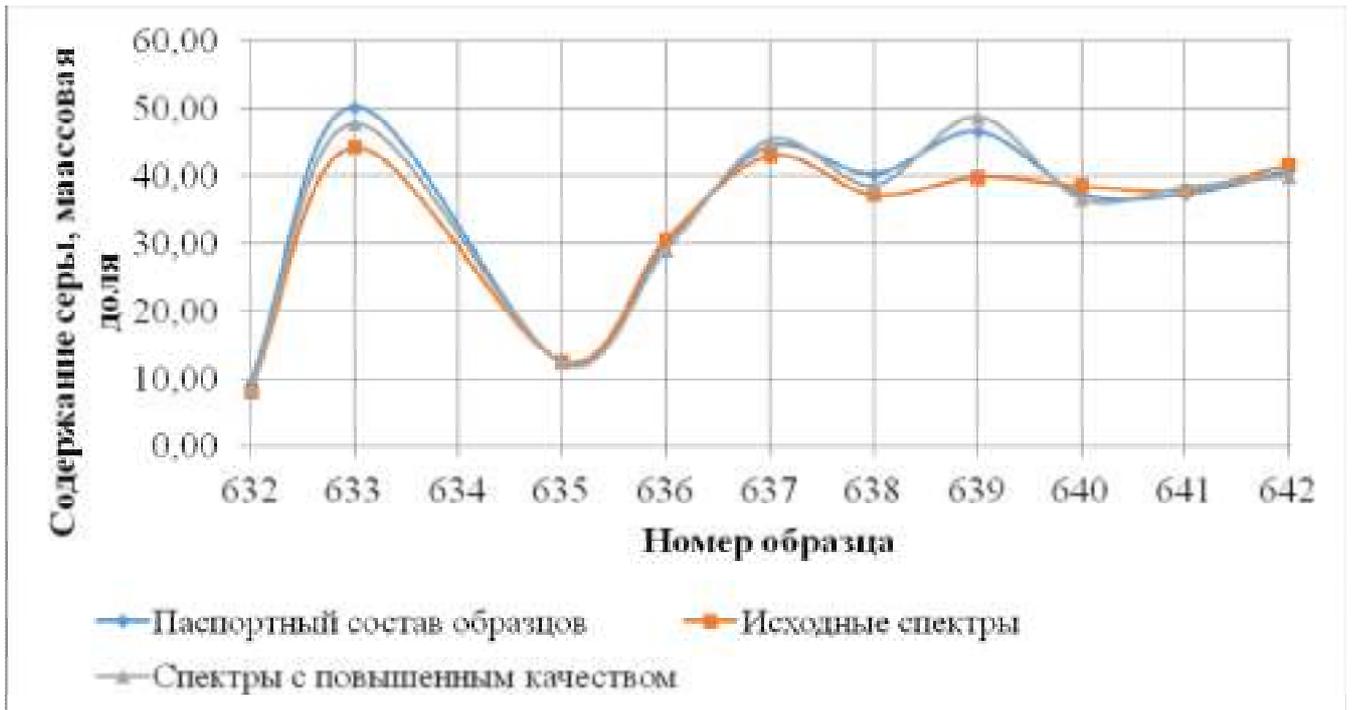


Рис. 3.16. Сопоставление состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию серы для расстояния 55мм

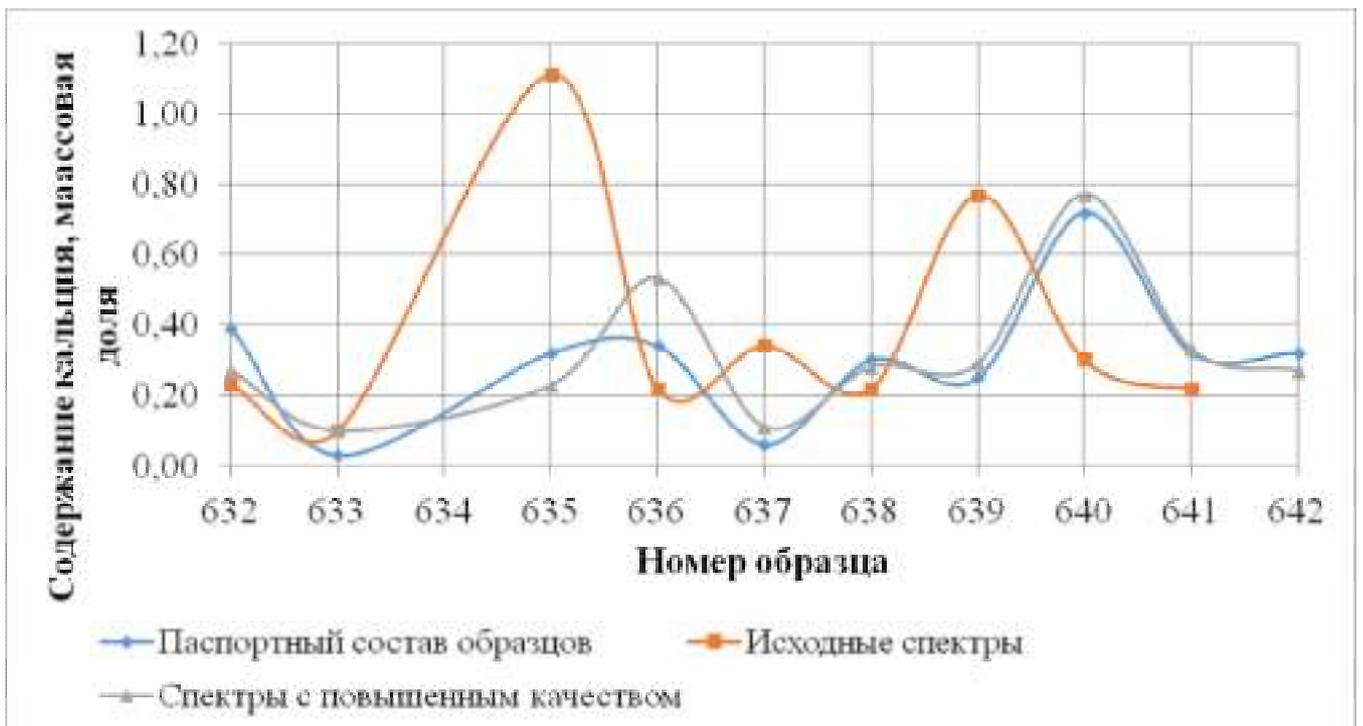


Рис. 3.17. Сопоставление состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию кальция для расстояния 55мм

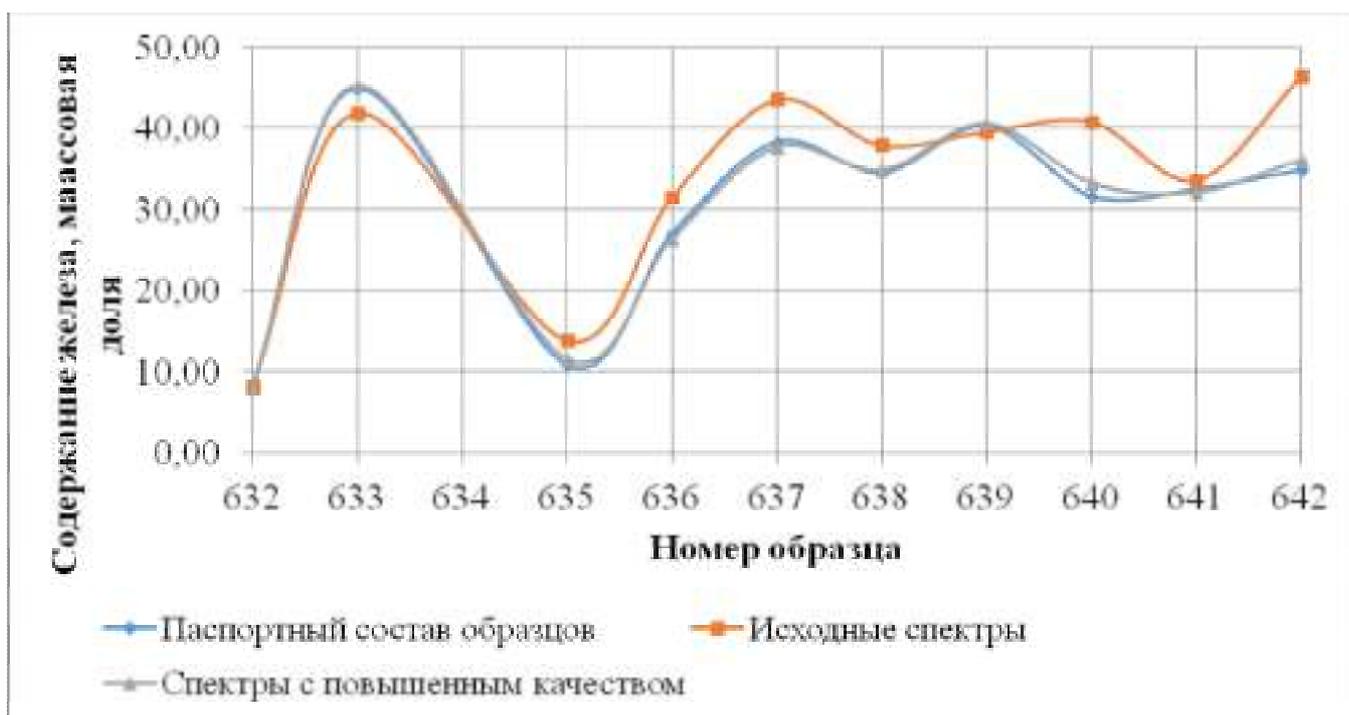


Рис. 3.18. Сопоставление состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию железа для расстояния 55мм

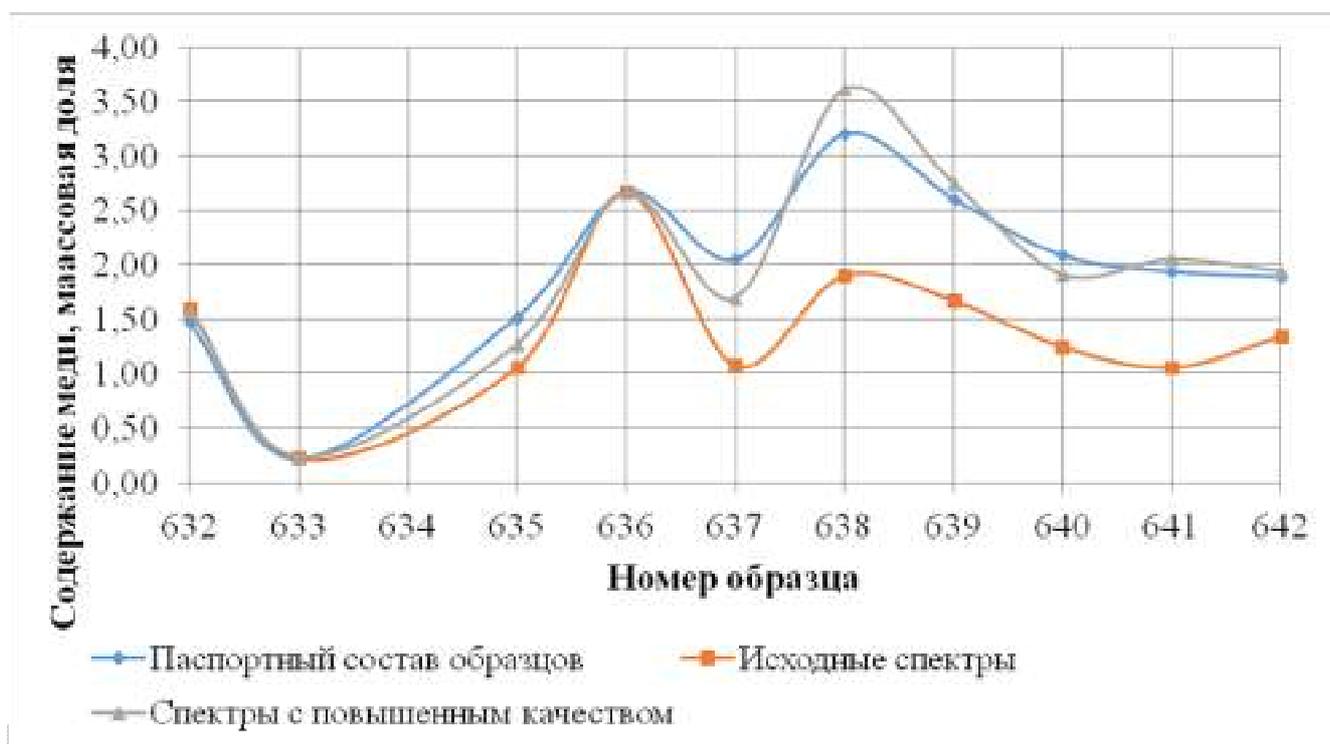


Рис. 3.19. Сопоставление состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию меди для расстояния 55мм

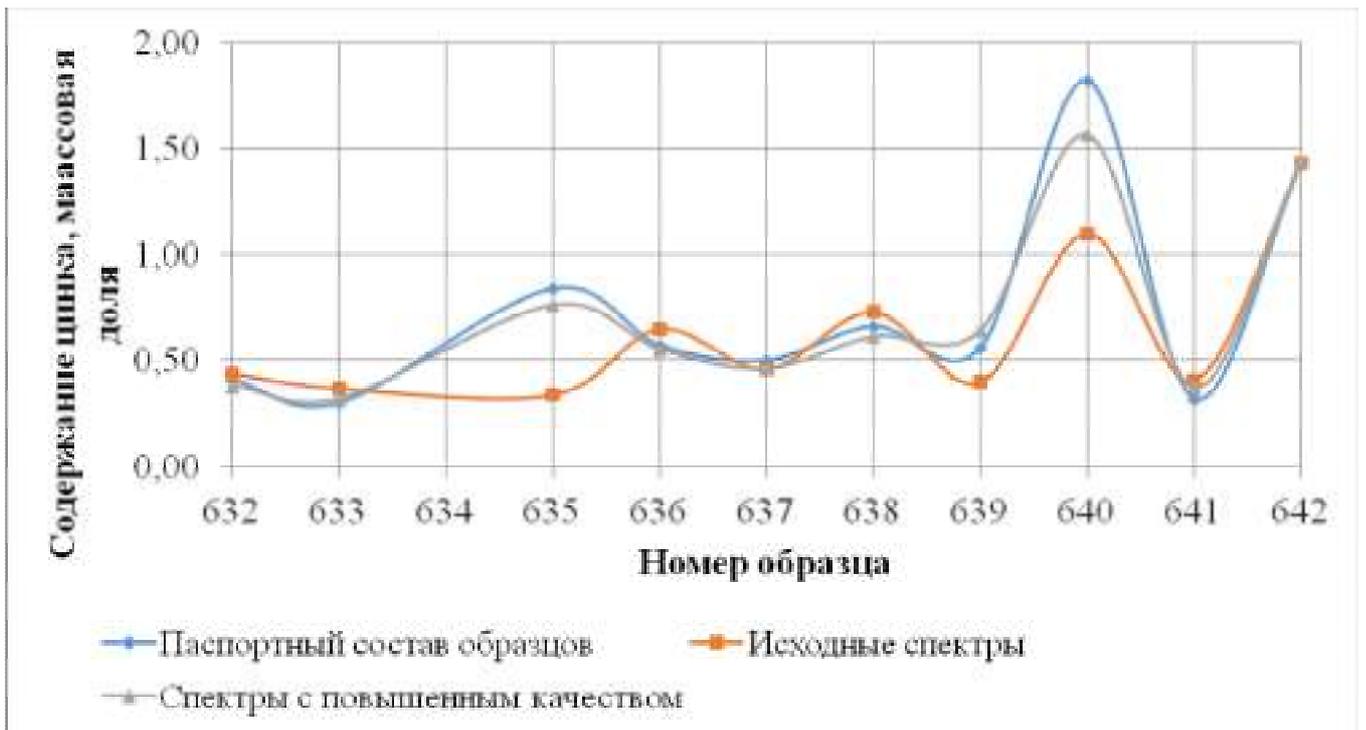


Рис. 3.20. Сопоставление состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию цинка для расстояния 55мм

Результаты определения химического состава образцов на спектрометре CON-X 02.

| Проба | Химический состав стандартных образцов, массовая доля | | | | | Состав по данным спектрометра, массовая доля | | | | | | | | | |
|-------|---|------|-------|------|------|--|------|-------|------|------|--------------------------------|------|-------|------|------|
| | | | | | | Исходные спектры | | | | | Спектры с повышенным качеством | | | | |
| | S | Ca | Fe | Cu | Zn | S | Ca | Fe | Cu | Zn | S | Ca | Fe | Cu | Zn |
| 632 | 9,20 | 0,39 | 8,01 | 1,47 | 0,41 | 7,98 | 0,25 | 8,18 | 1,60 | 0,44 | 8,43 | 0,27 | 7,89 | 1,57 | 0,38 |
| 633 | 50,10 | 0,03 | 44,90 | 0,22 | 0,30 | 44,14 | 0,23 | 41,91 | 0,22 | 0,37 | 47,52 | 0,10 | 45,24 | 0,23 | 0,32 |
| 635 | 12,20 | 0,32 | 10,77 | 1,52 | 0,84 | 12,41 | 0,10 | 13,85 | 1,06 | 0,34 | 12,37 | 0,23 | 11,47 | 1,27 | 0,76 |
| 636 | 30,00 | 0,34 | 26,97 | 2,67 | 0,57 | 30,53 | 1,11 | 31,48 | 2,67 | 0,65 | 28,91 | 0,53 | 26,34 | 2,66 | 0,55 |
| 637 | 44,20 | 0,06 | 38,25 | 2,05 | 0,50 | 42,87 | 0,22 | 43,51 | 1,08 | 0,46 | 45,15 | 0,11 | 37,59 | 1,69 | 0,46 |
| 638 | 40,10 | 0,30 | 34,46 | 3,20 | 0,66 | 37,11 | 0,34 | 37,86 | 1,90 | 0,73 | 38,46 | 0,28 | 34,75 | 3,61 | 0,61 |
| 639 | 46,40 | 0,25 | 40,22 | 2,61 | 0,56 | 39,72 | 0,22 | 39,56 | 1,67 | 0,40 | 48,57 | 0,29 | 40,57 | 2,75 | 0,64 |
| 640 | 37,20 | 0,72 | 31,61 | 2,09 | 1,82 | 38,45 | 0,77 | 40,79 | 1,25 | 1,10 | 36,44 | 0,77 | 33,21 | 1,91 | 1,56 |
| 641 | 37,20 | 0,32 | 32,47 | 1,94 | 0,32 | 37,84 | 0,30 | 33,55 | 1,06 | 0,41 | 38,19 | 0,33 | 32,11 | 2,05 | 0,37 |
| 642 | 40,60 | 0,32 | 34,80 | 1,89 | 1,43 | 41,53 | 0,22 | 46,37 | 1,34 | 1,43 | 39,79 | 0,27 | 35,98 | 1,94 | 1,44 |

В таблице 3.11 представлены параметры установки соответствующие расстоянию между спектрометром и материалом 200 мм

Таблица 3.11

Параметры рабочей установки на оптимальном расстоянии до материала 200 мм

| | |
|--|---------------|
| Спектрометр | CON-X 02 |
| Материал анода рентгеновской трубки | Mo |
| Фильтр первичного излучения | Не применялся |
| Напряжение на аноде | 40 кВ |
| Анодный ток | 620 мкА |
| Время измерения | 600 секунд |
| Среда измерения | Воздух |
| Расстояние между поверхностью образца и детектором | 200 мм |

Полученные спектры были обработаны с помощью предлагаемой методики деконволюции. Затем на основании исходных спектров и модифицированных был произведен расчет составов проб. Расчет элементного состава образцов производился методом фундаментальных параметров с помощью программного комплекса AssayKit [3.7]. Результаты определения представлены в таблице 3.12 и на рисунках 3.21-3.24.

Результаты определения химического состава образцов на спектрометре CON-X 02

| Проба | Паспортный состав образцов, массовая доля | | | | Состав по данным спектрометра, массовая доля | | | | | | | |
|-------|--|-------|------|------|--|-------|------|------|--------------------------------|-------|------|------|
| | | | | | Исходные спектры | | | | Спектры с повышенным качеством | | | |
| | Ca | Fe | Cu | Zn | Ca | Fe | Cu | Zn | Ca | Fe | Cu | Zn |
| 632 | 0,39 | 8,01 | 1,47 | 0,41 | 0,11 | 9,5 | 1,18 | 0,43 | 0,21 | 8,38 | 1,38 | 0,36 |
| 633 | 0,03 | 44,90 | 0,22 | 0,30 | 0,38 | 43,98 | 0,55 | 0,27 | 0,17 | 44,67 | 0,32 | 0,17 |
| 635 | 0,32 | 10,77 | 1,52 | 0,84 | 0,07 | 12,7 | 0,91 | 0,18 | 0,15 | 11,25 | 1,64 | 0,78 |
| 636 | 0,34 | 26,97 | 2,67 | 0,57 | 0,07 | 10,71 | 1,6 | 0,82 | 0,17 | 29,91 | 2,95 | 0,71 |
| 637 | 0,06 | 38,25 | 2,05 | 0,50 | 0,73 | 33,35 | 2,39 | 0,55 | 0,38 | 37,03 | 2,15 | 0,52 |
| 638 | 0,30 | 34,46 | 3,20 | 0,66 | 0,56 | 36,82 | 2,12 | 0,53 | 0,41 | 33,55 | 2,88 | 0,70 |
| 639 | 0,25 | 40,22 | 2,61 | 0,56 | 0,52 | 36,08 | 2,48 | 0,66 | 0,37 | 39,19 | 2,57 | 0,64 |
| 640 | 0,72 | 31,61 | 2,09 | 1,82 | 0,39 | 38,42 | 2,57 | 0,42 | 0,54 | 33,31 | 2,23 | 2,05 |
| 641 | 0,32 | 32,47 | 1,94 | 0,32 | 0,6 | 34,48 | 2,25 | 1,3 | 0,45 | 33,77 | 2,03 | 0,60 |
| 642 | 0,32 | 34,80 | 1,89 | 1,43 | 0,43 | 40,07 | 1,76 | 0,27 | 0,35 | 36,12 | 1,75 | 1,32 |

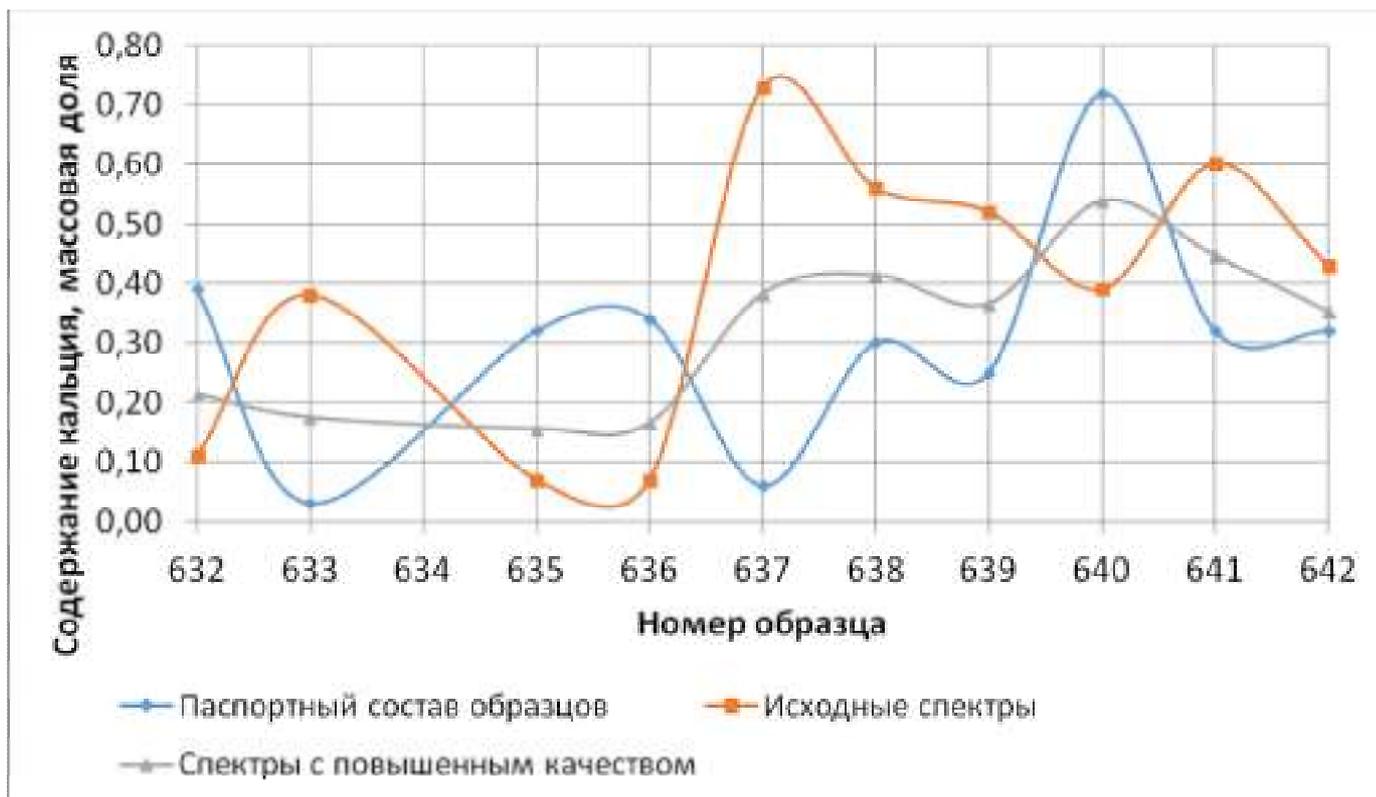


Рис. 3.21. Сопоставление состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию кальция для расстояния 200мм

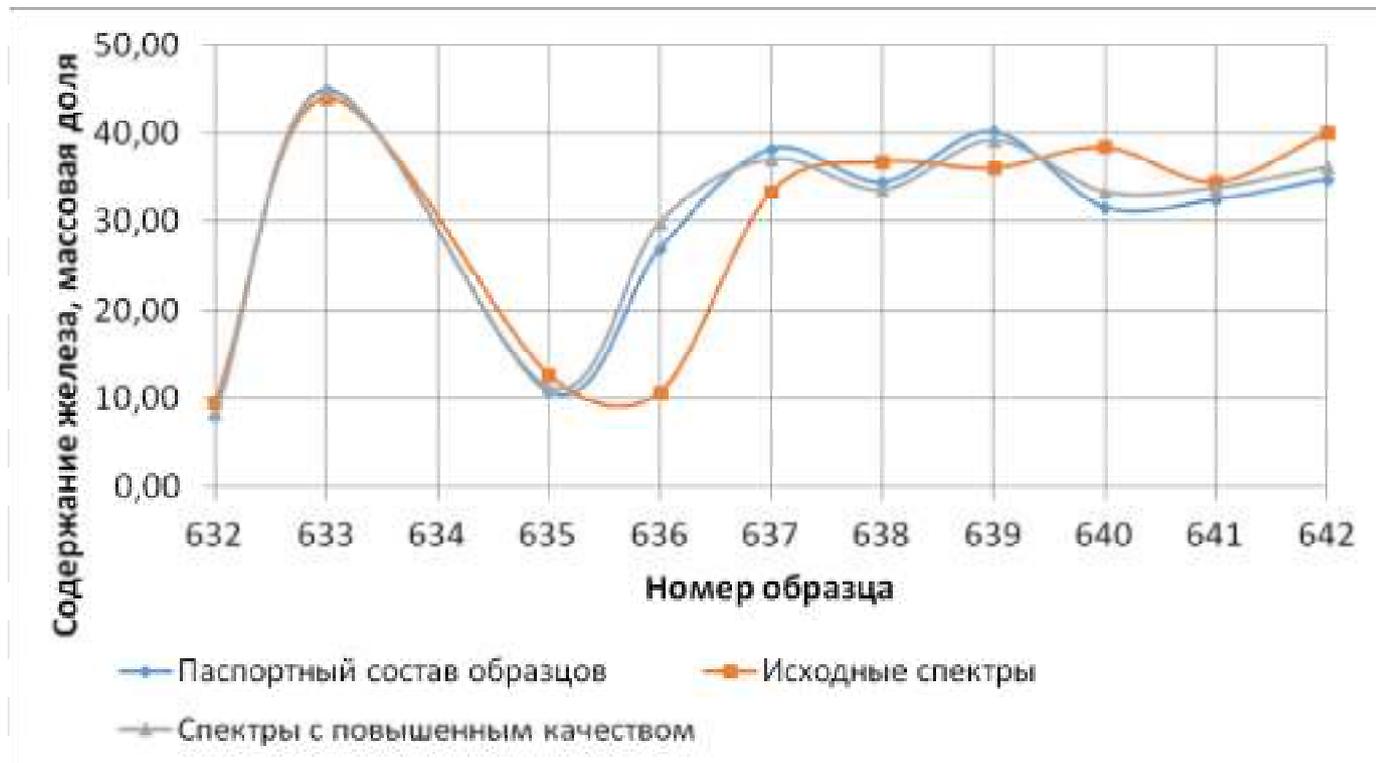


Рис. 3.22. Сопоставление состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию железа для расстояния 200мм

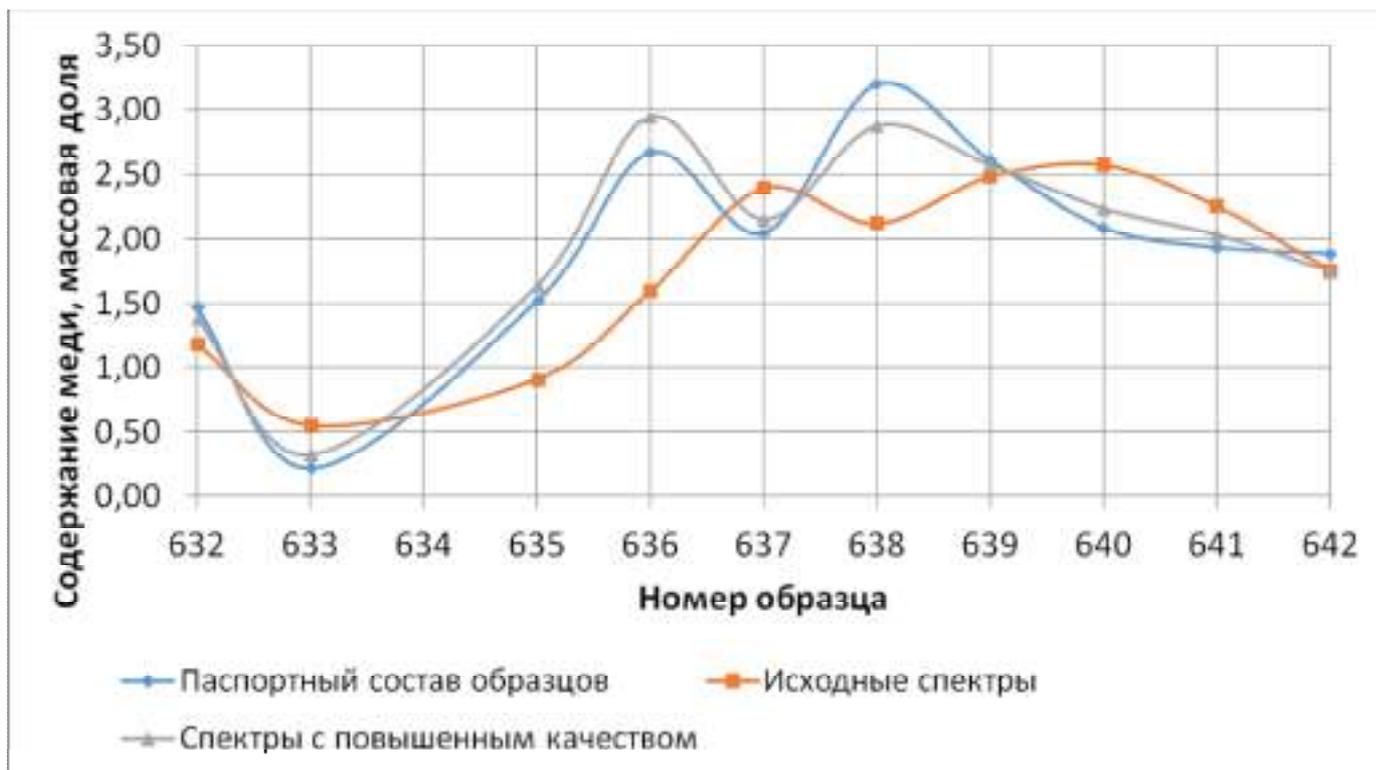


Рис. 3.23. Сопоставление состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию меди для расстояния 200мм

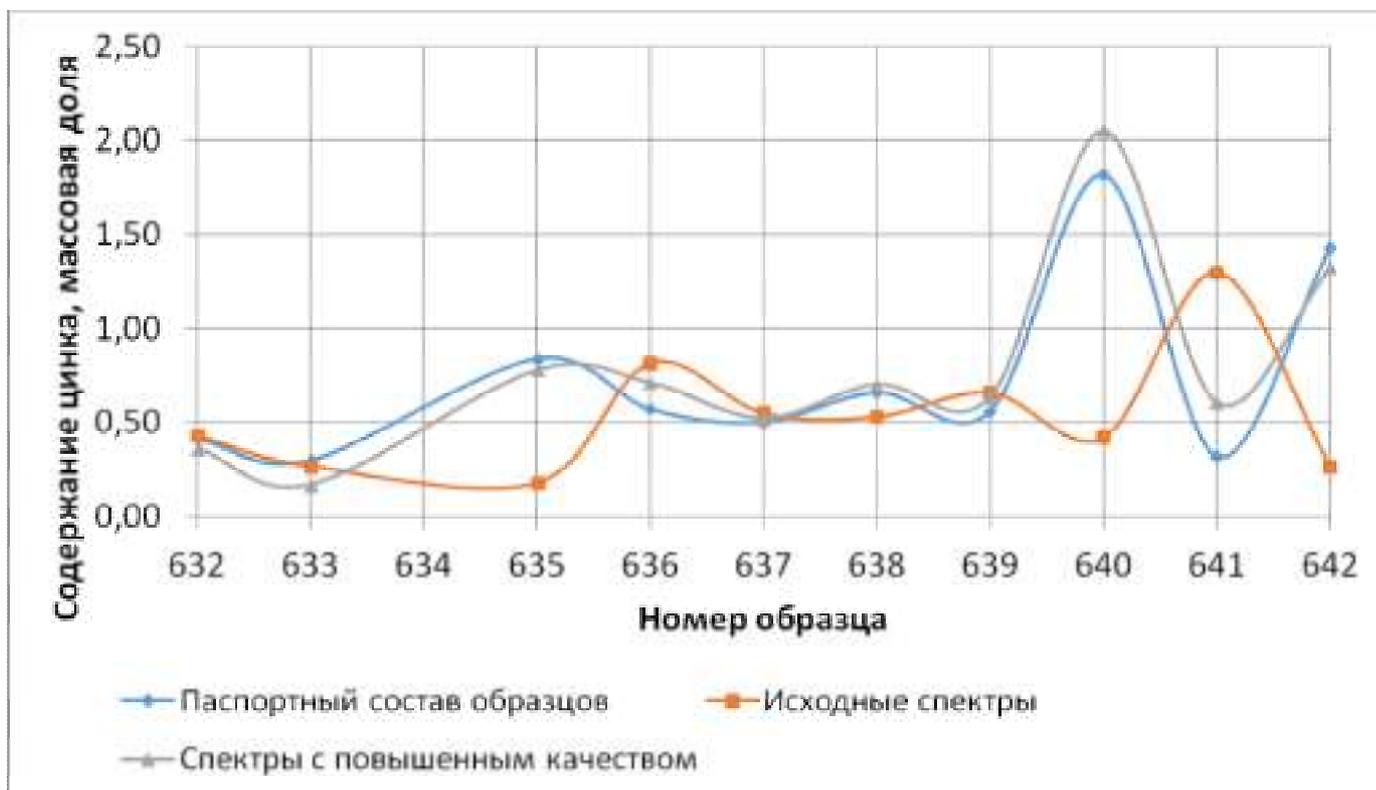


Рис. 3.24. Сопоставление состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию цинка для расстояния 200мм

Промышленные испытания проводились на стволе шахты «Эксплуатационная» подземного рудника ПАО «Гайский ГОК».

В ходе пуско-наладочных работ спектрометр CON-X 02 был установлен на отметке +22м над пластинчатым питателем конвейера «Северный». Рабочие параметры прибора были установлены соответственно параметрам, использованным в лаборатории для расстояния между материалом и спектрометром 200 мм.

Для проведения исследования использовались результаты химического анализа контрольных проб, которые отбирались в соответствии с требованиями ГОСТ 14180-80 «Руды и концентраты цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения влаги». Согласно ГОСТ [3.13], при размере максимального куска выше 50мм, размер куска принимается равным 50мм, а от более крупных кусков откалываются камни и ими наполняется совок. Минимальная масса пробы при этом составляет 2 кг. Количество проб определяется по формуле,

$$N = \frac{4 \cdot V^2}{\Delta_r^2}, \quad (3.13)$$

где V - коэффициент вариации. Согласно ГОСТ 14180-80 для руд принимается $V=35\%$, Δ_r - верхняя граница допустимой относительной погрешности расхождений между результатами химического анализа, принимается не менее относительного значения допустимой погрешности расхождения между результатами химического анализа на предприятии.

Период отбора ручных проб определяется по формуле:

$$T = \frac{60 \cdot M}{Q \cdot N}. \quad (3.14)$$

В условиях ПАО «Гайский ГОК» период отбора и количество проб составляют (расчеты проводились на сменную выдачу руды):

$$\Delta_r = \frac{0,08}{1,0+1,2} = 7,2; \quad (3.15)$$

$$N = \frac{4 \cdot V^2}{d_f^2} = \frac{4 \cdot 35^2}{7,2^2} = 95 \text{ проб}; \quad (3.16)$$

$$T = \frac{60 \cdot M}{Q \cdot N} = \frac{60 \cdot 6500}{400 \cdot 95} = 10,3 \text{ минут}. \quad (3.17)$$

Таким образом, масса общей пробы составит:

$$M_{\text{общ}} = 95 \cdot 2 = 190 \text{ кг}. \quad (3.18)$$

Отбор проб производился по следующей методике:

1. Пробы отбирались с ленточного конвейера «Северный»;
2. В соответствие каждому измерению спектрометра (10 минут) отбиралась одна проба;
3. Масса отбираемой пробы составляла 40-50кг;
4. Пробы отбирались с остановленного конвейера, путем пересечения всей ширины конвейера;

Отобранные пробы нумеровались и отправлялись для разделки и химического анализа в лабораторию ПАО «Гайский ГОК».

Разделка проб проводилась согласно ТИ 00194398-21-01-2012 (Опробование рудных отвалов. Дата введения 21.05.2012.).

Химический анализ производился согласно технических условий ТУ 1733-368-004-97 (Технические условия. Руды сульфидные, медные и медно-цинковые) и ГОСТ 15934.5-80 [3.14] (Концентраты медные. Метод определения железа.), ГОСТ 15934.7-80 [3.15] (Концентраты медные. Метод определения окисей кальция и магния.), ГОСТ 15934.8-80 [3.16] (Концентраты медные. Метод определения серы.), ГОСТ 15934.10-82 [3.17] (Концентраты медные. Метод определения диоксида кремния.).

Результаты элементного анализа проб усреднялись путем вычисления среднеарифметического значения и сравнивались с усредненными аналогичным образом показаниями спектрометра CON-X 02 за тот же период.

В таблице 3.13 и на рисунках 3.25-3.27 приведены результаты сопоставления средних значений химического анализа руды и усредненные показания спектрометра, соответствующие отобранным пробам.

Сопоставление усредненных показаний CON-X 02 и усредненного химического состава отобранных проб руды

| Дата | Химический состав проб по данным лаборатории | | | Состав по данным спектрометра, массовая доля | | | | | |
|--------|--|------|------|--|------|------|--------------------------------|------|------|
| | | | | Исходные спектры | | | Спектры с повышенным качеством | | |
| | Fe | Cu | Zn | Fe | Cu | Zn | Fe | Cu | Zn |
| 2 авг | 30,69 | 2,63 | 0,74 | 30,23 | 2,55 | 0,72 | 30,50 | 2,81 | 0,74 |
| 3 авг | 31,64 | 1,49 | 0,65 | 32,33 | 1,33 | 0,70 | 31,91 | 1,40 | 0,66 |
| 6 авг | 31,81 | 1,04 | 0,57 | 31,52 | 1,00 | 0,51 | 31,69 | 0,93 | 0,55 |
| 7 авг | 29,00 | 1,29 | 0,65 | 30,75 | 1,24 | 0,69 | 29,70 | 1,22 | 0,66 |
| 8 авг | 31,28 | 1,18 | 0,54 | 30,73 | 1,33 | 0,58 | 31,06 | 1,20 | 0,55 |
| 9 авг | 32,45 | 1,34 | 0,53 | 32,52 | 1,12 | 0,52 | 32,48 | 1,18 | 0,52 |
| 10 авг | 31,91 | 1,16 | 0,47 | 29,62 | 1,17 | 0,50 | 30,99 | 1,10 | 0,48 |
| 13 авг | 31,49 | 1,32 | 0,46 | 30,59 | 1,45 | 0,53 | 31,13 | 1,36 | 0,48 |
| 17 авг | 28,44 | 1,11 | 0,59 | 28,19 | 1,18 | 0,51 | 28,34 | 1,07 | 0,56 |
| 21 авг | 26,88 | 1,54 | 0,87 | 28,16 | 1,47 | 0,82 | 27,39 | 1,51 | 0,85 |
| 22 авг | 23,68 | 1,34 | 0,65 | 23,52 | 1,37 | 0,66 | 23,62 | 1,32 | 0,66 |
| 23 авг | 27,47 | 1,15 | 0,52 | 28,58 | 1,12 | 0,49 | 27,92 | 1,06 | 0,51 |
| 24 авг | 27,87 | 1,05 | 0,41 | 27,31 | 1,02 | 0,50 | 27,64 | 0,94 | 0,43 |
| 27 авг | 24,73 | 1,16 | 0,47 | 25,00 | 1,45 | 0,54 | 24,84 | 1,25 | 0,49 |



Рис. 3.25. Сравнение показаний спектрометра CON-X 02 и химического состава контрольных проб по содержанию железа

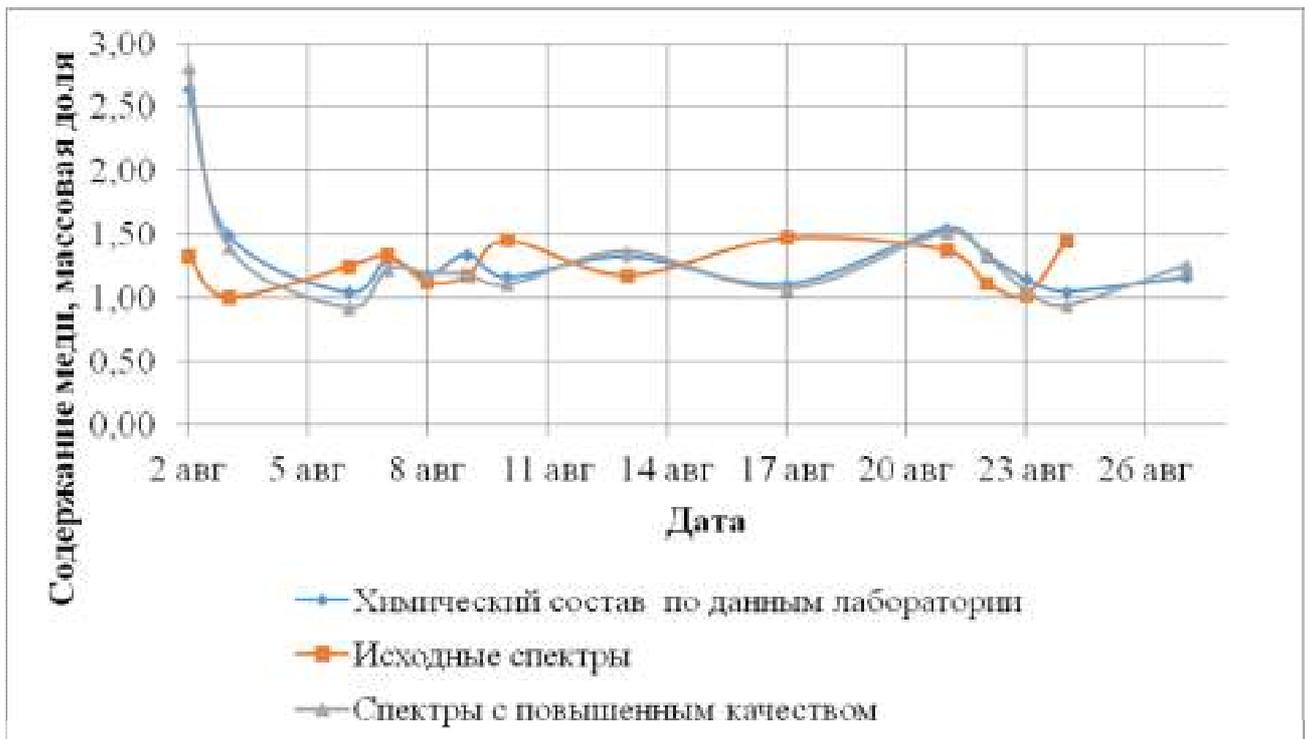


Рис. 3.26. Сравнение показаний спектрометра CON-X 02 и химического состава контрольных проб по содержанию меди



Рис. 3.27. Сравнение показаний спектрометра CON-X 02 и химического состава контрольных проб по содержанию цинка

Как видно из таблицы 3.13 и рисунков 3.25-3.27, предлагаемая методика обработки спектров позволяет значительно улучшить результаты определения содержания меди и цинка, так как позволяет устранить их частичное взаимное наложение.

В таблице 3.14 представлены статистические результаты проведенной работы.

Таблица 3.14

Результаты расчета ошибки анализа статистическими методами

| Статистический параметр | Результат исходных спектров | | | Результат обработанных спектров | | |
|-------------------------------|-----------------------------|------|------|---------------------------------|------|-------|
| | Fe | Cu | Zn | Fe | Cu | Zn |
| Среднеквадратичное отклонение | 1,02 | 0,13 | 0,05 | 0,41 | 0,10 | 0,02 |
| Дисперсия | 1,04 | 0,02 | 0,01 | 0,17 | 0,01 | 0,001 |
| Относительная ошибка, отн % | 3,49 | 9,70 | 9,35 | 1,40 | 7,08 | 2,81 |

Изучение возможности использования предлагаемой методики для медных концентратов проводилось в лабораторных условиях учебно-исследовательской лаборатории «ТекТерра» на конфигурациях спектрометра с измерительным узлом, соответствующим оптимальному расстоянию между спектрометром и материалом в 40 мм, что позволило улучшить результаты определения содержания серы в концентрате

Было использовано 6 стандартных рудных материалов медного концентрата, крупностью 0-1мм. Химический состав стандартных образцов представлен в таблице 3.15.

Таблица 3.15

Химический состав стандартных образцов медного концентрата

| Образец | Cu | Zn | S | Fe | As | Pb | BaSO ₄ | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO |
|---------|-------|------|------|-------|------|-------|-------------------|------------------|--------------------------------|------|------|
| 1 | 18,90 | 3,96 | 38,8 | 31,76 | 0,23 | 0,550 | 0,20 | 2,04 | 0,76 | 1,01 | 0,20 |
| 2 | 19,15 | 4,54 | 38,5 | 31,67 | 0,49 | 1,227 | 0,28 | 1,20 | 0,64 | 0,28 | 0,24 |
| 3 | 18,62 | 4,77 | 38,4 | 31,53 | 0,45 | 1,333 | 0,29 | 0,83 | 0,51 | 0,34 | 0,04 |
| 4 | 18,98 | 4,77 | 38,4 | 30,93 | 0,36 | 1,128 | 0,20 | 0,48 | 0,51 | 0,22 | 0,04 |
| 5 | 19,89 | 4,36 | 38,5 | 32,27 | 0,14 | 0,407 | 0,20 | 0,54 | 0,25 | 0,11 | 0,12 |
| 6 | 19,08 | 5,25 | 38,4 | 31,94 | 0,44 | 0,950 | 0,17 | 1,07 | 0,25 | 0,39 | 0,12 |

В таблице 3.16 представлены параметры установки соответствующие расстоянию между спектрометром и материалом 55 мм.

Параметры рабочей установки

| | |
|--|---------------|
| Спектрометр | CON-X 02 |
| Материал анода рентгеновской трубки | Mo |
| Фильтр первичного излучения | Не применялся |
| Напряжение на аноде | 35 кВ |
| Анодный ток | 25 мкА |
| Время измерения | 300 секунд |
| Среда измерения | воздух |
| Расстояние между поверхностью образца и детектором, мм | 40 мм |

Для каждого образца была снята серия спектров на рабочих параметрах. Полученные спектры были обработаны с помощью предлагаемой методики деконволюции. Затем на основании исходных спектров и модифицированных был произведен расчет составов проб. Расчет элементного состава образцов производился методом фундаментальных параметров с помощью программного комплекса AssayKit [3.7]. Результаты определения представлены в таблице 3.17 и на рисунках 3.28-3.34.

Результаты анализа медного концентрата в лабораторных условиях

| Номер образца | Паспортный состав образца | | | | | | | Результат исходных спектров | | | | | | |
|---------------|---------------------------|------|-------|-------|------|------|------|---------------------------------|------|-------|-------|------|------|------|
| | S | Ca | Fe | Cu | Zn | As | Pb | S | Ca | Fe | Cu | Zn | As | Pb |
| 1 | 38,8 | 0,72 | 31,76 | 18,90 | 3,96 | 0,23 | 0,55 | 38,76 | 0,75 | 31,62 | 18,89 | 3,95 | 0,23 | 0,55 |
| 2 | 38,5 | 0,20 | 31,67 | 19,15 | 4,54 | 0,49 | 1,23 | 38,45 | 0,12 | 31,63 | 19,06 | 4,36 | 0,44 | 1,23 |
| 3 | 38,4 | 0,24 | 31,53 | 18,62 | 4,77 | 0,45 | 1,33 | 38,42 | 0,27 | 31,68 | 18,80 | 4,84 | 0,49 | 1,31 |
| 4 | 38,4 | 0,16 | 30,93 | 18,98 | 4,77 | 0,36 | 1,13 | 38,42 | 0,20 | 31,69 | 19,06 | 4,81 | 0,37 | 1,11 |
| 5 | 38,5 | 0,08 | 32,27 | 19,89 | 4,36 | 0,14 | 0,41 | 38,41 | 0,04 | 31,96 | 19,91 | 4,55 | 0,15 | 0,39 |
| 6 | 38,4 | 0,28 | 31,94 | 19,08 | 5,25 | 0,44 | 0,91 | 38,54 | 0,27 | 31,52 | 18,90 | 5,13 | 0,44 | 0,96 |
| Номер образца | Паспортный состав образца | | | | | | | Результат обработанных спектров | | | | | | |
| | S | Ca | Fe | Cu | Zn | As | Pb | S | Ca | Fe | Cu | Zn | As | Pb |
| 1 | 38,8 | 0,72 | 31,76 | 18,90 | 3,96 | 0,23 | 0,55 | 38,78 | 0,75 | 31,86 | 18,84 | 3,94 | 0,23 | 0,55 |
| 2 | 38,5 | 0,20 | 31,67 | 19,15 | 4,54 | 0,49 | 1,23 | 38,48 | 0,22 | 31,69 | 19,21 | 4,63 | 0,50 | 1,23 |
| 3 | 38,4 | 0,24 | 31,53 | 18,62 | 4,77 | 0,45 | 1,33 | 38,41 | 0,21 | 31,59 | 18,59 | 4,78 | 0,44 | 1,32 |
| 4 | 38,4 | 0,16 | 30,93 | 18,98 | 4,77 | 0,36 | 1,13 | 38,41 | 0,19 | 31,24 | 19,12 | 4,73 | 0,37 | 1,12 |
| 5 | 38,5 | 0,08 | 32,27 | 19,89 | 4,36 | 0,14 | 0,41 | 38,41 | 0,11 | 32,24 | 19,90 | 4,32 | 0,14 | 0,40 |
| 6 | 38,4 | 0,28 | 31,94 | 19,08 | 5,25 | 0,44 | 0,91 | 38,50 | 0,30 | 31,73 | 19,09 | 5,27 | 0,44 | 0,91 |

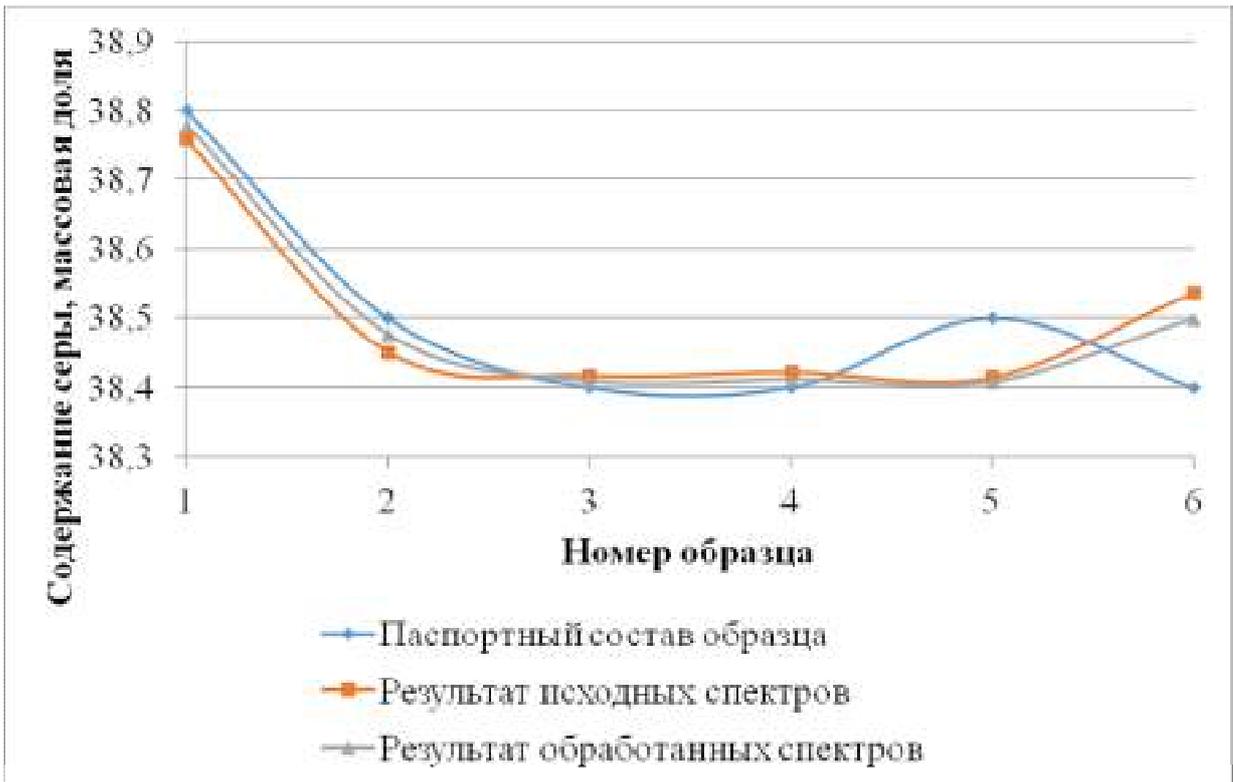


Рис. 3.28. Сопоставление паспортного состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию серы.

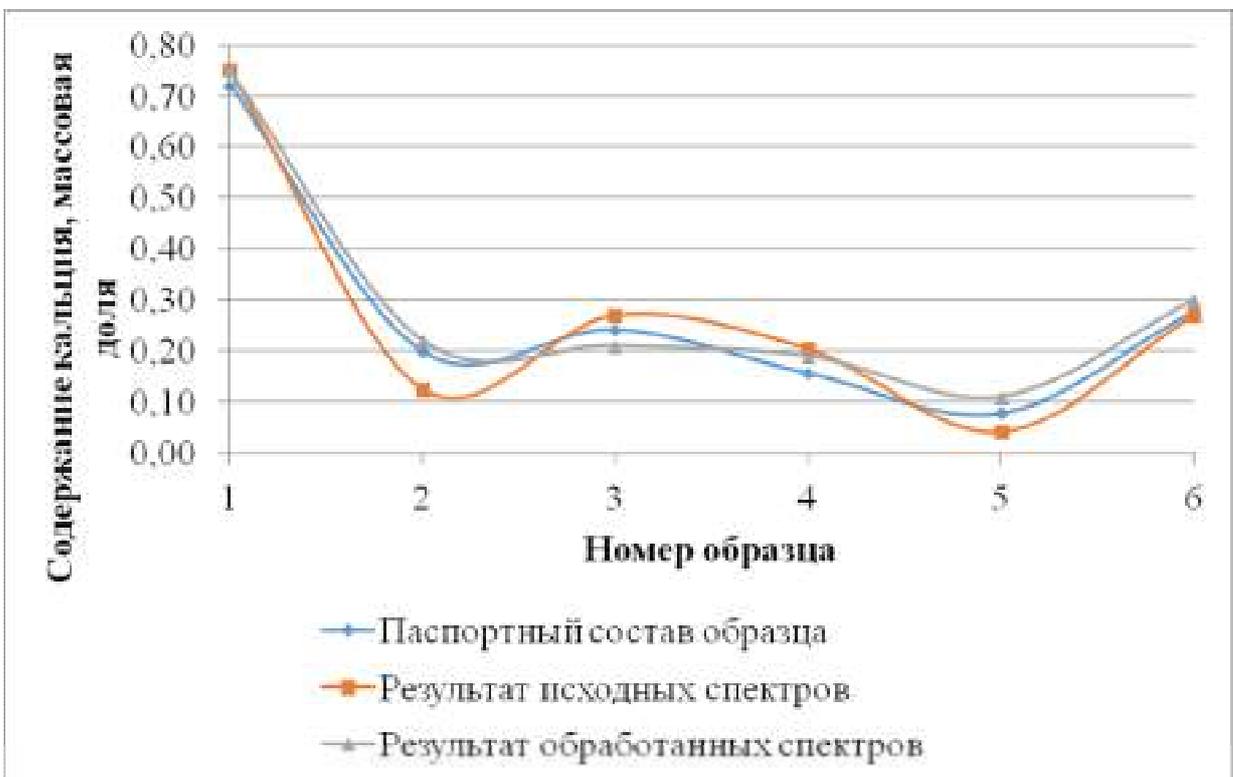


Рис. 3.29. Сопоставление паспортного состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию кальция.

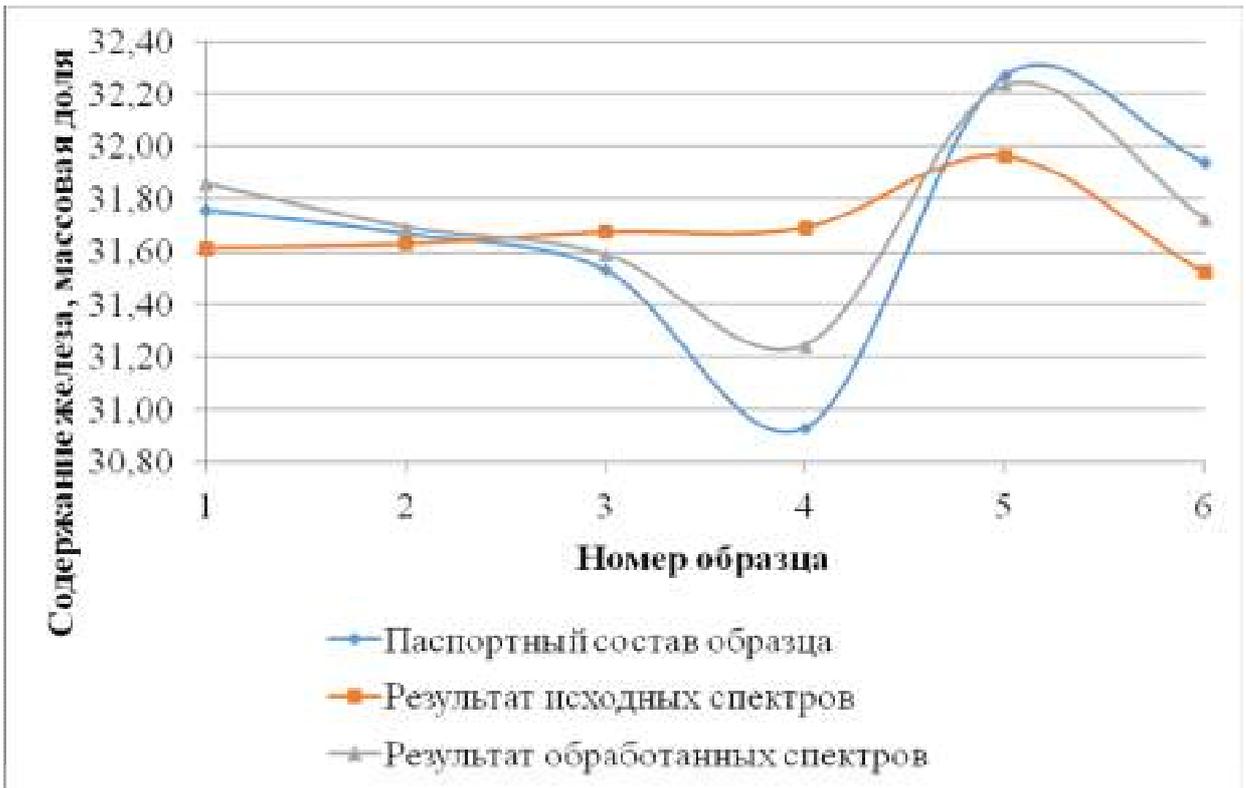


Рис. 3.30. Сопоставление паспортного состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию железа



Рис. 3.31. Сопоставление паспортного состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию меди

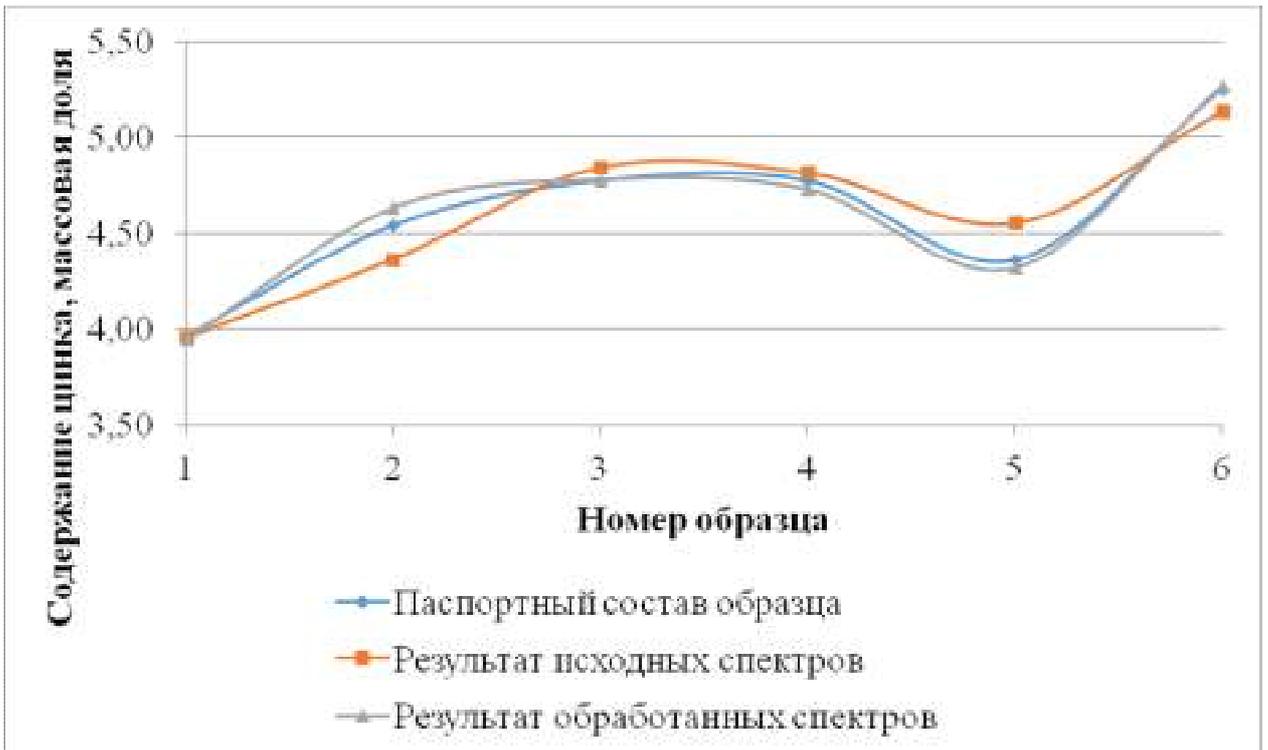


Рис. 3.32. Сопоставление паспортного состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию цинка

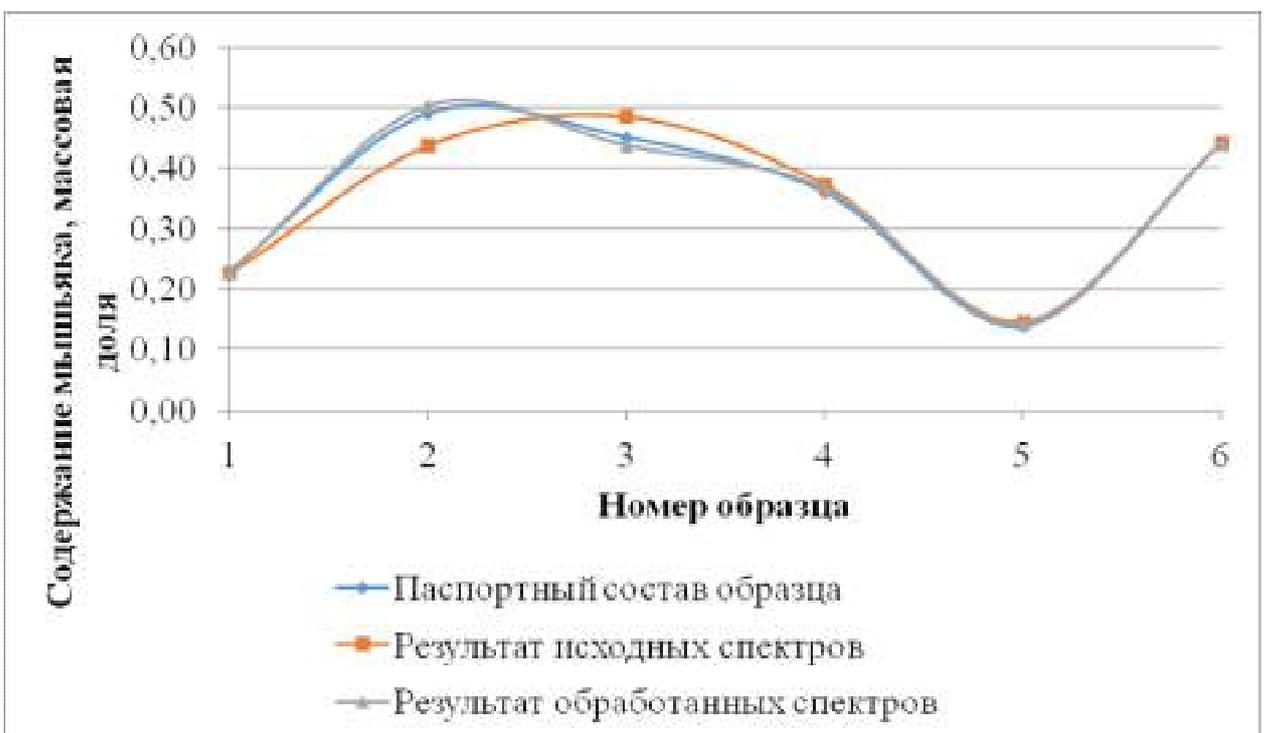


Рис. 3.33. Сопоставление паспортного состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию мышьяка.

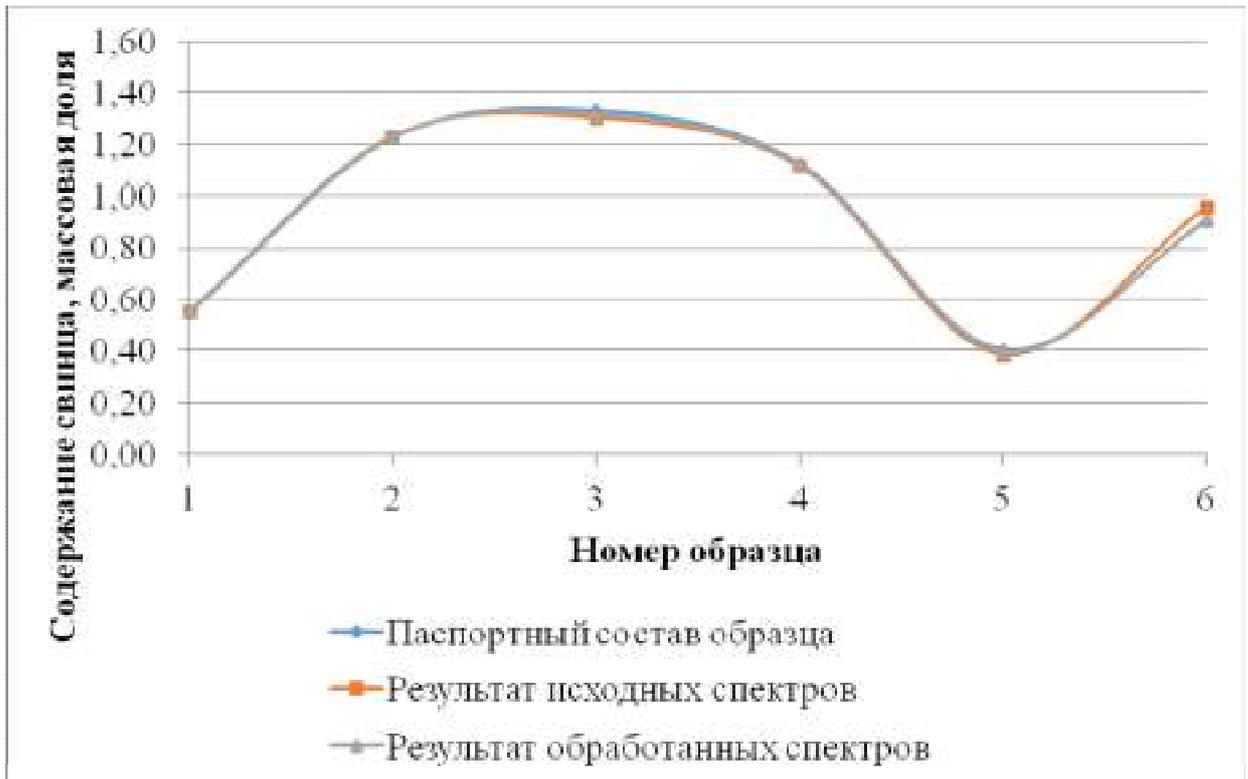


Рис. 3.34. Сопоставление паспортного состава проб с результатами спектрометра CON-X 02 по содержанию свинца.

Промышленные испытания проводились в фильтровально-сушильном отделении (ФСО) обогатительной фабрики (ОФ) АО «Учалинский ГОК». Спектрометр был установлен над конвейером, по которому товарный медный концентрат подавался на склад.

Отбор проб и контроль химического состава концентрата производился службой технического контроля (СТК) АО «Учалинский ГОК» в соответствии с требованиями ГОСТ. 14180-80 «Руды и концентраты цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения влаги». [3.13] Результаты анализа проб службы технического контроля усреднялись каждую смену (8 часов), так же как и результаты анализа концентрата с помощью спектрометра и производилось определение химического состава партии концентрата, производимого каждую смену. Результаты промышленных испытаний показаны на рисунках 3.35-3.40 и в таблице 3.18.

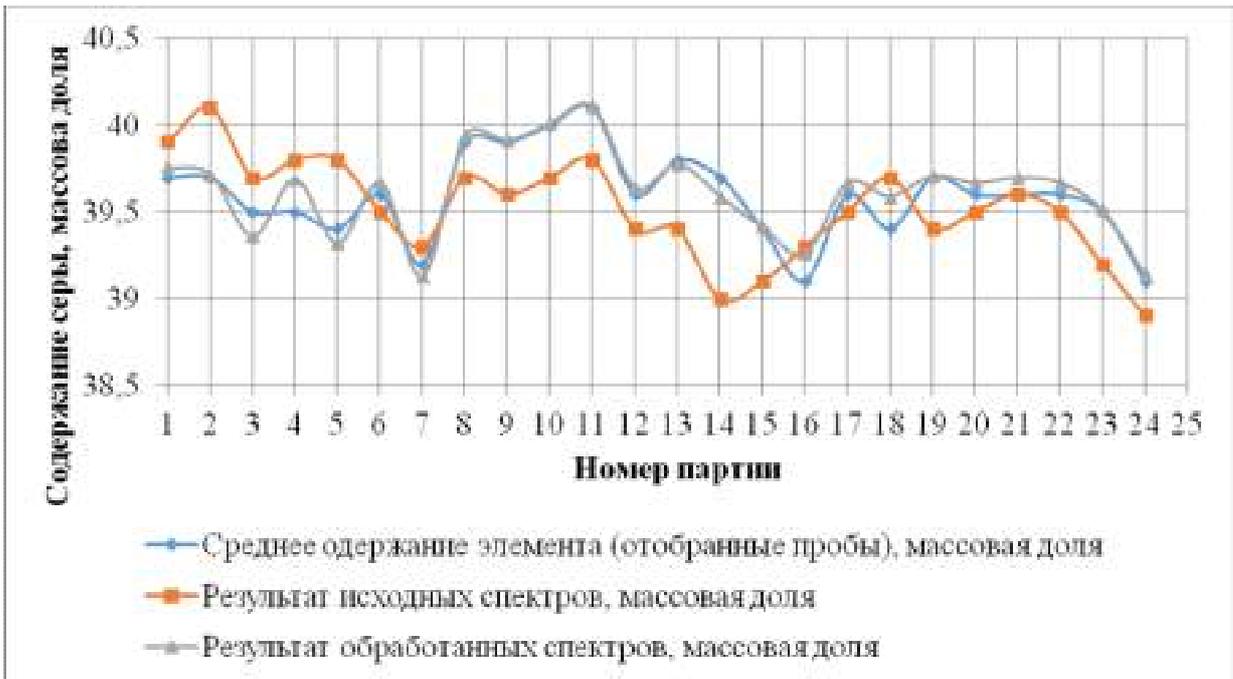


Рис. 3.35. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию серы.



Рис. 3.36. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию железа.

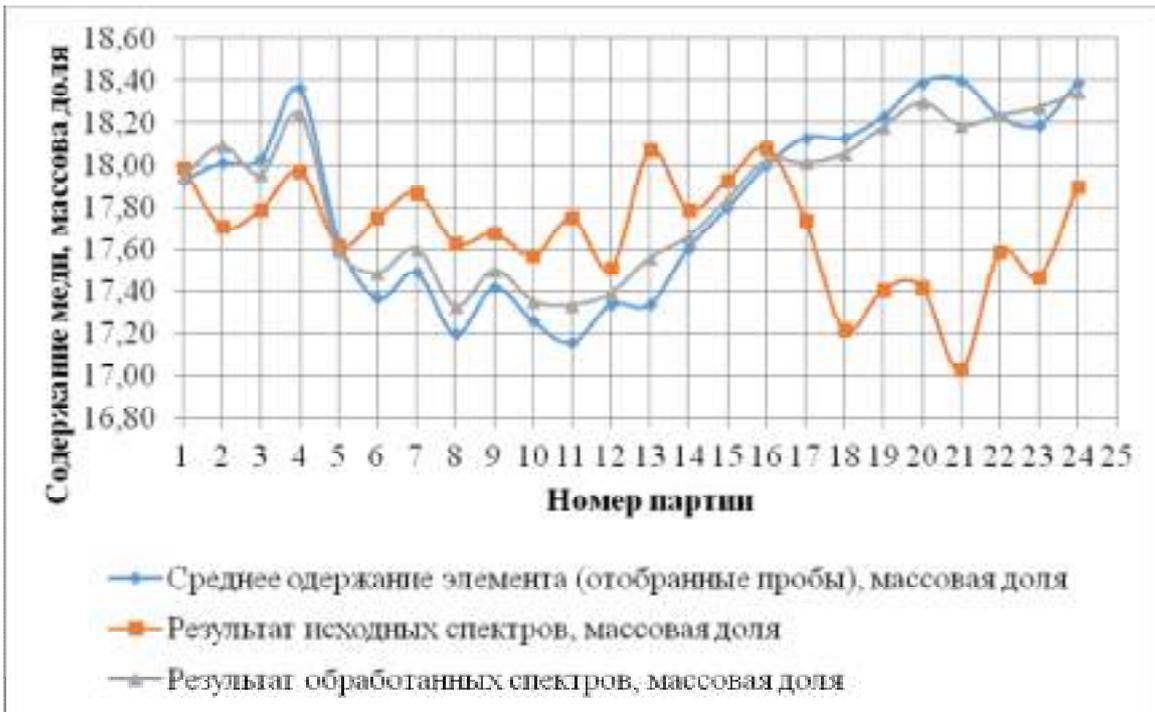


Рис. 3.37. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию меди.



Рис. 3.38. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию цинка.

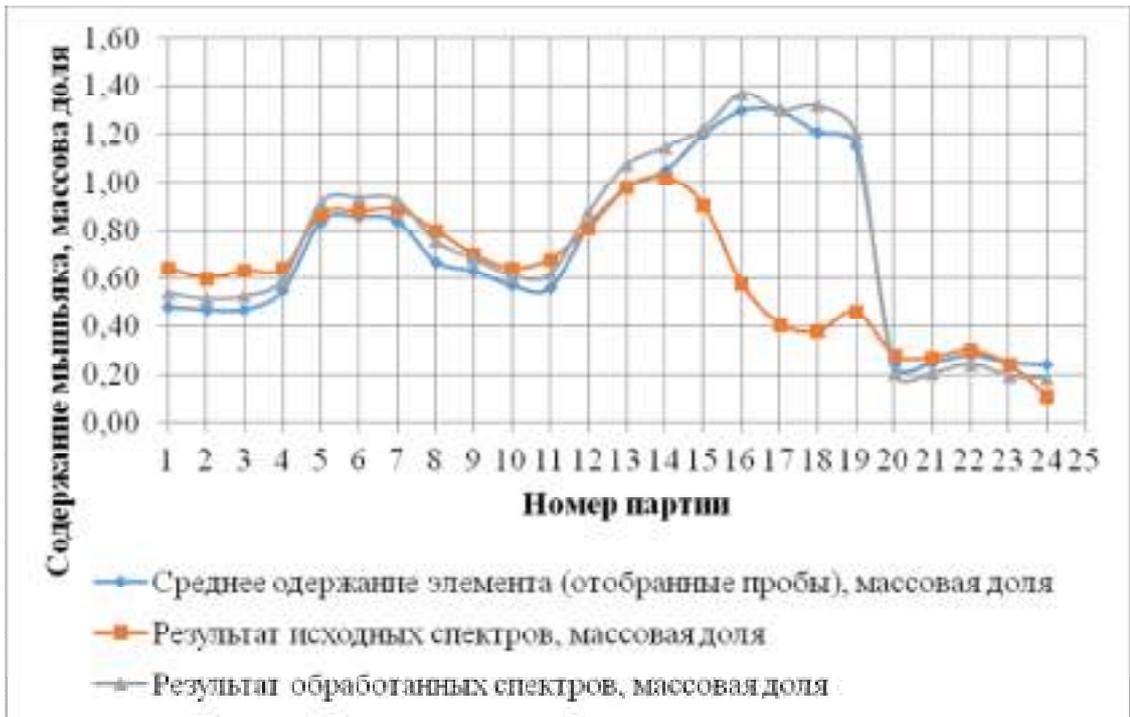


Рис. 3.39. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию мышьяка



Рис. 3.40. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию свинца.

Результаты промышленных испытаний на медном концентрате

| Номер партии | Среднее одержание элемента (отобранные пробы), массовая доля | | | | | | Результат исходных спектров, массовая доля | | | | | | Результат обработанных спектров, массовая доля | | | | | |
|--------------|--|-------|-------|------|------|------|--|-------|-------|------|------|------|--|-------|-------|------|------|------|
| | S | Fe | Cu | Zn | As | Pb | S | Fe | Cu | Zn | As | Pb | S | Fe | Cu | Zn | As | Pb |
| 1 | 39,7 | 30,54 | 17,93 | 6,60 | 0,48 | 0,76 | 39,9 | 30,73 | 17,99 | 6,82 | 0,64 | 0,85 | 39,8 | 30,52 | 17,95 | 6,57 | 0,54 | 0,72 |
| 2 | 39,7 | 30,62 | 18,01 | 6,94 | 0,47 | 0,81 | 40,1 | 30,48 | 17,71 | 6,86 | 0,6 | 0,88 | 39,7 | 30,49 | 18,09 | 6,82 | 0,52 | 0,77 |
| 3 | 39,5 | 30,79 | 18,03 | 7,21 | 0,47 | 0,84 | 39,7 | 30,38 | 17,79 | 7,15 | 0,63 | 0,88 | 39,4 | 30,58 | 17,96 | 7,09 | 0,53 | 0,80 |
| 4 | 39,5 | 30,19 | 18,36 | 7,47 | 0,55 | 0,80 | 39,8 | 29,89 | 17,97 | 6,97 | 0,64 | 0,82 | 39,7 | 29,91 | 18,24 | 7,22 | 0,60 | 0,75 |
| 5 | 39,4 | 30,19 | 17,64 | 7,63 | 0,84 | 1,05 | 39,8 | 30,4 | 17,62 | 7,37 | 0,87 | 1,09 | 39,3 | 30,11 | 17,59 | 7,45 | 0,92 | 1,05 |
| 6 | 39,6 | 30,02 | 17,37 | 7,68 | 0,86 | 1,01 | 39,5 | 30,58 | 17,75 | 7,6 | 0,88 | 1,09 | 39,7 | 30,05 | 17,48 | 7,56 | 0,94 | 1,02 |
| 7 | 39,2 | 29,50 | 17,49 | 7,69 | 0,84 | 0,99 | 39,3 | 30,67 | 17,87 | 7,7 | 0,89 | 1,08 | 39,1 | 29,67 | 17,60 | 7,59 | 0,93 | 1,00 |
| 8 | 39,9 | 30,02 | 17,20 | 7,63 | 0,67 | 1,00 | 39,7 | 30,48 | 17,63 | 7,51 | 0,8 | 1,04 | 39,9 | 30,01 | 17,33 | 7,49 | 0,76 | 0,99 |
| 9 | 39,9 | 30,54 | 17,42 | 7,49 | 0,63 | 1,00 | 39,6 | 30,71 | 17,68 | 7,47 | 0,7 | 1,06 | 39,9 | 30,52 | 17,50 | 7,38 | 0,68 | 1,00 |
| 10 | 40 | 31,05 | 17,26 | 7,21 | 0,57 | 1,00 | 39,7 | 30,86 | 17,57 | 7,24 | 0,64 | 1,06 | 40,0 | 30,98 | 17,35 | 7,12 | 0,61 | 1,00 |
| 11 | 40,1 | 31,74 | 17,16 | 7,06 | 0,56 | 1,04 | 39,8 | 31,28 | 17,75 | 7,24 | 0,68 | 1,11 | 40,1 | 31,70 | 17,34 | 7,01 | 0,62 | 1,05 |
| 12 | 39,6 | 31,05 | 17,34 | 7,38 | 0,82 | 1,43 | 39,4 | 30,8 | 17,51 | 7,24 | 0,81 | 1,37 | 39,6 | 30,96 | 17,39 | 7,24 | 0,88 | 1,48 |
| 13 | 39,8 | 30,54 | 17,34 | 7,11 | 0,98 | 1,41 | 39,4 | 31,33 | 18,07 | 7,45 | 0,98 | 1,42 | 39,8 | 30,76 | 17,56 | 7,11 | 1,08 | 1,48 |
| 14 | 39,7 | 31,05 | 17,61 | 6,97 | 1,05 | 1,41 | 39 | 30,97 | 17,79 | 7,14 | 1,02 | 1,36 | 39,6 | 31,03 | 17,66 | 6,92 | 1,15 | 1,46 |
| 15 | 39,4 | 30,19 | 17,80 | 6,67 | 1,20 | 1,41 | 39,1 | 30,91 | 17,93 | 6,87 | 0,91 | 1,38 | 39,4 | 30,32 | 17,84 | 6,63 | 1,22 | 1,46 |
| 16 | 39,1 | 30,88 | 18,00 | 6,46 | 1,30 | 1,46 | 39,3 | 30,9 | 18,08 | 6,74 | 0,58 | 1,41 | 39,3 | 30,86 | 18,02 | 6,44 | 1,37 | 1,52 |
| 17 | 39,6 | 31,17 | 18,13 | 6,41 | 1,30 | 1,47 | 39,5 | 30,56 | 17,74 | 6,48 | 0,41 | 1,35 | 39,7 | 30,96 | 18,01 | 6,33 | 1,30 | 1,51 |
| 18 | 39,4 | 31,05 | 18,13 | 6,33 | 1,21 | 1,46 | 39,7 | 30,09 | 17,22 | 6,17 | 0,38 | 1,25 | 39,6 | 30,68 | 18,06 | 6,18 | 1,32 | 1,47 |
| 19 | 39,7 | 31,23 | 18,23 | 6,37 | 1,15 | 1,43 | 39,4 | 30,34 | 17,41 | 6,3 | 0,46 | 1,28 | 39,7 | 30,92 | 18,18 | 6,25 | 1,20 | 1,45 |
| 20 | 39,6 | 32,99 | 18,39 | 4,90 | 0,24 | 1,17 | 39,5 | 32,56 | 17,42 | 5,29 | 0,28 | 1 | 39,7 | 33,22 | 18,30 | 4,92 | 0,20 | 1,13 |
| 21 | 39,6 | 32,99 | 18,40 | 4,89 | 0,25 | 1,18 | 39,6 | 32,29 | 17,03 | 5,2 | 0,27 | 0,97 | 39,7 | 33,11 | 18,19 | 4,88 | 0,21 | 1,13 |
| 22 | 39,6 | 33,17 | 18,23 | 4,77 | 0,28 | 1,19 | 39,5 | 32,84 | 17,59 | 5,36 | 0,3 | 1,07 | 39,7 | 33,47 | 18,24 | 4,85 | 0,24 | 1,17 |
| 23 | 39,5 | 33,17 | 18,19 | 4,75 | 0,25 | 1,19 | 39,2 | 32,65 | 17,47 | 5,29 | 0,24 | 1,04 | 39,5 | 33,40 | 18,27 | 4,81 | 0,20 | 1,16 |
| 24 | 39,1 | 33,34 | 18,39 | 4,78 | 0,24 | 1,19 | 38,9 | 32,93 | 17,9 | 5,49 | 0,11 | 1,09 | 39,1 | 33,64 | 18,34 | 4,89 | 0,19 | 1,18 |

Как видно из таблицы 3.18 и рисунков, предлагаемая методика обработки спектров позволяет значительно улучшить результаты определения содержания меди и цинка, мышьяка и свинца, так как позволяет устранить их частичное взаимное наложение.

В таблице 3.19 представлены статистические результаты проведенной работы.

Таблица 3.19

Результаты расчета ошибки анализа статистическими методами

| Статистический параметр | Результат исходных спектров | | | | | | Результат обработанных спектров | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| | S | Fe | Cu | Zn | As | Pb | S | Fe | Cu | Zn | As | Pb |
| Среднеквадратичное отклонение | 0,29 | 0,55 | 0,57 | 0,31 | 0,34 | 0,11 | 0,09 | 0,19 | 0,11 | 0,11 | 0,07 | 0,04 |
| Дисперсия | 0,09 | 0,31 | 0,33 | 0,09 | 0,12 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| Относительная ошибка, отн % | 0,74 | 1,78 | 3,21 | 4,62 | 47,8 | 9,13 | 0,22 | 0,61 | 0,59 | 1,67 | 9,23 | 3,09 |

На основании проведенных опытов разработана программа для усреднения спектров при рентгенофлуоресцентном определении элементного состава материалов в потоке [3.18].

ВЫВОДЫ ПО ЭТАПУ

Выводы по разделу 1

1. Разработан универсальный алгоритм обработки сигналов для различных способов измерения тока дуги. Данный алгоритм может быть реализован как в составе новой системы управления электрическим режимом, внедряемой в производство, так и в составе отдельного модуля. Данный алгоритм обеспечивает возможность функционирования системы управления ДСП (УКП) при различных конфигурациях системы измерения токов дуг, а также при различных группах соединения обмоток печного трансформатора ($\Delta/\Delta-0$ и $Y/\Delta-11$). Благодаря применению разработанного алгоритма, все преобразования сигналов выполняются на программном уровне, без использования дополнительных аппаратных устройств в составе систем измерения тока, что повышает надёжность оборудования и обеспечивает меньшие эксплуатационные издержки.

2. Предложена новая структура системы управления электрическим режимом с нелинейным адаптивным регулятором импеданса. Отличительной особенностью данной системы является отсутствие недостатков, характерных для существующих систем. Это достигается за счёт разделения линеаризующих характеристик электрического и гидравлического контура, а также отсутствием ограничений в части формы линеаризующей характеристики. Благодаря этому, достигается настройка контура регулирования импеданса на технический оптимум на всём диапазоне рабочих длин дуг, чего затруднительно достигнуть при использовании системы с классическим регулятором.

3. Разработаны новые подходы к управлению электрическим режимом ДСП (УКП), в основе которых лежит анализ гармонического состава токов и напряжений дуг. Предложено использовать в профиле плавки новые параметры, такие как THD_I , THD_U , относительные активные значения четных и нечетных гармоник тока дуги $I'_{ВГ.ЧЕТ.Σ}$ и $I'_{ВГ.НЕЧЕТ.Σ}$ и относительные активные значения четных и нечетные гармоники напряжения дуги $U'_{ВГ.ЧЕТ.Σ}$ и $U'_{ВГ.НЕЧЕТ.Σ}$. В этом случае эффективность обеспечивается за счет большей связи гармонического состава тока и напряжения электрической дуги с процессами внутри печной ванны, по сравнению с $W_{уд}$, применяемой в большинстве современных сис-

тем управления электрическим режимом. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, которые следует учитывать при проектировании второго уровня системы управления электрическим режимом ДСП (УКП).

4. Метод управления электрическим режимом по параметру THD_I является наиболее простым решением, которое является наиболее эффективным при отсутствии сильных асимметричных режимов и колебаний длины дуги. В противном случае предлагается использовать THD_U , который более стабилен и меньше подвержен влиянию асимметричных режимов и колебаний длины дуги. Однако расчет THD_U требует косвенного расчета мгновенного напряжения дуги, что требует дополнительного блока управления, а также способности измерять мгновенные межфазные напряжения. В случае необходимости, для решения задач управления на этапе активного плавления твердой шихты и на этапе доводки предлагается использовать отдельный анализ четных и нечетных гармоник с применением параметров $I'_{ВГ.ЧЕТ.Σ}$, $I'_{ВГ.НЕЧЕТ.Σ}$ и $U'_{ВГ.ЧЕТ.Σ}$, $U'_{ВГ.НЕЧЕТ.Σ}$. При этом четные гармоники лучше использовать на стадии активного плавления твердой шихты, так как степень их влияния тесно связана с коэффициентом вентильного эффекта $K_{ВЭ}$, а нечетные гармоники - на стадии доводки, так как они связаны с величиной тепловой постоянной времени дуги θ_D . Однако, как и в случае с THD_U и THD_I , отдельный анализ четных и нечетных гармоник напряжения дуги обеспечивает большую стабильность, но также требует дополнительного расчета мгновенных значений напряжения дуги в дополнение к необходимости рассчитывать каждую гармонику отдельно.

5. Разработанные технические решения с универсальным алгоритмом обработки токовых сигналов при различных способах измерения, адаптивным нелинейным регулятором импеданса, а также управлением электрическим режимом по высшим гармоникам токов и напряжений дуг были интегрированы в состав новой концепции усовершенствованной системы управления электрическим режимом ДСП (УКП). Компоненты данной системы прошли апробацию на действующих технологических предприятиях и подтвердили свою эффективность в части улучшения энергетических показателей работы технологической установки.

Выводы по разделу 2

1. В специализированном программном комплексе «Deform–3D» реализована конечно-элементная модель контактного взаимодействия процесса листовой горячей прокатки. Получены численные значения технологических параметров для системы «заготовка – горячая прокатка – горячекатаная полоса»: интенсивность напряжений (σ_i , МПа), усилия прокатки ($N_{,T}$), температура прокатываемой заготовки и ее распределение по длине и ширине очага деформации, (Т), °С; усилие прокатки (N, МН), обжатие (ϵ , %), скорость прокатки (V, м/с).

2. Достоверность математической модели контактного взаимодействия в исследуемой системе определялась путем сравнения теоретических и фактических (экспериментальных) данных в программе «STATISTICA» Анализ результатов процесса моделирования более чем 200 различных марок сталей и их типоразмеров установил, что средняя величина ошибки составляет 1,6%, максимальная величина ошибки не превышает 9,1%, среднее квадратичное отклонение составляет 0,283 МН, что позволяет признать модель достоверной.

3. На основе полученных результатов моделирования процесса контактного взаимодействия в технологической системе «заготовка- горячая прокатка – горячекатаная полоса» разработан программный продукт и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Расчет параметров контактного взаимодействия в технологической системе «заготовка – стан горячей прокатки – полоса» Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021666369, 13.10.2021 Заявка № 2021665614 от 11.10.2021

4. При разработке универсальной математической модели был проведен анализ результатов, полученных при моделировании процесса нагружения рабочих клеток стана горячей прокатки, из которого следует, что разработанная прогнозная модель имеет высокую точностью (средняя величина ошибки составляет 4%), максимальная величина ошибки не превышает 16,6%, среднее квадратичное отклонение составляет 412,5 кА, что позволяет признать модель достоверной. Данная модель, позволяет на этапе формирования производственного задания (с вероятностью не менее $P(t)=80\%$) выдавать практические

рекомендации по загрузке клеток стана, в том числе и определять эффективность процесса листовой горячей прокатки по предложенному критерию эффективности ($I_{(i,j)}^{эф.пром}$).

5. Предложен и реализован алгоритм, позволяющий аналитически определять объем изношенной поверхности рабочего валка, который учитывает различные формы профилировок рабочих валков: цилиндрическую, выпуклую и вогнутую, что напрямую влияет на качество готовой продукции, учет которого необходим также при составлении производственных заданий.

6. Разработана математическая модель, по определению объема изношенного материала рабочих валков отличающаяся от известных подходов тем что, что позволяет определить объем изношенного материала путем замера только по двум контрольным точкам: диаметр бочки валка в центре (D_0) и диаметру бочки валка на расстоянии $z=\pm b/2$.

7. Предложенный алгоритм позволяет учитывать влияние равномерного и неравномерного износа бочки рабочего валка.

8. По результатам исследований более чем 200 различных марок сталей и их типоразмеров с помощью применения пакета программы «STATISTICA», сделан вывод о том, что применение СМ в разработанных объемах позволят уменьшить напряжения в зоне контакта двух валков (σ_i , МПа) в 1,27...1,34 раза, что составляет 15...18%.

9. На основе полученных результатов моделирования технологических процессов при прокатке заготовке разработан программный продукт и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Расчет технологических параметров процесса прокатки на широкополосных станах горячей прокатки с учётом их конструктивных особенностей» Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021666514, 15.10.2021 Заявка № 2021665583 от 08.10.2021.

10. Разработана и численно реализована математическая модель теплового состояния прокатываемой полосы. В модели учтено влияние следующих технологических особенностей процесса листовой горячей прокатки: теплооб-

мен полосы с валками; объемное тепловыделение при пластической деформации полосы; изменение теплового состояния полосы с учетом работы технологических систем: гидроудаления окалины; межклетевого охлаждения, а также принудительного охлаждения полосы, перед входом ее в очаг деформации.

11. На основе метода теплового баланса исследован вклад внешних и внутренних факторов в тепловое состояние прокатываемой полосы. Для технологии листовой горячей прокатки произведена оценка источников тепла, которая показала, что влияние внешних факторов составляет:

– для внешних факторов на потери тепла: теплоотдача излучением (радиационные потери) до (75%), на гидросбивах (до 12%), кондуктивный теплообмен с валками (до 20%). Практически не оказывает влияние тепловое состояние прокатываемой полосы конвективная теплоотдача (менее 3%) и кондуктивные потери при контакте с роликами в межвалковом участке (менее 3%);

– влияние внутренних факторов: наблюдается приращение тепла за счет протекающих процессов тепловыделение (деформационный разогрев) при пластической деформации, которая составляет до 9%.

12. Оценка достоверности разработанной математической модели производилась путем сравнения экспериментальных и расчетных данных на примере на двух листовых станах горячей прокатки: 2500 и 2000 ПАО «ММК». Результаты сравнительного анализа показали, что достоверность математической модели составляет 78...87%.

Результаты математического моделирования теплового состояния прокатываемой полосы использовались для решения расчета теплового состояния рабочего вала.

13. Для листовых станов горячей прокатки разработана математическая модель, описывающая тепловое состояние рабочих валков. В основу модели заложено уравнение теплопроводности в полярной системе координат. Численная реализация модели теплового состояния рабочих валков производилась методом независимых потоков.

14. Реализованная математическая модель теплового состояния рабочих валков позволяет исследовать изменение температуры (на поверхности и во внутренних слоях) валков в различных интервалах времени.

15. Разработанный математический алгоритм определяет максимальную точку нагрева – центр бочки рабочего валка. Расчет распределения температуры по длине бочки валка реализуется решением серии частных двумерных задач для нескольких параллельных сечений валка.

16. Оценка достоверности разработанной математической модели теплового состояния рабочих валков производилась путем сравнения экспериментальных (тепловизионных) и расчетных данных на примере на двух листовых станах горячей прокатки: 2500 и 2000 ПАО «ММК». Результаты сравнительного анализа показали, что достоверность математической модели составляет 80...82%.

17. Анализ технологии производства подката для целей дальнейшего холодного переката с дефектом «вкатанная окалина» по заключениям металлографических исследований показал, что основной причиной образования при горячей прокатке дефекта «вкатанная окалина» является высокая температура скотки 604,7 т (24%).

18. Глубина залегания дефекта «вкатанная окалина» не более 0,02 мм и составляет 81 % и 67% от первоначальной причины «плена» и «недотрав» соответственно.

19. Анализ влияния температуры после черновой стадии прокатки подката для жести показал, что снижение температуры за последней черновой клетью уменьшает отсортировку по дефекту «вкатанная окалина» от 1,9 до 3,7 раза.

20. Исследование влияния температуры скотки на толщину слоя окалины показало, что изменение температуры скотки от 560 до 730 °С приводит к увеличению слоя окалины от 55,15 г/м² до 89,45 г/м². С целью улучшения качества поверхности готовой электролуженой жести предложена опытная технология с пониженной температурой скотки подката для жести (630-660 °С вместо 660-690 °С по стандартной технологии).

21. На основе полученных результатов моделирования узла гидромеханического удаления окалины разработан программный продукт и получено сви-

детельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Расчет параметров систем гидромеханического удаления окалины станов горячей полосы»
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021666487,
15.10.2021 Заявка № 2021665607 от 11.10.2021.

Выводы по разделу 3

1. Выполнена разработка научно обоснованных технических решений по совершенствованию режимов работы установок определения элементного состава движущегося материала. В частности, выполнена оптимизация конструктивных и технологических параметров работы установки для элементного анализа движущегося материала в зависимости от свойств и вида материала потока, а также разработано программное обеспечение по улучшению спектров методом деконволюции для внедрения в существующие АСУ ТП горно-обогатительных и металлургических предприятий.

2. Проведены теоретические и экспериментальные исследования интенсивности характеристических линий элементов, а также линий когерентного и некогерентного рассеяния линий рентгеновской трубки для 8 стандартных образцов железорудной смеси (ЖРС), 9 стандартных образцов агломерата и 12 стандартных образцов различных железосодержащих материалов (ЖСМ). На основании результатов проведенных опытов была разработана математическая модель учета и компенсации колебаний расстояния между спектрометром и материалом. Аналогичные исследования и промышленные испытания проведены для медьсодержащих руд и концентратов.

3. Проведено промышленное испытание разработанной методики обработки спектров, подтвердившее ее эффективность в плане определения химического состава ЖРС. Доказано, что при применении разработанной методики для анализа сульфидных медно-цинковых руд погрешность определения химических элементов Fe, Cu и Zn снижается (отн %): с 3,49; 9,70; и 9,35 до 1,40; 7,08; и 2,81 соответственно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**Список использованных источников для раздела 1**

1.1. Николаев, А.А. Разработка универсальных алгоритмов обработки токовых сигналов для усовершенствованной системы управления электродуговой печи / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, В.С. Ивекеев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2021. Т.19. №2. С. 112-121. – doi: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-112-121.

1.2. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021666379 РФ. Программа для обработки сигналов напряжений и токов дуговой сталеплавильной печи при различной конфигурации измерительных устройств / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич, К.А. Шахбиева, Р.Р. Дема, И.А. Гришин, С.С. Рыжевол; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; № 2021665364; заявл. 06.10.2021; опубл. 13.10.2021. - 1 с. (30 КБ).

1.3. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь// Вестник Южноуральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20. № 3. С. 52Е64

1.4. Миронов Ю.М. Особенности дуговых сталеплавильных печей как приемников электрической энергии / Миронов Ю.М. // Электрометаллургия. – 2020. – № 9. С. 2-8.

1.5. Глухов И.В. Энергосбережение в современной дуговой сталеплавильной печи дсп-120 / Глухов И.В., Мехряков Д.В., Воронов Г.В., Вдовин К.М., Рыбак А.А., Таранов В.В. // Сталь. – 2020. – № 5. – С. 21-23.

1.6. Шишимиров М.В. Оптимизация энерготехнологических режимов выплавки стали в современных дуговых сталеплавильных печах средней вместимости / Шишимиров М.В., Рабинович В.Л., Александров А.В., Аксенов А.Б., Коростелев А.Б. // Электрометаллургия. 2020. – № 11. – С. 12-17.

1.7. Wang, Yan Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace / Wang Yan, Mao Zhi-zhong, Tian Hui-xin, Li Yan, Yuan Ping // J.Cent. South Univ. Technol. – 2010. –pp. 560-565

1.8. Макаров А.Н. Исследование теплообмена и КПД дуг в дуговых сталеплавильных печах с обычной и конвейерной загрузкой шихты / Макаров А.Н., Окунева В.В., Павлова Ю.М. // Энергетические системы. – 2018. – № 1. – С. 39-43.

1.9. B. Boulet Modeling and control of an electric arc furnace / . B. Boulet, G. Lalli, M. Ajersch // Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003. – 2003. – vol.4. –pp. 3060-3064.

1.10. Yan Wang Modeling and parameter identification of an electric arc for the arc furnace / Yan Wang, Zhizhong Mao, Yan Li, Huixin Tian, Lifeng Feng // 2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics. – 2008. – pp. 740-743

1.11. Bowman, B. Arc Furnace Physics /B. Bowman, K. Krüger // Verlag Stahleisen GmbH. – Düsseldorf. –2009. – 245 с.

1.12. Бикеев, Р.А. Динамические режимы в электромеханических системах дуговых сталеплавильных печей и их воздействие на вводимую активную мощность: дис. канд. техн. наук. – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск. – 2004. – 229 с.

1.13. Миронов Ю.М. Регулировочные характеристики дуговых сталеплавильных печей / Миронов Ю.М., Миронова А.Н., Михадаров Д.Г. // Электроталлургия. 2016. № 9. С. 2-9.

1.14. Иванушкин В.А. Формирование энергоэффективных алгоритмов управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей / Иванушкин В.А., Исаков Д.В., Сарапулов Ф.Н., Поздеев С.А., Рабек А.А. // Промышленная энергетика.– 2015.– № 7.– С. 32-35.

1.15. Yakimov I.A. Investigation of electrical characteristics of high-power electric arc furnaces in the mode of stabilizing the primary current of the furnace transformer by means the thyristor regulator in the intermediate circuit / Yakimov I.A., Radionov A.A., Maklakova E.A. // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2018. – pp. 840-844.

1.16. Ненахов А.И. Совершенствование подходов к моделированию токов дуговой сталеплавильной печи при разработке компенсаторов реактивной мощности / Ненахов А.И., Гамазин С.И. // Промышленная энергетика.– 2015.– № 9.– С. 25-31.

1.17. Nanang Hariyanto Characteristic study of three-phase AC electric arc furnace model / Nanang Hariyanto, Muhammad Nurdin, P. Gregorius Alvin Tanthio // The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 2014. – 2014. – pp. 203-207

1.18. Lozynskyu O. Simulink model of electric modes in electric arc furnace / Orest Lozynskyu, Yaroslav Paranchuk, Oleksii Kobylanskyi // 2017 IEEE Interna-

tional Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). – 2017. – pp. 54-57.

1.19. Миронов Ю.М. Анализ электрических режимов дуговых сталеплавильных печей в различные периоды плавки / Миронов Ю.М., Миронова А.Н. // *Металлург.* – 2021. – № 2. – С. 48-53.

1.20. Kosmatov, V.I. Study of the 34,5 kV Network Voltage Quality During the Parallel Operation of an Electric Arc Furnace and Rolling Mill Electric Drives / V.I. Kosmatov, A.S. Denisevich, V.S. Ivekeev, V.A. Laptova // *Proceedings of the 2021 Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2021).* – Chelyabinsk, Russia. – 24-26 Sep. 2021, pp. 1-6. – doi:10.1109/UralCon52005.2021.9559604 (Scopus).

1.21. Международная научно-техническая конференция «Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2021)». Место и дата проведения: Chelyabinsk, Russia. 24-26 Sep. 2021. Тема доклада: «Study of the 34,5 kV Network Voltage Quality During the Parallel Operation of an Electric Arc Furnace and Rolling Mill Electric Drives».

1.22. Николаев, А.А. Методика моделирования случайных возмущений длин электрических дуг для оптимальной настройки нелинейного П-регулятора импеданса / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов // *Черные металлы.* №11. 2021. С. 74-80. – doi:10.17580/chm.2021.11.13 (Scopus, Q2).

1.23. Николаев, А.А. Повышение эффективности систем управления электрическими режимами электродуговых печей за счет применения адаптивного регулятора импеданса / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, О.С. Малахов, С.С. Рыжевол // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика.* – 2021. Т. 23. №4.

1.24. Nikolaev, A.A. Electric Arc Furnace Control System with Smelting Stage Diagnostic Function and Adaptive Non-Linear Impedance Controller / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov // *Proceedings of the 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2021).* – Sochi, Russia. – 17-21 May 2021, pp. 1-6. – doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446347.

1.25. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021666384. Программа для исследования динамических режимов работы усовершенствованного адаптивного регулятора импеданса в составе системы автоматического управления перемещением электродов электродуговой печи / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич, К.А. Шахбиева, В.А. Ефремов; заявитель и пра-

вообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; №2021665394; заявл. 06.10.2021; опубл. 13.10.2021. - 1 с. (85 КБ).

1.26. Nikolaev, A.A. Improved Methodology for Estimating Specific Energy Consumption in Electric Arc Furnaces when Changing Electrical Modes / A.A. Nikolaev, V.A. Efremov, P.G. Tulupov // Proceedings of the 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2021). – Sochi, Russia. – 17-21 May 2021, pp. 1-6. – doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446378 (Scopus, ID:2-s2.0-85116195432).

1.27. Николаев, А.А. Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием математической модели / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич, С.С. Рыжевол // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. Т. 21. №2. С. 72-84. – doi: 10.14529/power210208.

1.28. Патент РФ на изобретение RU 2758063 С1. Система управления для дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; № 2020138050; заявл. 24.12.2019; опубл. 26.10.2021.

1.29. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity) // CIGRE Report No. 102. – 1939.

1.30. Chang, G.W.; Liu, Y.J.; Huang, H.M.; Chu, S.Y. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2016. Montreal. Canada. IEEE. pp. 1-4. DOI: 10.1109/PES.2006. 1709471. 7.Xiao-Mei, Ye; Xiao-He, Liu, The Harmonic Detection based on Wavelet Transform and FFT for Electric Arc Furnaces // Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding. China. IEEE. 2009. pp. 408-412. DOI: 10.1109/ICWAPR. 2009.5207486.

1.31. Wang, Yongning; Li, Heming; Xu, Boqiang; Sun, Liling, Simulation Research of Harmonics in Electric System of Arc Furnace // Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE. 2004. Vol.1. pp. 902-906. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122.

1.32. Nikolaev, A.A. An Improved Algorithm for Arc Furnace Mode Control with Dynamic Arc Length Correction at Metal Refining Period/ A.A. Nikolaev, M.V. Bulanov, P.G. Tulupov, I.A. Lozhkin // Proceedings of the 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2021). – Sochi, Russia. – 5-11 Sept. 2021, pp. 1-6. – DOI: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537370.

1.33. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021666556. Программа для управления электрическим режимом электродуговой печи с использованием информации о гармоническом составе токов дуг / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, М.В. Буланов, С.С. Рыжевол, В.А. Лаптова; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; №2021665415; заявл. 06.10.2021; опубл. 15.10.2021. - 1 с. (50 КБ).

1.34. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021666195. Программа для управления электрическим режимом установки ковш-печь с использованием информации о гармоническом составе токов дуг / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, М.В. Буланов, В.А. Ефремов, В.А. Лаптова; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; №2021665401; заявл. 07.10.2021; опубл. 11.10.2021. - 1 с. (38 КБ).

1.35. Köhle, S.; Ersatzschaltbilder und Modelle für die elektrischen Größen von Drehstrom- Lichtbogenöfen, Habilitationsschrift // Fachbereich Elektrotechnik, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1990.

1.36. Köhle, S. D. Lichtbogenreaktanzen von Drehstrom-Lichtbogenöfen // Elektrowärme International 51, B4, 1993, pp. 175-185.

1.37. Krüger, K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen // Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.

1.38. Wang, Yan; Mao, Zhi-zhong; Tian, Hui-xin; Li, Yan; Yuan, Ping Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace // J.Cent. South Univ. Technol. (2010) 17:560-565, DOI:10.1007/s11771-010-0523-3

1.39. Hay, T., Hernandez, J.; Roberts S.; Echterhof T. “Calculation of view factors in electric arc furnace process modeling // Steel Research International, July 2020.

1.40. Panoiu, M.; Panoiu, C.; Ghiormez, L. “Modeling of the electric arc behaviour of the electric arc furnace” // 5th International Workshop on Soft Computing Applications, Szeged, Hungary, 2012, pp. 261-271.

1.41. Schliephake, H.; Timm, K.; Bandusch, L. Computer controlled optimization of the productivity of ISPAT-Hamburger Stalwerke’s AC-UHP-EAF // 5th European Electric Steel Congress, June 19-23, 1995.

1.42. Köhle, S. "Lichtbogenreaktanzen von Drehstrom-Lichtbogenöfen (Arc reactances of AC arc furnace)" // Elektrowärme International 51, B4, 1993, pp. 175-185.

1.43. Nikolaev, A.A. Improving the Two-Position Ladle Furnace Efficiency Using Advance Electrical Mode Control Algorithms / A.A. Nikolaev, M.V. Bulanov, P.G. Tulupov // Proceedings of the 2021 Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2021). – Chelyabinsk, Russia. – 24-26 Sep. 2021, pp. 1-6. – doi:10.1109/UralCon52005.2021.9559551 (Scopus).

Список использованных источников для раздела 2

2.1. Total Materia. База данных материалов [электронный ресурс]. - Key to Metals AG. - URL: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=RU>. - Режим доступа: по подписке.

2.2. Грудев, А.П. Технологические смазки в прокатном производстве / А.П. Грудев, В.Т. Тилик. - М.: Metallurgiya, 1975. - 368 с.

2.3. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. - М.: Metallurgiya, 1982. - 310 с.

2.4. Грудев, А.П. Внешнее трение при прокатке / А.П. Грудев. - М.: Metallurgiya, 1973. - 288 с.

2.5. Грудев, П.И.. Обработка металлов давлением / П.И. Грудев - М.: Metallurgizdat, 1953. - 223 с.

2.6. Платов, С.И. Эффективность применения смазочного материала в производстве листового проката / С.И. Платов, Р.Н. Амиров, Р.Р. Дема, А.В. Ярославцев // В сборнике: Перспективные материалы и технологии. Международный симпозиум посвящен 40-летию ИТА НАН Беларуси. - 2015. - С. 81-83.

2.7. Дема, Р.Р. Теоретическое исследование влияния режимов подачи смазочного материала на изменение энергозатрат при горячей прокатке на стане 2000 ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" // Р.Р.Дема, М.В. Харченко, А.А. Горбунова // Производство проката. - 2013. -№ 2. -С. 11-13.

2.8. Платов С.И. Влияние смазочного материала на изменение энергосиловых параметров прокатки в непрерывной группе клетей стана 2000 горячей прокатки ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" / С.И. Платов, Р.Н. Амиров, Р.Р.Дема, А.В. Ярославцев, Ю.Х. Гатаулина, У.Д. Мартынова // Производство проката. - 2013. - № 11. - С. 09-14.

2.9. Дема Р.Р. Статистическая оценка влияния смазочного материала на энергосиловые параметры горячей прокатки / Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров, У.Д. Мартынова, Ю.Х. Гатаулина // *Сталь*. -2015. -№ 8. -С. 40-42.

2.10. Kharchenko, M.V. Energy reduction technologies based on the lubricant supply in the roll contact system “quarto” during the hot strip rolling // M.V. Kharchenko, R.R. Dema, V.I. Bilichenko // *Materials Science Forum*. -2016. Vol. 870. P. 446-453.

2.11. Dema, R.R. Dependents of energy consumption at the wide-strip hot rolling on a mode option of rolls lubrication modeling // R.R. Dema, O.B. Kalugina, N.Sh. Tyuteryakov // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017*. - P. 8076435.

2.12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666369 РФ. Расчет параметров контактного взаимодействия в технологической системе «заготовка – стан горячей прокатки – полоса» / Р.Н. Амиров, В.С. Банщиков, И.А. Гришин, Р.Р. Дема, О.Р. Латыпов, П.А. Матвеев, А.А. Николаев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; № 2021665614; заявл. 11.10.2021; опубл. 13.10.2021. – 1 с. (515 кб)

2.13. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. - Изд. 2-ое перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1968. - 480с.

2.14. Анцупов, А.В. Разработка аналитического метода оценки износостойкости и способа продления ресурса опорных валков листовых станов: дис. канд. техн. наук / А.В. Анцупов. - Магнитогорск. 2007. - 121 с.

2.15. Костецкий, Б.И. Исследование энергетического баланса при внешнем трении металлов / Б.И. Костецкий, Ю.И. Линник // *Доклады Академии наук СССР*. - Т.183. - 1968. - №5. -С. 1052-1055.

2.16. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х книгах. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. - М.: Машиностроение, 1978. - Кн 1. - С. 46-57.

2.17. Dema, R.R. Influence of Type and Consumption of Pellets on Indicators of Blast-Furnace Smelting in the JSC Ural Steel / R.R. Dema, A.N. Shapovalov, A.A. Kalchenko // *Solid State Phenomena*. - 2021. - Vol. 316. P. 443-448.

2.18. Tyuteryakov, N.S. Life of Slip Bearings in the Supporting Roller System of Section Rolling Mills. / N.S. Tyuteryakov, R.R. Dema, M.V. Kharchenko, O.R. Latypov, E.F. Romanenko // *Russian Engineering Research*. - 2021. - Vol. 41. - P. 1022–1026. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X21110277>.

- 2.19. Щербаниц, Э.Н. Износ опорных валков и изменение шлифовочного профиля рабочих валков дрессировочного стана / Э.Н. Щербаниц, К.Н. Савранский, Н.И. Великий, В.Г. Надутов // *Металлург.* - 1971. - № 11. - С 42-43.
- 2.20. Целиков, А.И. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. - М.: *Металлургия*, 1982. - 335 с.
- 2.21. Целиков, А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А.И. Целиков. - М.: *Металлургиздат*, 1962.
- 2.22. Целиков, А.И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. - М.: *Металлургия*, 1980.
- 2.23. Целиков А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.И. Гришков - М.: *Металлургия*, 1970.
- 2.24. Terentyev, D.V. Effect of operating modes and contact surface oil absorption on lubricant film thickness in heavy-duty friction units of metallurgical plants / D.V. Terentyev, N.N. Ogarkov, S.I. Platov, A.V. Kozlov // *Chernye Metally.* - 2018. - № 9. - P. 60-64.
- 2.25. Басинюк, В.Л. Исследование влияния способа обработки и микротопографии шероховатых слоев на маслосъемность поверхностей трения / В.Л. Басинюк, П.А. Витязь, М.А. Леванцевич, К.В. Григорович, С.И. Платов, Д.В. Терентьев, В.В. Рубаник Мл., М.В. Харченко, Р.Р. Дёма // *Трение и износ.* - 2021. - №4. - С. 387-399.
- 2.26. Горячева, И.Г. Модель эластогидродинамического контакта с ограниченным потоком смазки: сборник «Проблемы современной механики» / И.Г. Горячева, А.П. Горячев. - М.: *Изд-во МГУ*, 2008. - С. 133–147.
- 2.27. Елманов, И.М. Термовязкоупругость жидких смазочных материалов в тяжело нагруженных узлах трения: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.04. - Москва, 2001. - 314 с.
- 2.28. Дема, Р.Р. Теория и практика применения технологической смазки при широкополосной горячей прокатке: монография / Р.Р. Дема, М.В. Харченко, С.И. Платов. - Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. - 99 с.
- 2.29. Тютеряков, Н.Ш. Методика оценки ресурса подшипников скольжения валковой арматуры сортопрокатных станков / Н.Ш. Тютеряков, Р.Р. Дема, М.В. Харченко, О.Р. Латыпов, Е.Ф. Романенко // *Вестник машиностроения.* - 2021. - №8. - С. 43-46. DOI: 10.36652/0042-4633-2021-8-43-46.
- 2.30. Дема, Р.Р. Компьютерное и математическое моделирование процесса горячей прокатки с применением смазочных материалов в программном

комплексе DEFORM-3D. Сообщение 1. Физическое и компьютерное моделирование процесса горячей прокатки со смазочными материалами на машине трения СМЦ-1 / Р.Р. Дема, О.Р. Латыпов, О.Б. Калугина, А.В. Колдин, Б.Б. Зарицкий, А.А. Ступак // Производство проката. - 2019. - № 7. - С. 21-28.

2.31. Дема, Р.Р., Платов С.И., Харченко М.В., Латыпов О.Р., Калугина О.Б., Колдин А.В., Кургузов С.А. Компьютерное и математическое моделирование процесса горячей прокатки с применением смазочных материалов в программном комплексе DEFORM-3D. Сообщение 2. Компьютерное моделирование процесса контактного взаимодействия «опорный валок – рабочий валок» при листовой горячей прокатке с применением технологической смазки / Р.Р. Дема, С.И. Платов, М.В. Харченко, О.Р. Латыпов, О.Б. Калугина, А.В. Колдин, С.А. Кургузов // Производство проката. - 2019. - № 8. - С. 8-12.

2.32. Харченко, М.В. Методика определения несущей способности и противозадирных свойств смазочных материалов, применяемых в тяжело нагруженных трибодинамических сопряжениях металлургических машин и агрегатов / М.В. Харченко, С.П. Нефедьев, Р.Р. Дёма, О.Р. Латыпов // Известия высших учебных заведений машиностроение. - 2021. - Т. 738. - № 9. - С. 30-39.

2.33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666514 РФ. Расчет технологических параметров процесса прокатки на широкополосных станах горячей прокатки с учётом их конструктивных особенностей / Р.Н. Амиров, В.С. Банщиков, Р.Р. Дема, О.Р. Латыпов, А.А. Николаев, С.И. Платов, М.В. Харченко; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; № 2021665583; заявл. 08.10.2021; опубл. 15.10.2021. – 1 с. (783 кб)

2.34. Terentyev, D. Determination of Lubricant Layer Thickness with an Allowance for Oil Absorption Capacity of Contacting Surfaces / D. Terentyev, S. Platov, M. Kharchenko, N. Ogarkov, R. Dema, E. Suvorova // MATEC Web of Conference: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2021). - 2021. - Vol. 346. P. 03108. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202134603108>.

2.35. Дема, Р.Р. Компьютерное моделирование и исследование процесса горячей прокатки на базе программного комплекса Deform-3D / Р.Р. Дема, С.И. Платов, А.В. Козлов, О.Р. Латыпов, Р.Н. Амиров // Производство проката. - 2018. - № 11. - С. 36-40.

2.36. Гарбер, Э.А. Опыт расчёта температурных полей напряжений и теплового профиля валков при холодной прокатке (Материалы для конструкторов и технологов) / Э.А. Гарбер. - Свердловск: Уралмашзавод, 1964. - 60 с.

2.37. Шичков, А.Н. Теплообмен при производстве листового проката / А.Н. Шичков, В.Г. Лайбейш. - Л.:СЗПИ, 1982. - 80 с.

2.38. Воробей, С.А. Моделирование температурного режима рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки / С.А. Воробей, И.Ю. Приходько // Научные новости. Современные проблемы металлургии. Пластическая деформация металлов, том 8, г. Днепропетровск. - 2005. - С. 232-235.

2.39. Yoshida H. An integrated mathematical simulation of temperatures, rolling loads and metallurgical properties in hot strip mills / H. Yoshida, A. Yorifuji, S. Kosei, M. Saeki // ISIJ International. - 1991. - Vol. 31. - No. 6.- P. 571-576.

2.40. Shapovalov, A.N. Improvement the secondary cooling mode for continuous casting of roundbillets at Ural Steel JSC / A.N. Shapovalov, R.R. Dema, O.R. Latypov // CIS Iron and SteelReview. – Vol. 22. – 2021. – P. 14-18.

2.41. Sun, C.G. Prediction of Roll Thermal Profile in Hot Strip Rolling by the Finite Element Method / C.G. Sun and S.M. Hwang // ISIJ International. – 2000. - Vol. 40. - No. 8. - P. 794–801.

2.42. Boldyrev, D.A. The evaluation model efficiency of ladle graphitizing inoculation of cast iron /D.A. Boldyrev, O.R. Latypov, R.N. Amirov // Solid State Phenomena. - 2021. - Vol. 316. P. 413-417. (Scopus, Q3, ID: 2-s2.0-85106182848)

2.43. Zhang, H. Numerical Simulation of Thermal Field of Work Roll during Top Side-pouring Twin-roll Casting of Steel / H. Zhang, Ch. Zhou, Ch. Wei. // ISIJ International. – 2017. - Vol. 57, - No. 10. - P. 1811–1820.

2.44. Azene, Y.T. Work Roll System Optimisation using Thermal Analysis and Genetic Algorithm / Y.T. Azene // School of Applied Science. Manufacturing Department. PhD Thesis. - 2011.

2.45. Boldyrev, D. Analytical Study of the Process of Dissolution of Silicon from a Modifier Particle/ D. Boldyrev, M. Kharchenko, R. Amirov, A. Bokov // MATEC Web of Conferences: InternationalConference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2021). -2021. - Vol. 346. - P. 02029. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateccconf/202134602029>.

2.46. Horsky, J. Optimization of working roll cooling in hot rolling / J. Horsky, P. Kotrbacek, J. Kvapil, K. Schoerhuber // HEFAT2012, 9th International

Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 16-18 July 2012, Malta.

2.47. Benasciutti, D. Harmonic Model for Numerical Simulation of Thermal Stresses in Work Roll of Hot Rolling Mill / D. Benasciutti, F. De Bona, M.Gh. Munteanu // ECCM 2010, IV European Conference on Computational Mechanics, Palais des Congrès, Paris, France, May 16-21, 2010.

2.48. Benasciuttia, D. Finite elements prediction of thermal stresses in work roll of hot rolling mills / D. Benasciuttia, E. Brusab, G. Bazzaroc // Procedia Engineering 2 (2010) 707–716.

2.49. Patula, E.J. Steady-state temperature distribution in rotating roll subject to surface heat fluxes and convective cooling / E.J. Patula // Transaction of the ASME. - 1981. - Vol.103. -P.36-41.

2.50. Dema, R.R. Influence of the consumption of pellets with different basicity on indicators of blast-furnace smelting / R.R. Dema, A.N. Shapovalov, S.N. Baskov // Chernye Metally. - 2021. - Vol.2021. - № 1. P. 4-10. doi: 10.17580/chm.2021.01.01.

2.51. Мухин, Ю.А. Математическая модель теплового состояния металла на отводящем рольганге стана горячей прокатки с учетом полиморфного превращения. Сообщение 1 / Ю.А. Мухин, С.И. Мазур, Е.В. Макаров, С.М. Бельский // Производство проката. - 2011. - №12. - С .2-5.

2.52. Tyuteryakov, N.Sh. Modeling of the Thermal Processes in the Roll Fittings Rolls in Section Mills / N.Sh. Tyuteryakov, R.R. Dema, O.R. Latypov // Russian Metallurgy (Metally). 2021. - Vol. 2021. No. 13. P. 1843–1847.

2.53. Колдин, А.В. Теплообмен при струйном охлаждении движущегося металлического листа: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Колдин; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Магнитогорск, 2012.

2.54. Dema, R. An Experimental Study of the Thermal State of a Steel Billet during Hot Rolling / R.Dema, A. Koldin, V. Banshichov, T. Murzabaev, R. Amirov, E. Suvorova // MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2021). - 2021. Vol. 346. P. 03107. - doi:<https://doi.org/10.1051/matecconf/202134603107>.

2.55. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666277 РФ. Расчет теплового состояния валков четырехвалковых клеток «кварто» с учетом технологии листовой горячей прокатки / Р.Н. Амиров, В.С.

Баншиков, Р.Р. Дема, О.Р. Латыпов, Т.А. Мурзабаев, А.А. Николаев, С.И. Платов, М.В. Харченко; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; № 2021665573; заявл. 08.10.2021; опубл. 12.10.2021. – 1 с. (515 кб)

2.56. Platov, S.I. Model of Layer-by-Layer Cooling Trajectory in Rolled Products by TMCP / S.I. Platov, K.B. Maslennikov, N.V. Urtsev, R.R. Dema, E.U. Zvyagina // Materials Science Forum. -2021. - Vol. 1037. - P. 390-399. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.390>.

2.57. Boldyrev, D.A. Structural Features and Distribution of Silicon in Ferrosilicon-Magnesium Modifiers / D.A. Boldyrev, S.I. Platov, M.V. Kharchenko, N.V. Urtsev // Materials Science Forum.- 2021. - Vol. 1037. - P. 322-328. DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.322>.

2.58. Platov, S.I. Effect of the Temperature–Speed Hot-Rolling Conditions on Scale Formation / S.I. Platov, R.R. Dema, O.R. Latypov, V.S. Banshchikov, V.A. Mustafina, M.V. Kharchenko, D.V. Terent'ev // Russian Metallurgy (Metally). - 2021. - Vol. 2021. No. 13. P. 1766–1770.

2.59. В.И. Ляшков, Теоретические основы теплотехники, 2002.

2.60. Добронравов А.И., Карпов Е.В. Классификатор дефектов поверхности горячекатанного плоского стального проката. Магнитогорск: ЦПК «Персонал», ОНТИ ОАО «ММК», 2002. 90

2.61. Дема Р.Р., Кувшинов Д.А., Амиров Р.Н. и др Разработка и внедрение способа гидроудаления (гидроподавления) вторичной окалины на чистовых клетях станов горячей прокатки. Сообщение 1. Теоретическое обоснование проблемы окалинообразования на участке чистовых групп клетей станов горячей прокатки // Производство проката. 2015. №8. С. 20-24.

2.62. Кравцов В.В. Материаловедение и противокоррозионные свойства неметаллических материалов, 1985, 88 с.

2.63. Шаповалов А.Н., Нефедьев С.П., Платов С.И., Харченко М.В. Совершенствование технологии вакуумной обработки колесной стали / Шаповалов А.Н., Нефедьев С.П., Платов С.И., Харченко М.В. // Черные металлы. - 2021. - № 12.

2.64. Расторгуев, Д.А. Влияние гидродинамики течения электролита при электрохимической обработке на качество обработанной поверхности / Д.А. Расторгуев, К.О. Семенов, Р.Р. Дема, М.В. Харченко, О.Р. Латыпов // Вестник машиностроения. - 2021. - №9. - С. 55-60 .DOI:10.36652/0042-4633-2021-9-55-60

- 2.65. О. Кубашевский, Б. Гопкинс. Окисление металлов. Т. II. Под ред. Бенара Ж. Перев. с франц. Изд-во «Металлургия», 1969, с. 444.
- 2.66. Shapovalov, A.N. Experience of Using Complex Modifiers to Increase Corrosion Resistance of Pipe Steels / A.N. Shapovalov, R.R. Dema, S.P. Nefedev // Solid State Phenomena. - 2021. - Vol.316. P. 369-374.
- 2.67. Янтурин С.И., Кужина Г.Ш., Боброва О.Б., Черчинцев В.Д. Тяжелые металлы в компонентах экосистем промышленных регионов с развитой металлургической промышленностью. - Магнитогорск, 2015. - 128 с.
- 2.68. Алтунин В.С., Белавцева Т.М. Контроль качества воды. Справочник. - М.: Колос, 1993. - 236 с.
- 2.69. Артамонова. В.Т. Актуальные проблемы диагностики и профилактики профессиональных заболеваний // Медицина труда и промышленная экология. 1996.-№5. - С. 4-6.
- 2.70. Дема Р.Р., Кувшинов Д.А., Амиров Р.Н. Разработка и внедрение способа гидроудаления (гидроподавления) вторичной окалины на чистовых клетях станов горячей прокатки. Сообщение 2. Математическое моделирование температурного режима прокатки для определения условий работы системы гидроудаления окалины// Производство проката. 2015. №9. С. 3-9.
- 2.71. Дема Р.Р., Кувшинов Д.А., Амиров Р.Н., С.П. Нефедьев С.П., Тютряков Н.Ш. Разработка и внедрение способа гидроудаления (гидроподавления) вторичной окалины на чистовых клетях станов горячей прокатки. Сообщение 3. Разработка и проектирование системы гидроудаления окалины в чистовых группах клетей станов горячей прокатки листового металла.// Производство проката. 2015. №9. С. 3-9. (не знаю страницы)
- 2.72. Дема Р.Р., Кувшинов Д.А., Галкин В.В. Возможность установки дополнительных систем гидроудаления окалины в современных цехах производства горячекатаного проката// Процессы и оборудование металлургического производства Платов С.И. Межрегиональный сборник научных трудов. Под редакцией С. И. Платова. Магнитогорск, 2009. С. 268-272.
- 2.73. Платов С.И., Дёма Р.Р., Кувшинов Д.А. Устройство для распыления жидкости.// Патент на полезную модель RUS 110663 14.06.2011 г.
- 2.74. «Применение оптимизированных сопел для гидросбива окалины на широкополосном стане горячей прокатки фирмы THYSSEN KRUPP STAHL AG» / Э.-А. Беккер, Г. Биркемайер, В. Бюхеле, М. Дегнер, Л. Девриент, М. Новак, Г. Тиман / Черная металлургия №7, 2000 с.42 – 46.

2.75. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666487 РФ. Расчет параметров систем гидромеханического удаления окалины станов горячей полосы / В.С. Банщиков, И.А. Гришин, Р.Р. Дема, О.Р. Латыпов, П.А. Матвеев, А.А. Николаев, С.А. Оруджова, С.И. Платов, М.В. Харченко; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; № 2021665607; заявл. 11.10.2021; опубл. 15.10.2021. – 1 с. (515 КБ)

Список использованных источников для раздела 3

3.1. Миронов Э.Г. Методы и средства измерений. – Екатеринбург, Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – 462 с.

3.2. Метрология и электрические измерения: Учеб. пособие / Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин, В.И. Уткин, А.П. Зарубин; Под ред. Е.Д. Шабалдина. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.- пед. ун-т», 2006. - 282 с.

3.3. Основной источник погрешностей при рентгенофлуоресцентном анализе железорудных смесей / Ушеров А. И., Алов Н. В., Волков А. И., Ишметьев Е. Н., Полушкин М. Е., Вдовин К. Н., Ушерова Е. В., Шипилова Н. А. // Заводская лаборатория. 2009. № 3. С. 25-26.

3.4. Lankosz M. et al. Correction of interelement effects in X-ray fluorescence analysis of iron ore. // International Journal of Radiation Application and Instrumentation. Part A. 1986. V. 37. N 12. P. 1205-1207.

3.5. Гришин, И.А. Характеристика отсевов тяжелосреднего обогащения магнезита как перспективного техногенного сырья / А.Н. Смирнов, И.А. Гришин, А.В. Масалимов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 2021. - №2. - С. 88-93. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-88-93

3.6. Гришин, И.А. Состояние сырьевой базы для обнаружения перспективных источников получения оксида магния в процессах обогащения / А.В. Масалимов, А.Н. Смирнов, Н.Н. Орехова, И.А. Гришин // Вестник Забайкальского государственного университета. - 2021. - Т. 27. - №3. - С. 16-25. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-3-16-25

3.7. Sokolov A.D., Docenko D., Bliakher E., Shirokobrod O., Koskinen J. On-line analysis of chrome-iron ores on a conveyor belt using x-ray fluorescence analysis/ X-Ray Spectrom. 2005. V. 34. P. 456-459.

3.8. Лосев Н.Ф., Смагунова А.Н. Основы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа. – М., «Химия», 1982 –208 с.

3.9. Лосев Н.Ф. Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный

анализ. М.: Наука, 1969. — 336 с.

3.10. Справочник химика [Текст] : в 3-х т. / ред. Б. П. Никольский. - М., Госхимиздат. Т.1 : Общие сведения. Элементы и строение материи. Свойства важнейших веществ. Таблицы спектральных и рентгено- спектральных линий. - 1951. - 895 с.

3.11. ГОСТ 15054-80 Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения содержания влаги

3.12. А.И. Ушеров, Е.Н. Ишметьев, А.Г. Ляпин, А.В. Ямщиков, А.М. Цыгалов. Непрерывный контроль химического состава сульфидной медно-цинковой руды/ Заводская лаборатория. Диагностика материалов №4 2014. Т80. С 69-73.

3.13. ГОСТ 14180-80 Руды и концентраты цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения влаги

3.14. ГОСТ 15934.5-80 Концентраты медные. Метод определения железа.

3.15. ГОСТ 15934.7-80 Концентраты медные. Метод определения окисей кальция и магния.

3.16. ГОСТ 15934.8-80 Концентраты медные. Метод определения серы.

3.17. ГОСТ 15934.10-82 Концентраты медные. Метод определения диоксида кремния.

3.18. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021667649. Программа для усреднения спектров рентгенофлуоресцентного анализа сыпучего материала в потоке / А.А. Николаев, В.В. Мавринский, А.С. Нефедьев, И.А. Гришин, Р.Р. Дема; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; № 2021666332 ; заявл. 19.10.2021; опубл. 01.11.2021. - 1 с. (12,3 МБ).