

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.

« 15 » 12 2022 г.

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ (заключительный)

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 3

Руководитель проекта:

ведущий научный сотрудник,  
канд. техн. наук, доцент

А.А. Николаев

## 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  
канд. техн. наук

  
\_\_\_\_\_ П.Г. Тулупов

Младший научный сотрудник

  
\_\_\_\_\_ С.С. Рыжевол

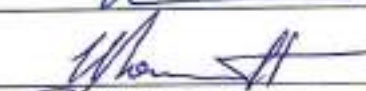
Младший научный сотрудник

  
\_\_\_\_\_ М.В. Буланов

Младший научный сотрудник  
канд. техн. наук

  
\_\_\_\_\_ В.С. Ивекеев

Младший научный сотрудник

  
\_\_\_\_\_ И.А. Ложкин

Младший научный сотрудник  
канд. геол.-мин. наук

  
\_\_\_\_\_ М.С. Колкова

Инженер

  
\_\_\_\_\_ О.Р. Латыпов

Инженер

  
\_\_\_\_\_ Н.В. Урцев

Инженер

  
\_\_\_\_\_ Д.А. Назаров

## РЕФЕРАТ

**Отчет:** 282 стр., 129 рис., 52 табл., 111 библиограф. источников

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

В соответствии с программой проведения работ в рамках 3 этапа проекта №FZRU-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 связанным между собой общими целями и задачами научным направления. В рамках первого направления исследований разработаны: 1) новая методики расчета уставок электрических параметров ДСП и УКП; 2) усовершенствованный способ управления режимами работы газокислородных горелок и кислородных фурм, 3) усовершенствованный способ управления инжекторами углерода ДСП; 4) новый способ обработки расплава в УКП. В рамках второго направления: 1) проведено исследование видов технологических операций, позволяющих сформировать покрытия на рабочих поверхностях тяжело нагруженных узлов трения с заданным микрорельефом поверхности. разработан режимов нанесения данных покрытий, а также сформированы рекомендации по выбору применяемых материалов в процессе их создания; 2) разработана математическая модель формирования высотного параметра шероховатости, на основе которой разрабатывается программное обеспечение, позволяющее рассчитать технологические параметры, улучшающие эксплуатационные свойства сформированных покрытий; 3) Разработаны оборудование и технологии по нанесению покрытий на контактирующие поверхности тяжело нагруженных узлов трения, улучшающих условия фрикционного взаимодействия. В рамках третьего направления, разработан производственно-аналитического комплекс для определения химического состава движущейся на ленте конвейера железорудной смеси в режиме реального времени. Проведён анализ эффективности применения установки для экспресс-определения элементного состава методом поточного рентгенофлуоресцентного анализа.

Результаты исследований по 3 этапу ГЗ опубликованы в 19 научных статьях в журналах и сборниках научных трудов конференций, индексируемых наукометрической системой Scopus, из них 10 статей в журналах с квартилем Q1,2, также дополнительно в 10 научных статьях в изданиях, входящих в ядро РИНЦ. По результатам исследований опубликовано 3 рецензируемых монографий и получено 2 патента РФ на изобретение, а также 9 свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ. Научные результаты апробированы на 15 научно-технических конференциях международного и национального уровня. По результатам работы подготовлено 3 диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук. Результаты исследований внедрены на предприятиях ПАО «Северсталь», АО «Уральская Сталь», АО «Первоуральский новотрубный завод», ОАО «Уральский трубный завод», ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ПАО «Гайский ГОК» и АО «Учалинский ГОК» с получением экономического эффекта по каждому направлению.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>8</b>
<b>1. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА И МОЩНОСТИ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ВРЕМЕННЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ.....</b>	<b>10</b>
1.1. Разработка усовершенствованной методики расчета уставок электрических параметров ДСП.....	11
1.2. Разработка усовершенствованной методики расчета уставок электрических параметров УСП.....	19
1.2.1 Критерии выбора оптимального несимметричного режима при различных режимах продувки.....	21
1.3. Разработка усовершенствованных способов и алгоритмов управления режимами работы газокислородных горелок и кислородных фурм, используемых в ДСП.....	27
1.3.1 Анализ существующих алгоритмов управления РСВ-горелками и инжекторами углерода в мощных дуговых сталеплавильных печах.....	27
1.3.2. Разработка усовершенствованного алгоритма управления РСВ-горелками и инжекторами УСП ДСП-1 (95 МВА).....	33
1.4. Разработка усовершенствованных способов и алгоритмов управления инжекторами углерода для создания слоя вспененного шлака.....	35
1.4.1. Краткий обзор современных подходов к диагностике уровня вспененного шлака в ДСП. Анализ недостатков системы управления инжекторами УСП на примере системы ARCOS.....	36
1.5. Разработка усовершенствованных способов и алгоритмов управления электрическими и технологическими режимами УСП.....	48

1.5.1. Результаты экспериментальных исследований поведения поверхности жидкого металла и шлака при различных режимах аргонной продувки. ....	49
1.5.2. Разработка усовершенствованных алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых, обеспечивающих автоматическую адаптацию электрических режимов УКП1,2 в зависимости от режима аргонной продувки и шлакового режима. ....	56
1.6. Результаты промышленных испытаний усовершенствованных автоматизированных систем управления электрическими и технологическими режимами ДСП и УКП на действующих металлургических предприятиях.....	61
1.6.1 Оценка эффективности разработанной усовершенствованной системы управления электрическим режимом по коэффициенту шлака на примере двухпозиционной УКП.....	61
1.6.2 Оценка эффективности разработанной усовершенствованной системы управления инжекторами УСМ на примере ДСП-1.....	64
1.6.3 Оценка эффективности применения разработанной методики расчета оптимальных уставок параметра регулирования на примере ШП-125. Разработка методики оценки изменения удельного расхода электроэнергии и электродов. ...	67
<b>2. РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕГЛАМЕНТИРОВАННОГО ПАРАМЕТРА ШЕРОХОВАТОСТИ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ФРИКЦИОННЫМИ УСЛОВИЯМИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ. ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПЫТАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>80</b>

2.1. Разработка математической модели процесса и режимов формирования параметров шероховатости поверхностей узлов трения металлургических механизмов.....	80
2.1.1 Разработка математической модели процесса и режимов формирования параметров шероховатости поверхностей узлов трения металлургических механизмов методом нанесения покрытий гибким инструментом – брашинг .....	80
2.1.2 Разработка математической модели процесса и режимов формирования параметров шероховатости поверхностей узлов трения металлургических механизмов методом создания адсорбционного монослоя .....	86
2.1.3 Разработка математической модели процесса и режимов формирования параметров шероховатости поверхностей узлов трения металлургических механизмов методом выглаживания поверхности с использованием ультразвуковой финишной обработки.....	91
2.2. Исследование процессов формирования микрорельефа контактирующих поверхностей при различных видах обработки поверхности. Исследование различных технологических операций для формирования заданного микрорельефа поверхности.....	97
2.2.1. Процесс формирования микрорельефа контактирующих поверхностей при обработке методом фрикционного плакирования .....	97
2.2.2. Процесс формирования микрорельефа контактирующих поверхностей при ультразвуковой обработке .....	115
2.2.3. Процесс формирования микрорельефа контактирующих поверхностей при обработке выглаживанием с применением смазочного материала.....	126
2.3. Разработка оборудования и технологии нанесения покрытий, формирования и управления регламентированного параметра шероховатости контактирующих поверхностей тяжело нагруженных узлов трения с улучшенными фрикционными условиями функционирования.....	131

2.3.1 Оборудование нанесения покрытий методом фрикционного плакирования .....	132
2.3.2 Технология нанесения покрытий методом фрикционного плакирования...	134
2.4. Результаты промышленных испытаний усовершенствованных технологии нанесения покрытий, формирования и управления регламентированного параметра шероховатости контактирующих поверхностей тяжело нагруженных узлов трения металлургических механизмов .....	145
2.4.1 Испытание покрытий, нанесенных на резьбовые соединения труб нефтегазового сортамента.....	145
2.4.2 Испытание покрытий, нанесенных на поверхности лезвий ножей сортовых станов 170, 370 и 450.....	171
2.4.3 Испытание покрытий, нанесенных на поверхности лупперов сортовых станов 170, 370 и 450.....	173
<b>3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ОБЛАСТИ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В ПОТОКЕ.....</b>	<b>175</b>
3.1 Испытания разработанных систем элементного анализа в потоке на горно-обогатительных предприятиях, перерабатывающих руды цветных металлов .....	175
3.2 Апробация разработанных технических и программных решений в условиях предприятий черной металлургии.....	187
<b>ВЫВОДЫ ПО ЭТАПУ .....</b>	<b>239</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>243</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....</b>	<b>259</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....</b>	<b>265</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....</b>	<b>280</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с планом реализации научного проекта государственного задания №FRZU-2020-0011 на 2021 год в рамках 3 этапа работы были продолжены теоретические и экспериментальные научные исследования, направленные на повышение эффективности эксплуатации промышленных комплексов горно-металлургической отрасли с целью устойчивого развития отечественной продукции, а также поддержания её конкурентоспособности по сравнению с зарубежными аналогами. Исследования проводились в рамках трех основных направлений, связанных между собой общими целями и задачами.

Первое направление связано с разработкой 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.

Целью второго направления является 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.

Основная задача третьего направления - разработка методов непрерывного контроля физических свойств и элементного состава сыпучего материала в потоке на основе рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) 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 3 этапа работы можно выделить следующие задачи:

- 1) разработка новой методики расчета уставок электрических параметров ДСП и УКП;
- 2) разработка усовершенствованных способов и алгоритмов управления режимами работы газокислородных горелок и кислородных фурм, обеспечивающих



повышение эффективности работы дуговых печей и снижение расхода энергоносителей;

3) разработка усовершенствованных способов и алгоритмов управления инжекторами углерода ДСП, обеспечивающих повышение эффективности экранирования и теплового КПД дуг на конечной стадии плавки при работе дуг на жидкую ванну;

4) разработка новых способов управления режимом обработки расплава в УСП;

5) проведение исследования видов технологических операций, позволяющих сформировать покрытия на рабочих поверхностях тяжело нагруженных узлов трения с заданным микрорельефом поверхности. Разработка режимов нанесения данных покрытий, а также формирование рекомендации по выбору применяемых материалов в процессе их создания;

6) разработка математической модели формирования высотного параметра шероховатости, на основе которой разрабатывается программное обеспечение, позволяющее рассчитать технологические параметры, улучшающие эксплуатационные свойства сформированных покрытий;

7) разработка оборудования и технологии по нанесению покрытий на контактирующие поверхности тяжело нагруженных узлов трения, улучшающих условия фрикционного взаимодействия;

8) разработка производственно-аналитического комплекса для определения химического состава движущейся на ленте конвейера железорудной смеси в режиме реального времени;

9) анализ эффективности применения установки для экспресс-определения элементного состава методом поточного РФА.

Выполнение данных задач позволит обеспечить достижение основной и заключительной цели комплексного трехлетнего исследования в рамках научного проекта № FZRU-2020-0011, а именно разработку и внедрение в действующее производство алгоритмов энергоэффективного управления электротехническими и технологическими комплексами горно-металлургического производства, что в свою очередь будет являться значительным вкладом в развитие отечественной тяжелой промышленности.

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

В настоящее время дуговые сталеплавильные печи (ДСП) и установки ковш-печь (УКП) получили широкое распространение на металлургических предприятиях России и стран зарубежья. Это обусловлено высокими технико-экономическими показателями работы данного рода установок. За последние годы в современной научно-технической литературе выделилось отдельное направление, целью которого является снижение эксплуатационных издержек сталеплавильных комплексов на базе ДСП и УКП. Причиной этого является высокая энергоёмкость данного типа производств, и как следствие высокая доля затрат на потребление электрической энергии в составе себестоимости конечного продукта.

Ввиду того, что ДСП и УКП являются сложными техническими объектами, подходы к повышению энергоэффективности работы печей также различны. Несмотря на большое количество научных работ в рамках данного направления, конкретные методики, применение которых позволит добиться повышения энергоэффективности работы печи, описаны недостаточно подробно. Разработка и описание обозначенных методик является актуальной задачей, поскольку практически на любом производственном объекте изначальная настройка, выполненная поставщиком технологического оборудования, теряет свою оптимальность в силу множества факторов. В числе таких факторов можно выделить замену оборудования в рамках планового ремонта, изменение состава металлошихты, технологических профилей плавки и т.д.

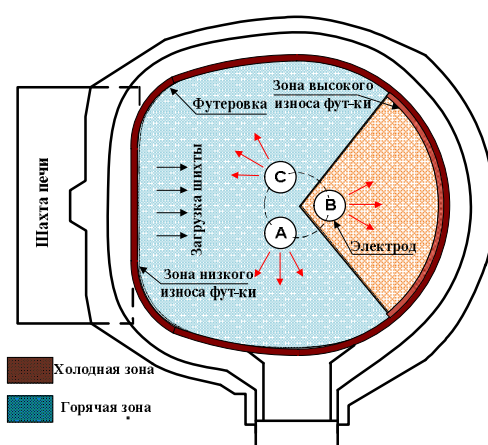
В рамках данного раздела, речь пойдёт о повышении энергоэффективности работы ДСП и УКП за счет внедрения усовершенствованных методик расчета установок электрических параметров, а также внедрения оптимальных алгоритмов управления комбинированными РСВ-горелками и инжекторами углеродосодержащего материала (УСМ).

## 1.1. Разработка усовершенствованной методики расчета уставок электрических параметров ДСП

Рассмотрим основные этапы, которые необходимо реализовать на производственном объекте для оптимизации электрического режима горения дуг на примере ДСП шахтного типа ШП-125 (ПАО «Северсталь», г. Череповец). Для наглядности, на рис.1.1 представлены общий вид, а также схема устройства ванны печи дуговой сталеплавильной печи шахтного типа с указанием зоны повышенного износа огнеупорной футеровки вследствие влияния теплового излучения электрических дуг.



а)



б)

Рис.1.1. а) общий вид дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125 (ПАО «Северсталь», г. Череповец); б) схема устройства ванны печи ШП-125 с указанием зоны повышенного износа огнеупорной футеровки вследствие влияния теплового излучения электрических дуг.

В первую очередь, необходимо произвести расчет параметров схемы замещения электрического контура печи. Несмотря на то, что данные параметры зачастую отражены в эксплуатационных документах, повторный расчёт является необходимым вследствие высокой вероятности несоответствия. Причиной несоответствия может быть изначальное применение недостаточно точной методики расчёта. Кроме того, значения параметров могут меняться после замены оборудования в рамках плановых ремонтов и в силу факторов износа.

Отметим, что для дальнейшего определения оптимального электрического режима горения дуг необходимо произвести пофазный расчет таких параметров, как приведённое активное и индуктивное сопротивление питающей сети  $R'_S$  и  $L'_S$ , приведённое активное и индуктивное сопротивление обмотки печного трансформатора  $R'_{TP}$  и  $L'_{TP}$ , приведённое активное и индуктивное сопротивление обмотки реактора  $R'_P$  и  $L'_P$  (при наличии), активное и индуктивное сопротивления участка короткой сети  $R_{КС}$  и  $L_{КС}$ , а также коэффициенты взаимной индуктивности между фазами  $M_{12}$ ,  $M_{23}$  и  $M_{13}$ .

Практика показала, что наиболее предпочтительной методикой для определения параметров схемы замещения электрического контура является методика, основанная на проведении экспериментов двухфазных и трёхфазного коротких замыканий с полным погружением электродов в жидкий расплав.

Для дальнейшей работы в рамках методики, описание которой приводится в данном исследовании, была разработана специальная математическая модель, структурная схема которой представлена на рис.1.2. В основе данной математической модели лежит классический подход к моделированию электрической дуги с помощью дифференциального уравнения мгновенной проводимости дуги (уравнения Касси). Отличительной особенностью данной модели является наличие упрощенного регулятора активного сопротивления электрической дуги  $R_d$ .

Выбор данного параметра регулирования обусловлен его применением на ШП-125 в составе системы автоматического управления электрическим режимом AgCOS NT. Для иных систем, модель может быть адаптирована, в зависимости от применяемого параметра. Использование упрощённого регулятора позволяет исключить влияние динамических характеристик системы управления гидроприводом перемещения электродов, в учёте которых нет необходимости, поскольку все расчеты будут производиться в статическом режиме. В результате, время на выполнение расчета в значительной мере сократится.

С учётом того, что параметры схемы замещения известны по данным расчёта с использованием результатов экспериментов двухфазных и трёхфазного коротких замыканий, приведённая математическая модель может быть исполь-

зована для расчёта основных электрических и технологических характеристик печи при заданном сочетании уставок сопротивления электрической дуги  $R_{ЗАД1}$ ,  $R_{ЗАД2}$ ,  $R_{ЗАД3}$  с целью выбора наиболее оптимального сочетания.

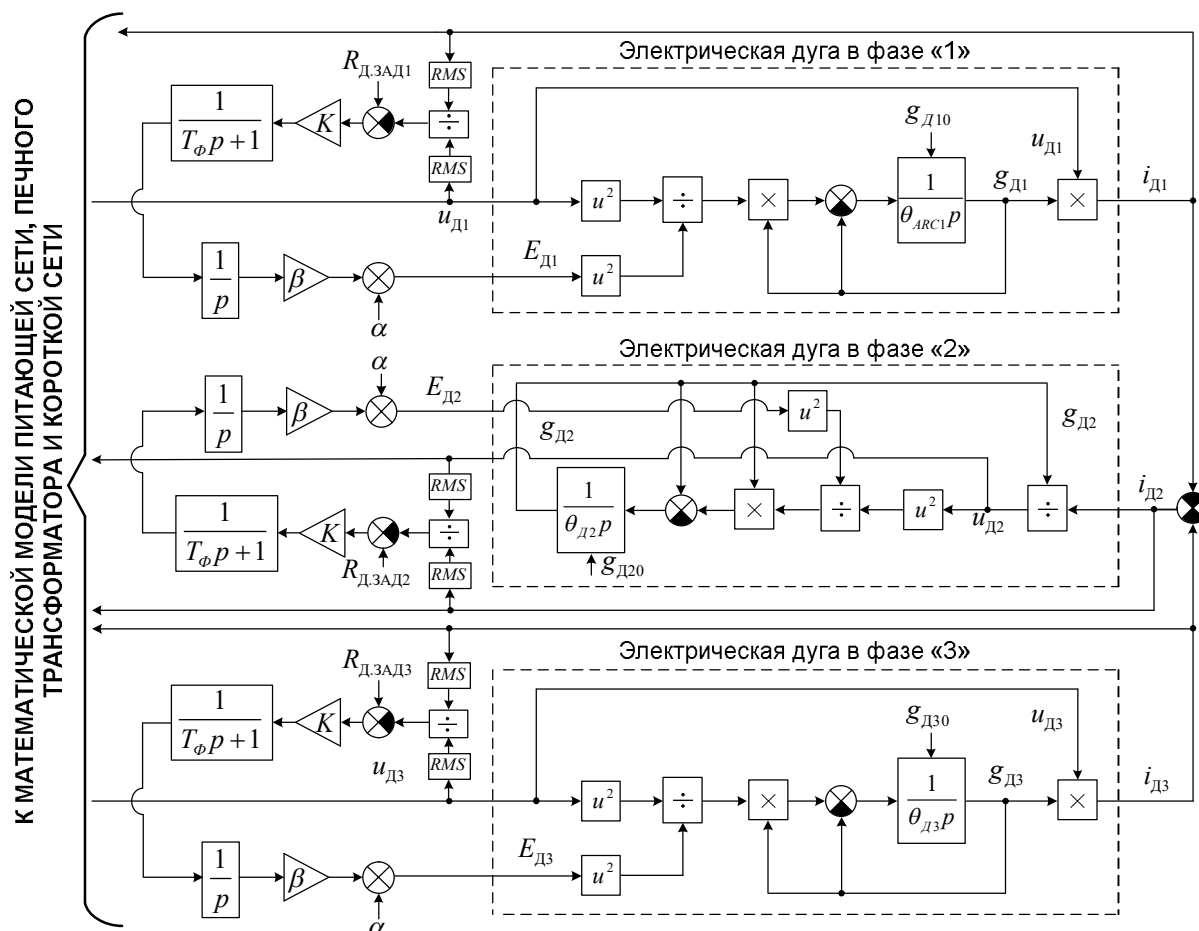


Рис.1.2. Структурная схема математической модели электрического контура дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125 с упрощённым регулятором сопротивления электрической дуги ( $u_{Д1,2,3}$  – мгновенное значение напряжения электрической дуги в фазах «1», «2», «3»;  $i_{Д1,2,3}$  – мгновенное значение тока электрической дуги в фазах «1», «2», «3»;  $\theta_{АД1,2,3}$  – тепловая постоянная времени электрической дуги в фазах «1», «2», «3»;  $g_{Д1,2,3}$  – мгновенное значение проводимости электрической дуги в фазах «1», «2», «3»;  $g_{Д1,2,30}$  – начальное значение мгновенной проводимости электрической дуги в фазах «1», «2», «3»;  $E_{Д1,2,3}$  – противо-ЭДС дугового столба в фазах «1», «2», «3»;  $R_{Д,ЗАД123}$  – уставка сопротивления электрической дуги в фазах «1», «2», «3»;  $K$  – коэффициент усиления пропорционального регулятора;  $T_F$  – постоянная времени фильтра;  $\beta$  – градиент напряжения дугового столба;  $\alpha$  – падение напряжения в приэлектродных областях)

Но перед этим необходимо выполнить проверку модели на адекватность в рамках отдельно взятой технологической стадии в следующей последовательности:

1) Для модели определяется величина тепловой постоянной времени дуги  $\theta_D$  в соответствии с анализируемым интервалом плавки (для начальных стадий – 500 мкс, для стадии активного расплавления – 2000 мкс, для стадии доводки – 3500 мкс);

2) ступенчато увеличивается величина против-ЭДС дугового столба при разомкнутом контуре регулирования сопротивления дуги для построения зависимости действующего значения мощности дуги от действующего значения тока дуги  $P_D=f(I_D)$ . Все промежуточные расчёты для определения действующих значений тока и мощности дуги производятся по известным формулам на основе доступных в модели мгновенных значений токов дуг и напряжений дуг;

3) При замкнутом регуляторе сопротивления дуги на входе модели формируется набор уставок  $R_{D,3AD1,2,3}$ , соответствующий реальному профилю плавки. Определяются параметры  $P_D$  и  $I_D$  для моделируемой рабочей точки;

4) на построенную характеристику  $P_D=f(I_D)$  с моделируемой рабочей точкой производится наложение экспериментального массива рабочих точек, полученного в процессе плавки. Выполняется проверка попадания моделируемой рабочей точки в доверительный интервал для действующей величины суммарной мощности и среднего значения действующего тока дуги экспериментального массива в соответствии со следующими выражениями:

$$\bar{P}_{D\Sigma.CP} - z_\alpha \frac{\sigma_P}{\sqrt{n}} < \mu_P < \bar{P}_{D\Sigma.CP} + z_\alpha \frac{\sigma_P}{\sqrt{n}}, \quad (1.1)$$

$$\bar{I}_{D.CP} - z_\alpha \frac{\sigma_I}{\sqrt{n}} < \mu_I < \bar{I}_{D.CP} + z_\alpha \frac{\sigma_I}{\sqrt{n}}, \quad (1.2)$$

где  $\bar{P}_{D\Sigma.CP}, \bar{I}_{D.CP}$  - несмещённая оценка математического ожидания экспериментального массива по суммарной активной мощности и среднему току;  $Z_\alpha$  – критическое значение стандартного нормального распределения (для уровня значимости  $\alpha=0.05$  составляет 1.96);  $n$  – объём выборки;  $\mu_P, \mu_I$  – математическое ожидание экспериментального массива по суммарной активной мощности и

среднему току. В случае, если проверка пройдена, модель может считаться адекватной. Если не пройдена – необходимо вернуться к первому шагу, изменить величину тепловой постоянной времени дуги  $\theta_D$  и провести повторную проверку. В качестве примера, на рис.1.3 приведены характеристики  $P_D=f(I_D)$ , полученные в процессе проверки адекватности для двух различных технологических стадий плавки ШП-125.

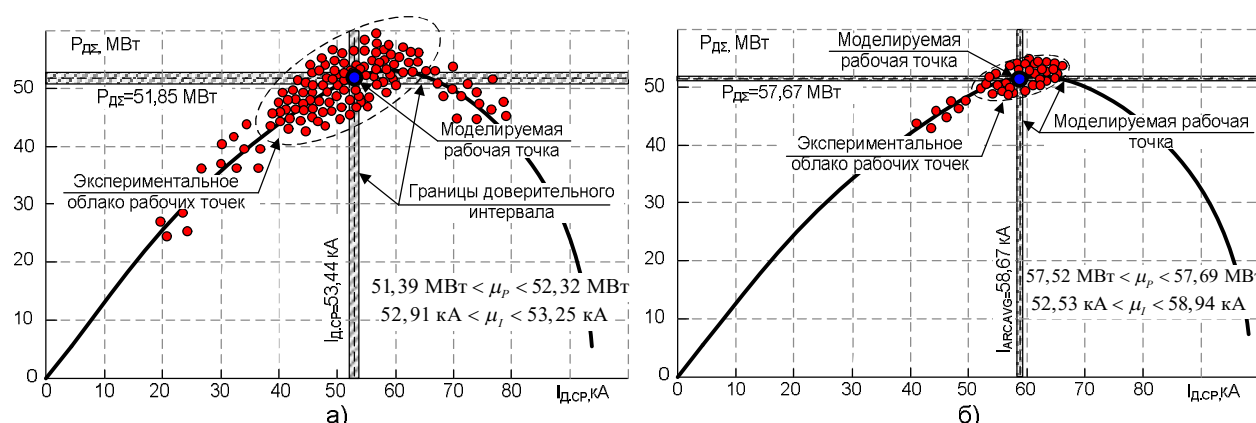


Рис.1.3. Характеристика  $P_{D\Sigma}(I_{D,CP})$  с рабочей точкой, полученная на математической модели, с нанесением фактической области распределения рабочих точек и доверительных интервалов для: а)  $N_{TP}=9$  и  $N_{PK}=5$  на начальной стадии плавания; б)  $N_{TP}=8$  и  $N_{PK}=4$  на конечной стадии плавления шихты

Рассмотрим основные показатели, которые будут применяться в ходе дальнейшего анализа, такие как:

- 1) коэффициент теплового излучения дуг КИ, определяемый по формуле:

$$КИ = P_D \cdot U_D \text{ [МВт} \cdot \text{В]}, \quad (1.3)$$

где  $P_D$  – действующее значение мощности электрической дуги,  $U_D$  – действующее значение напряжения дуги.

- 2) Коэффициент интенсивности нагрева КИН, определяемый по формуле:

$$КИН = P_D \cdot I_D \text{ [МВт} \cdot \text{кА]}, \quad (1.4)$$

где  $I_D$  – действующее значение тока электрической дуги.

- 3) Коэффициенты несимметрии по току дуги, мощности дуги, КИ, КИН ( $\delta I_D$ ,  $\delta P_D$ ,  $\delta КИ$ ,  $\delta КИН$ ):

$$\delta I_D = \frac{I_{D,МАКС} - I_{D,МИН}}{I_{D,МАКС}} 100\%, \quad (1.5)$$

$$\delta P_{\text{д}} = \frac{P_{\text{д.МАКС}} - P_{\text{д.МИН}}}{P_{\text{д.МАКС}}} 100\% , \quad (1.6)$$

$$\delta KI = \frac{KI_{\text{МАКС}} - KI_{\text{МИН}}}{KTI_{\text{МАКС}}} 100\% , \quad (1.7)$$

$$\delta KIH = \frac{KIH_{\text{МАКС}} - KIH_{\text{МИН}}}{KIH_{\text{МАКС}}} 100\% , \quad (1.8)$$

где  $I_{\text{д.МАКС}}$ ,  $I_{\text{д.МИН}}$ ,  $P_{\text{д.МАКС}}$ ,  $P_{\text{д.МИН}}$ ,  $KI_{\text{МАКС}}$ ,  $KI_{\text{МИН}}$ ,  $KIH_{\text{МАКС}}$ ,  $KIH_{\text{МИН}}$  – максимальные и минимальные значения токов и мощностей дуг, а также коэффициентов теплового излучения дуг и интенсивности нагрева в трех анализируемых фазах.

Для расчёта оптимальных значений уставок сопротивления электрической дуги  $R_{\text{д.Зад1,2,3}}$  необходимо сформулировать критерии оптимальности. На начальной стадии плавки является целесообразным увеличение суммарной мощности электрических дуг  $P_{\text{д.Σ}}$  за счёт сокращения теплового излучения фазы «2» в горячей зоне печи (см. рис.1.1), что также окажет благотворное влияние на износостойкость огнеупорной футеровки. При этом среднее по фазам значение токов дуг должно остаться без существенных изменений. Таким образом, система критериев для начальной стадии плавки будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} KI_{2\text{НОВ}} \leq KI_{2\text{ИСХ}} \\ A_{11} I_{\text{д.ср.ИСХ}} \leq I_{\text{д.ср.НОВ}} \leq A_{12} I_{\text{д.ср.ИСХ}} , \\ P_{\text{д.Σ.НОВ}} \geq P_{\text{д.Σ.ИСХ}} \end{cases} , \quad (1.9)$$

Где  $KI_{2\text{ИСХ}}$ ,  $KI_{2\text{НОВ}}$  - исходное и новое значение величины теплового излучения в фазе «2»;  $I_{\text{д.ср.ИСХ}}$ ,  $I_{\text{д.ср.НОВ}}$  – исходное и новое среднее значение тока дуги по трём фазам;  $P_{\text{д.Σ.ИСХ}}$ ,  $P_{\text{д.Σ.НОВ}}$  - исходное и новое значение суммарной мощности дуг по трём фазам;  $A_{11}$ ,  $A_{12}$  – адаптивные коэффициенты.

На стадии активного расплавления завалок и подвалок оптимизация электрического режима возможна за счет выравнивания тепловых излучений фаз «1» и «3» для равномерного расплавления и последующего схода металлошихты из шахты в холодную зону печи при увеличении суммарной мощности дуг, а также сохранении излучения фазы «2» без значительного увеличения среднего тока фаз 1-3. Соответствующая система критериев будет иметь вид:



$$\begin{cases} KI_{2HOB} \leq KI_{2ИСХ} \\ I_{Д.СР.НОВ} \leq A_2 I_{Д.СР.ИСХ} \\ P_{Д.Σ.НОВ} \geq P_{Д.Σ.ИСХ} \\ \delta KI_{HOB} \leq \delta KI_{ИСХ} \end{cases}, \quad (1.10)$$

где  $\delta KI_{ИСХ}$ ,  $\delta KI_{HOB}$  - исходное и новое значение коэффициента несимметрии по коэффициенту теплового излучения;  $A_2$  – адаптивный коэффициент.

На стадии доводки жидкого металла целесообразным является выравнивание коэффициентов интенсивности нагрева в трёх фазах с увеличением  $KIH_{\Sigma}$  при условии сохранения величины теплового излучения дуги фазы «2» без существенного роста среднего тока дуг. В этом случае, система критериев будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} I_{Д.СР.НОВ} \leq A_3 I_{Д.СР.ИСХ} \\ KIH_{\Sigma.НОВ} \geq KIH_{\Sigma.ИСХ} \\ \delta KIH_{HOB} \leq \delta KIH_{ИСХ} \\ KIH_{2HOB} \leq KIH_{2ИСХ} \end{cases}, \quad (1.11)$$

где  $KIH_{\Sigma.НОВ}$ ,  $KIH_{\Sigma.ИСХ}$  - исходное и новое значение суммарного по трём фазам коэффициента интенсивности нагрева;  $\delta KIH_{HOB}$ ,  $\delta KIH_{ИСХ}$  - исходное и новое значение коэффициента несимметрии по коэффициенту интенсивности нагрева;  $KIH_{2ИСХ}$ ,  $KIH_{2HOB}$  - исходное и новое значение коэффициента интенсивности нагрева в фазе «2»;  $A_3$  - адаптивный коэффициент.

Таким образом, с учётом обозначенных критериев, может быть реализован следующий алгоритм определения оптимальных значений ставок параметров регулирования  $R_{Д.ЗАД1,2,3}$ :

- Моделируется электрический режим с исходным значением уставок параметра регулирования  $R_{Д.ЗАД1,2,3}$ . Фиксируются исходные параметры в соответствии с формулами (1.3) - (1.8).

- Выполняется моделирование для всех возможных сочетаний уставок параметров регулирования с коэффициентами  $K1$ ,  $K2$  и  $K3$ . Величины данных коэффициентов обычно задаются в диапазоне от 0,85 до 1,10 с шагом 0,05. Результаты, удовлетворяющие одной из систем критериев (1.9) - (1.11), в зависимости от стадии, фиксируются для дальнейшего анализа.

- Полученные в результате шага 2 варианты новых сочетаний уставок  $R_{д.з.а.д.1,2,3}$  анализируются с целью выявления наилучшего сочетания из возможных. Результаты закладываются в состав нового, оптимизированного профиля плавки.

Последовательность шагов 1-3 повторяется для всех рабочих сочетаний ступеней печного трансформатора, реактора (при наличии) и номера рабочей кривой.

Пример результатов, получаемых в процессе работы обозначенного алгоритма для начальной, основной и конечной стадий плавки продемонстрированы с помощью таблиц 1.1-1.3. Наиболее оптимальный режим выделен в таблице зелёным цветом.

Таблица 1.1

Результаты работы алгоритма для начальной стадии плавки (при  $N_{ТР} = 6$  и  $N_{РК} = 4$ )

Баланс. коэф-т			Заданное зн-е сопр-я дуги, мОм			Ток дуги, кА				Мощность дуги, МВт				КИ, МВт·В				КИН, МВт·кА				Коэффициенты несимметрии, %			
$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R_{з.а.д.1}$	$R_{з.а.д.2}$	$R_{з.а.д.3}$	$I_{д1}$	$I_{д2}$	$I_{д3}$	$I_{д.ср.}$	$P_{д1}$	$P_{д2}$	$P_{д3}$	$P_{д.ср.}$	$KI_1$	$KI_2$	$KI_3$	$KI_{ср.}$	$KIN_1$	$KIN_2$	$KIN_3$	$KIN_{ср.}$	$\delta I_{МАКС}$	$\delta P_{МАКС}$	$\delta KI$	$\delta KIN$
<b>Исходный электрический режим</b>																									
1,00	1,00	1,00	6,50	6,40	6,70	50,4	48,9	48,5	<b>49,3</b>	16,5	15,5	15,4	<b>47,4</b>	5398	<b>4917</b>	4918	15233	831	757	749	2338	3,7	6,3	8,9	9,8
<b>Новый электрический режим</b>																									
1,10	0,95	0,95	7,15	6,08	6,37	48,6	50,4	48,9	49,3	16,9	15,7	14,9	47,4	5865	4866	4523	15254	821	788	726	2335	3,5	12,0	22,9	11,5
1,10	0,90	0,95	7,15	5,76	6,37	49,1	51,5	48,9	49,8	17,2	15,5	14,9	47,6	6028	4670	4526	15224	844	798	727	2368	5,1	13,5	24,9	13,9
1,10	0,85	1,00	7,15	5,44	6,70	49,5	52,1	47,7	49,7	17,5	15,0	14,9	47,4	6194	4323	4664	15180	867	781	711	2359	8,5	14,9	30,2	18,0
1,05	0,95	0,95	6,83	6,08	6,37	49,7	50,4	49,2	49,8	16,9	15,7	15,1	47,6	5723	4874	4629	15226	839	790	743	2372	2,3	10,5	19,1	11,4
1,05	0,90	1,00	6,83	5,76	6,70	50,1	51,0	48,0	49,7	17,1	15,2	15,1	47,5	5857	4539	4774	15171	859	776	728	2362	5,8	11,6	22,5	15,3
1,05	0,85	1,00	6,83	5,44	6,70	50,6	52,1	48,0	50,2	17,5	15,0	15,1	47,6	6034	4329	4763	15126	885	783	726	2393	7,9	14,1	28,3	18,0
1,00	0,95	1,00	6,50	6,08	6,70	50,8	49,9	48,5	49,7	16,8	15,4	15,4	47,6	5540	4740	4905	15184	853	768	747	2368	4,6	8,3	14,4	12,4
1,00	0,90	1,05	6,50	5,76	7,04	51,2	50,5	47,3	49,7	17,0	15,0	15,4	47,4	5669	4423	5031	15123	873	756	729	2358	7,7	12,2	22,0	16,4
1,00	0,90	1,00	6,50	5,76	6,70	51,3	51,0	48,4	<b>50,2</b>	17,1	15,2	15,4	<b>47,7</b>	5694	<b>4546</b>	4889	15129	877	777	745	2398	5,6	10,9	20,2	15,0
1,00	0,85	1,05	6,50	5,44	7,04	51,7	51,7	47,2	50,2	17,4	14,8	15,4	47,5	5840	4225	5012	15078	899	764	727	2389	8,7	15,0	27,6	19,2
0,95	0,95	1,05	6,18	6,08	7,04	51,9	49,5	47,7	49,7	16,6	15,1	15,7	47,5	5333	4621	5179	15133	864	749	751	2364	8,1	9,1	13,4	13,4
0,95	0,90	1,05	6,18	5,76	7,04	52,4	50,6	47,7	50,2	17,0	15,0	15,7	47,6	5486	4437	5161	15084	889	758	748	2395	9,0	11,6	19,1	15,8
0,95	0,85	1,10	6,18	5,44	7,37	52,9	51,4	46,5	50,2	17,2	14,6	15,7	47,5	5622	4145	5271	15039	911	749	729	2389	11,9	15,4	26,3	20,0
0,90	1,00	1,05	5,85	6,40	7,04	52,7	48,5	48,2	49,8	16,2	15,3	16,0	47,5	4993	4801	5333	15127	854	740	773	2367	8,4	5,9	10,0	13,4
0,90	0,90	1,10	5,85	5,76	7,37	53,6	50,3	47,0	50,3	16,8	14,8	16,0	47,5	5249	4355	5432	15036	898	744	751	2393	12,2	11,7	19,8	17,1

Таблица 1.2

Результаты работы алгоритма для начальной стадии плавки (при  $N_{ТР} = 10$  и  $N_{РК} = 5$ )

Баланс. коэф-т			Заданное зн-е сопр-я дуги, мОм			Ток дуги, кА				Мощность дуги, МВт				КИ, МВт·В				КИН, МВт·кА				Коэффициенты несимметрии, %			
$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R_{з.а.д.1}$	$R_{з.а.д.2}$	$R_{з.а.д.3}$	$I_{д1}$	$I_{д2}$	$I_{д3}$	$I_{д.ср.}$	$P_{д1}$	$P_{д2}$	$P_{д3}$	$P_{д.ср.}$	$KI_1$	$KI_2$	$KI_3$	$KI_{ср.}$	$KIN_1$	$KIN_2$	$KIN_3$	$KIN_{ср.}$	$\delta I_{МАКС}$	$\delta P_{МАКС}$	$\delta KI$	$\delta KIN$
<b>Исходный электрический режим</b>																									
1,00	1,00	1,00	8,40	7,80	8,80	48,7	48,3	46,2	<b>47,7</b>	19,9	18,4	18,5	<b>56,8</b>	8152	<b>7001</b>	7402	<b>22556</b>	971	887	855	2712	5,2	7,8	<b>14,1</b>	12,0
<b>Новый электрический режим</b>																									
1,00	1,00	1,00	8,40	7,80	8,80	48,7	48,3	46,2	47,7	19,9	18,4	18,5	56,8	8152	7001	7402	22556	971	887	855	2712	5,2	7,8	14,1	12,0
0,95	1,00	1,00	7,98	7,80	8,80	49,9	48,4	46,6	<b>48,3</b>	19,9	18,5	18,8	<b>57,1</b>	7913	<b>7045</b>	7590	<b>22549</b>	992	893	876	2761	6,7	7,1	<b>11,0</b>	11,7
0,90	1,00	1,05	7,56	7,80	9,24	51,0	48,1	45,8	48,3	19,7	18,2	19,1	57,0	7582	6925	7952	22459	1003	877	874	2754	10,3	7,2	12,9	12,9
0,90	1,00	1,00	7,56	7,80	8,80	51,2	48,5	47,0	48,9	19,8	18,5	19,1	57,5	7644	7088	7796	22528	1012	898	900	2810	8,1	6,3	9,1	11,2
0,85	1,05	1,05	7,14	8,19	9,24	51,8	47,1	46,2	48,4	19,1	18,4	19,4	56,9	7070	7173	8169	22412	991	866	897	2754	10,8	5,4	13,5	12,6
0,85	1,00	1,05	7,14	7,80	9,24	52,3	48,2	46,2	48,9	19,5	18,3	19,4	57,3	7280	6972	8175	22427	1020	883	898	2802	11,6	6,0	14,7	13,4

Таблица 1.3

Результаты работы алгоритма для конечной стадии плавки (при  $N_{TP} = 8$  и  $N_{PK} = 5$ )

Баланс. коэф-т			Заданное зн-е сопр-я дуги, мОм			Ток дуги, кА				Мощность дуги, МВт				КИ, МВт·В				КИН, МВт·кА				Коэффициенты несимметрии, %				
$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R_{Зад1}$	$R_{Зад2}$	$R_{Зад3}$	$I_{д1}$	$I_{д2}$	$I_{д3}$	$I_{д.ср.}$	$P_{д1}$	$P_{д2}$	$P_{д3}$	$P_{д.ср.}$	$KI_1$	$KI_2$	$KI_3$	$KI_{ср.}$	$KIN_1$	$KIN_2$	$KIN_3$	$KIN_{ср.}$	$\delta I_{МАКС}$	$\delta P_{МАКС}$	$\delta KI$	$\delta KIN$	
<b>Исходный электрический режим</b>																										
1,00	1,00	1,00	5,56	5,54	5,70	60,0	57,7	58,3	<b>58,7</b>	20,0	18,7	18,9	<b>57,7</b>	6668	6090	6143	18901	1200	1081	1104	<b>3385</b>	3,8	6,3	8,7	<b>9,9</b>	
<b>Новый электрический режим</b>																										
1,00	0,99	0,99	5,56	5,49	5,64	60,1	58,0	58,5	<b>58,9</b>	20,1	18,8	18,9	<b>57,7</b>	6707	6071	6082	18860	1207	1088	1105	<b>3400</b>	3,5	6,5	9,5	<b>9,9</b>	

## 1.2. Разработка усовершенствованной методики расчета уставок электрических параметров УКП

В ходе предыдущего этапа исследований была выявлена практическая проблема для двухпозиционной УКП, связанная с негативным влиянием режимов аргонной продувки на энергетическую эффективность работы сталеплавильного комплекса. Суть данной проблемы заключалась в том, что при высокой интенсивности продувки расплава в районе нестабильной зоны, где под давлением газа возникает бурун, имеют место частые закорачивания электрических дуг. В процессе исследования было установлено, что при укорачивании электрической дуги вплоть до критического значения  $L_{ДУГИ.КРИТИКАЛ}$  в совокупности с интенсивной продувкой сохраняется эффект по повышению стабильности горения дуги и уменьшения дисперсии тока дуги. Данное явление легло в основу принципиально новой методики формирования электрического режима работы печи, которая позволила укорачивать дуги в фазах, ближайших к нестабильной зоне, при сохранении постоянных суммарных энергетических параметров по всем трём фазам. В качестве основного параметра, который определял стабильность горения дуг, стал коэффициент шлака  $K_{ШЛАК}$ .

С учётом полученных результатов, был разработан специальный алгоритм, который осуществляет переключение между номерами рабочих кривых  $N_{OC}=1,2,3$  ( $N_{OC}=1$  – режим работы на длинных дугах при слабой интенсивности продувки,  $N_{OC}=2$  – режим работы на средних дугах при средней интенсивности продувки,  $N_{OC}=3$  – режим работы на длинных дугах при высокой интенсивности продувки) в зависимости от текущего значения величины  $K_{ШЛАК}$ . Таким образом, закономерным этапом развития данной работы является разработка методики, которая позволяет выбрать оптимальные значения уставок параметров регулирования для обеспечения различных режимов горения дуг.

Отметим, что весь необходимый математический аппарат для расчёта значений уставок параметров регулирования был разработан в исследовании [1.1]. Так, описанная в данной работе математическая модель электрического контура шахтной печи ШП-125 с упрощённым регулятором может быть использована также и для УКП, поскольку в её основе лежат одинаковые для обоих агрегатов физические принципы [1.2-1.4]. Кроме того, достаточно подробно сама методика определения уставок параметра регулирования.

Основной проблемой, которая возникает на пути применения данной методики для формирования набора рабочих кривых, является отсутствие критериев оптимальности. Очевидно, что набор критериев будет отличаться в зависимости от конфигурации печной установки в части расположения продувочных пробок и аварийной фурмы. В связи с этим, разработка методики выбора оптимальных несимметричных режимов горения дуг в установках ковш-печь при различных режимах аргонной продувки для УКП различной конфигурации является актуальной задачей. Рассмотрим данный вопрос более подробно.

Наиболее распространённые в промышленности варианты УКП можно классифицировать по конструктивному признаку следующим образом:

– Однопозиционные УКП (преимущественно в электроплавильных цехах с ДСП):

- С одной продувочной пробкой;
- С двумя продувочными пробками, расположенными с одной стороны;
- С двумя продувочными пробками, расположенными по диагонали;

– Двухпозиционные УКП (преимущественно в цехах с кислородными конвертерами):

- С двумя продувочными пробками, расположенными с одной стороны;
- С двумя продувочными пробками, расположенными по диагонали;

Для наглядности, на рис.1.4 представлены схемы каждой из обозначенных разновидностей УКП. Очевидно, что расположение продувочной пробки оказывает существенное влияние на критерии, которые позволяют сформировать оптимальный электрический режим при различной интенсивности продувки. Соответственно, возникает необходимость в разработке универсального критерия оптимизации для каждого варианта с учётом степени влияния зеркала жидкого металла

на каждую фазу. Отметим, что подход к формированию критериев в данном случае будет аналогичен исследованию [1.1], но применительно к УКП.

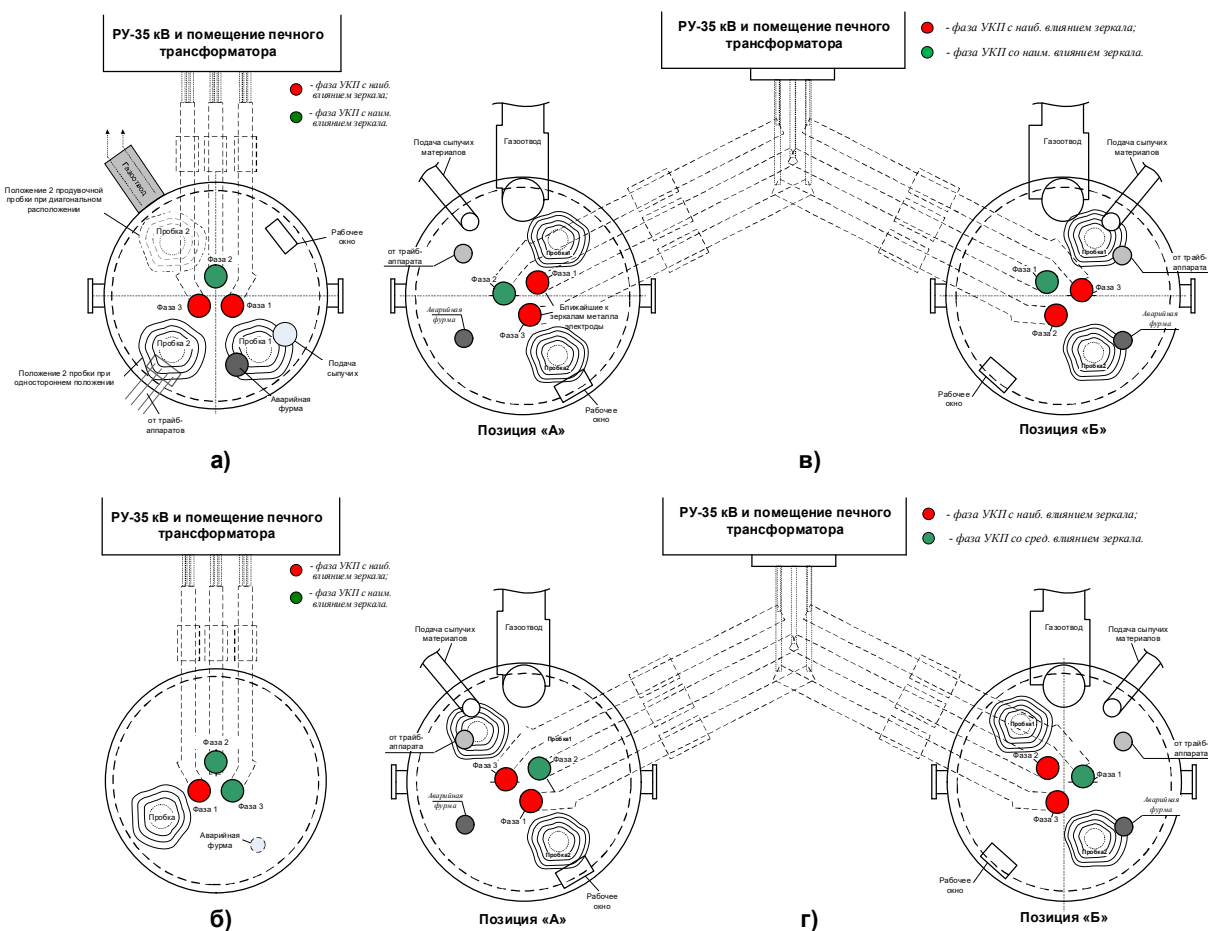


Рис. 1.4 Схемы основных наиболее распространённых конструктивных исполнений УКП: а) однопозиционный УКП с односторонним (диагональным) расположением продувочных пробок; б) однопозиционный УКП с одной продувочной пробкой; в) двухпозиционный УКП с односторонним расположением продувочных пробок; г) двухпозиционный УКП с диагональным расположением продувочных пробок.

### 1.2.1 Критерии выбора оптимального несимметричного режима при различных режимах продувки

В ходе 2 этапа работы было установлено, что при укорачивании электрической дуги вплоть до критического значения  $L_{ДУГИ.СКРИТИКАЛ}$  в совокупности с интенсивной продувкой сохраняется эффект по повышению стабильности горения дуги и уменьшения дисперсии тока дуги, что наглядно продемонстрировано на рис. 1.5.

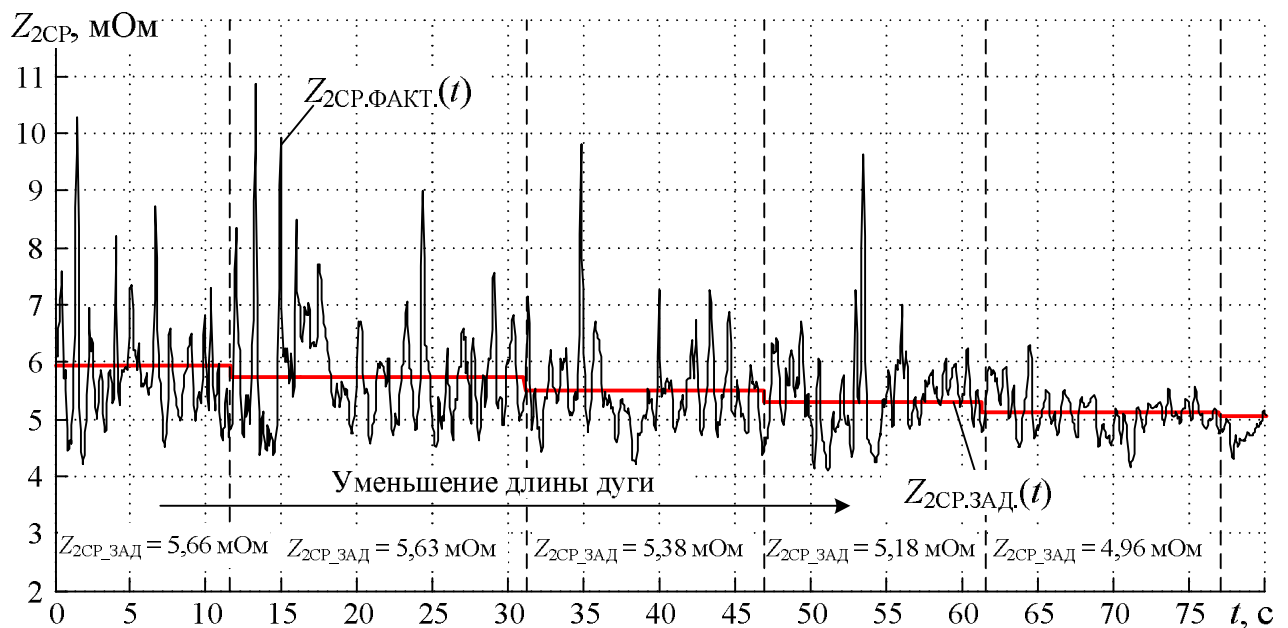


Рис. 1.5. Экспериментальное исследование качества регулирования импеданса УКП при изменении длины электрической дуги

Рассмотрим основные показатели, которые будут применяться в ходе дальнейшего анализа:

1) коэффициент теплового излучения дуг  $KИ$ , определяемый по формуле:

$$KИ = P_{дуги} \cdot U_{дуги} \text{ [МВт} \cdot \text{В]}, \quad (1.12)$$

где  $P_{дуги}$  – действующее значение мощности электрической дуги,  $U_{дуги}$  – действующее значение напряжения дуги.

2) коэффициент интенсивности нагрева  $KИН$ , определяемый по формуле:

$$KИН = P_{дуги} \cdot I_{дуги} \text{ [МВт} \cdot \text{кА]}, \quad (1.13)$$

где  $I_{дуги}$  – действующее значение тока электрической дуги.

Основными критериями при определении балансовых коэффициентов и уставок импеданса являлись: 1) дополнительное уменьшение коэффициентов излучений дуг фаз находящихся под влиянием зеркал жидкого металла создаваемых работой продувочных блоков в днище стальной ванны или работой аварийной фурмы; 2) сохранение среднего по фазам действующего значения тока при фиксированной средней уставке импеданса фаз 1-3; 3) сохранение суммарных значений мощности электрических дуг и коэффициента интенсивности нагрева жидкой стали ( $KИН$ ); 4) достижение меньшего значения суммарного коэффициента излучений дуг  $KИ$  по всем трем фазам. Так в результате проведенных исследований были экспериментально установлены

оптимальные балансовые коэффициенты: для длинных дуг  $Kб = 1$ ; для средних дуг  $Kб = 0,975$ ; для коротких дуг  $Kб = 0,94$ .

Для режима коротких дуг целесообразным является увеличение суммарных по трем фазам коэффициентов интенсивности нагрева и уменьшение коэффициентов теплового излучения дуг наряду с достижением минимального коэффициента теплового излучения в фазах находящихся под воздействием зеркала жидкого металла. Однако при этом важно, чтобы ток укорачиваемых дуг не превышал значения максимального допустимого вторичного тока для данной ступени РПН печного трансформатора, а средние значения вторичного тока по трем фазам остались без изменения и не превышали значения номинального вторичного тока для данной ступени РПН печного трансформатора. Таким образом, наряду с укорачиванием дуг фаз, расположенных вблизи зеркал жидкого металла, необходимо увеличивать длину дуг фаз, находящихся на удалении от продувочных блоков и не находящихся под влиянием зеркал жидкого металла, на такую величину, чтобы суммарные значения энергетических параметров по всем трем фазам оставались без изменений. Также важным условием является не превышение длины дуги по отношению к высоте шлака в фазах с удлиненными дугами, что наряду с условием минимизации коэффициента излучения фаз находящихся под действием зеркал жидкого металла ввиду их слабого экранирования дуги положительно сказывается на стойкости футеровки стальной. Системы критериев для режима работы с короткими дугами и конфигурациями с одним и двумя продувочными блоками печи отражены в выражениях (1.14) и (1.15), где (1.14) для конфигурации с одним продувочным блоком и поскольку двухпозиционные установки ковш-печь имеют также два продувочных блока, как и возможная конфигурация однопозиционной установки то выражение (1.15) будет справедливым для всех конфигураций с двумя продувочными блоками:

$$\left\{ \begin{array}{l} K\bar{b}_{КОР\_1} = 0.94 \& K\bar{b}_{ДЛ\_2} = 1.03 \& K\bar{b}_{ДЛ\_3} = 1.03 \\ I_{ДУГИ.КОР\_1} \leq \lambda \cdot I_{2НОМ} \& I_{ДУГИ.СР} \leq I_{2НОМ} \\ KИИ_{\Sigma НОВ} \geq KИИ_{\Sigma ИСХ} \\ KИ_{\Sigma НОВ} \leq KИ_{\Sigma ИСХ} \& KИ_{КОР\_1} \rightarrow \min \\ l_{ДУГИ.ДЛ\_2,3} \leq h_{ШЛАК} \end{array} \right. , \quad (1.14)$$

где  $K\bar{b}_{КОР\_1}$ ,  $K\bar{b}_{ДЛ\_2}$ ,  $K\bar{b}_{ДЛ\_3}$  – балансовые коэффициенты фазы, находящейся в зоне действия зеркала жидкого металла и фаз находящихся на удалении от зеркала жидкого металла;  $I_{ДУГИ.КОР\_1}$  — значение тока дуги в укорачиваемых фазах;  $\lambda$  — перегрузочная способность печного трансформатора;  $I_{2НОМ}$  — значение номинального вторичного тока печного трансформатора для настраиваемой ступени РПН;  $I_{ДУГИ.СР}$  – среднее значение тока дуги по трём фазам;  $KИ_{\Sigma ИСХ}$ ,  $KИ_{\Sigma НОВ}$  - исходное и новое значение суммарного по трём фазам коэффициента теплового излучения;  $KИИ_{КОР\_1}$  – коэффициент теплового излучения фазы с короткой дугой;  $KИИ_{\Sigma НОВ}$ ,  $KИИ_{\Sigma ИСХ}$  - исходное и новое значение суммарного по трём фазам коэффициента интенсивности нагрева;  $l_{ДУГИ.ДЛ\_2,3}$  – длина дуг в фазах с удлиненными дугами;  $h_{ШЛАК}$  – высота шлака на поверхности жидкого металла.

$$\left\{ \begin{array}{l} K\bar{b}_{КОР\_1(2)} = 0.94 \& K\bar{b}_{КОР\_3} = 0.94 \& K\bar{b}_{ДЛ\_2(1)} = 1.12 \\ I_{ДУГИ.КОР\_1(2)} \leq \lambda \cdot I_{2НОМ} \& I_{ДУГИ.КОР\_3} \leq \lambda \cdot I_{2НОМ} \& I_{ДУГИ.СР} \leq I_{2НОМ} \\ KИИ_{\Sigma НОВ} \geq KИИ_{\Sigma ИСХ} \\ KИ_{\Sigma НОВ} \leq KИ_{\Sigma ИСХ} \& KИ_{КОР\_1(2)} \rightarrow \min \& KИ_{КОР\_3} \rightarrow \min \\ l_{ДУГИ.ДЛ\_2(1)} \leq h_{ШЛАК} \end{array} \right. , \quad (1.15)$$

где  $K\bar{b}_{КОР\_1(2)}$ ,  $K\bar{b}_{КОР\_3}$ ,  $K\bar{b}_{ДЛ\_2(1)}$  – балансовые коэффициенты двух фаз, находящихся в зоне действия зеркал жидкого металла и фазы на удалении от зеркала жидкого металла;  $I_{ДУГИ.КОР\_1(2)}$ ,  $I_{ДУГИ.КОР\_3}$  — значение тока дуги в укорачиваемых фазах;  $\lambda$  — перегрузочная способность печного трансформатора;  $I_{2НОМ}$  — значение номинального вторичного тока печного трансформатора для настраиваемой ступени РПН;  $I_{ДУГИ.СР}$  – среднее значение тока дуги по трём фазам;  $KИ_{\Sigma ИСХ}$ ,  $KИ_{\Sigma НОВ}$  - исходное и новое значение суммарного по трём фазам коэффициента теплового излучения;  $KИ_{КОР\_1(2)}$ ,  $KИ_{КОР\_3}$  – коэффициент теплового излучения фаз с короткой дугой;  $KИИ_{\Sigma НОВ}$ ,  $KИИ_{\Sigma ИСХ}$  - исходное и новое значение суммарного по трём фазам коэффициента интенсивно-



сти нагрева;  $l_{\text{ДУГИ.ДЛ}_2(1)}$  – длина дуги в фазе с удлиненной дугой;  $h_{\text{ШЛАК}}$  – высота шлака на поверхности жидкого металла.

Для режима работы с длинными дугами является целесообразным расширение диапазона регулирования тока дуги и симметричный режим работы дуг. В результате проведенных исследований установлено, что достаточным диапазоном регулирования получается при среднем токе дуги по трем фазам равным 80% от среднего тока по трем фазам в режиме горения коротких дуг на данной ступени РПН печного трансформатора. Поскольку для режима работы с длинными дугами не вводится асимметрия длин дуг фаз находящихся под воздействием зеркал жидкого металла то система критериев для различных конфигураций установок ковш-печь будет иметь один вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} K\bar{b}_{1,2,3} = 1 \\ I_{\text{ДУГИ.СР}} = 0.8 \cdot I_{\text{ДУГИ.СР.КОР\_ДУГИ}} \\ KИИ_{\Sigma\text{НОВ}} \geq KИИ_{\Sigma\text{ИСХ}} \\ KИ_{\Sigma\text{НОВ}} \leq KИ_{\Sigma\text{ИСХ}} \\ l_{\text{ДУГИ.ДЛ}_{1,2,3}} \leq h_{\text{ШЛАК}} \end{array} \right. , \quad (1.16)$$

где  $K\bar{b}_{1,2,3}$  – балансовые коэффициенты фаз;  $I_{\text{ДУГИ.СР}}$  – среднее значение тока дуги по трём фазам;  $I_{\text{ДУГИ.СР.КОР\_ДУГИ}}$  – среднее значение тока дуг по трём фазам в режиме работы с короткими дугами;  $KИ_{\Sigma\text{ИСХ}}$ ,  $KИ_{\Sigma\text{НОВ}}$  - исходное и новое значение суммарного по трём фазам коэффициента теплового излучения;  $KИИ_{\Sigma\text{НОВ}}$ ,  $KИИ_{\Sigma\text{ИСХ}}$  - исходное и новое значение суммарного по трём фазам коэффициента интенсивности нагрева;  $l_{\text{ДУГИ.ДЛ}_{1,2,3}}$  – длина дуг;  $h_{\text{ШЛАК}}$  – высота шлака на поверхности жидкого металла.

Для режима работы средних дуг значение среднего тока по трем фазам принимается равным среднему значению между режимом коротких и длинных дуг на данной ступени РПН печного трансформатора. Система критериев для режима работы со средними дугами и конфигурациями с одним и двумя продувочными блоками печи отражены в (1.17) и (1.18), где (1.17) для конфигурации с одним продувочным блоком, (1.18) для конфигураций с двумя продувочными блоками:

$$\left\{ \begin{array}{l} K\bar{b}_{КОР\_1} = 0.975 \& K\bar{b}_{ДЛ\_2} = 1.0125 \& K\bar{b}_{ДЛ\_3} = 1.0125 \\ I_{ДУГИ.СР} = \frac{I_{ДУГИ.СР.КОР\_ДУГИ} + I_{ДУГИ.СР.ДЛ\_ДУГИ}}{2} \\ KИИ_{\Sigma НОВ} \geq KИИ_{\Sigma ИСХ} \\ KИ_{\Sigma НОВ} \leq KИ_{\Sigma ИСХ} \& KИ_{КОР\_1} \rightarrow \min \\ l_{ДУГИ.ДЛ\_2,3} \leq h_{ШЛАК} \end{array} \right. , \quad (1.17)$$

где  $K\bar{b}_{КОР\_1}$ ,  $K\bar{b}_{ДЛ\_2}$ ,  $K\bar{b}_{ДЛ\_3}$  – балансовые коэффициенты фазы, находящейся в зоне действия зеркала жидкого металла и фаз находящихся на удалении от зеркала жидкого металла;  $I_{ДУГИ.СР}$  – среднее значение тока дуги по трём фазам;  $I_{ДУГИ.СР.КОР\_ДУГИ}$  – среднее значение тока дуги по трём фазам для режима работы с короткими дугами;  $I_{ДУГИ.СР.ДЛ\_ДУГИ}$  – среднее значение тока дуги по трём фазам для режима работы с длинными дугами;  $KИ_{\Sigma ИСХ}$ ,  $KИ_{\Sigma НОВ}$  – исходное и новое значение суммарного по трём фазам коэффициента теплового излучения;  $KИ_{КОР\_1}$  – коэффициент теплового излучения фазы с короткой дугой;  $KИИ_{\Sigma НОВ}$ ,  $KИИ_{\Sigma ИСХ}$  – исходное и новое значение суммарного по трём фазам коэффициента интенсивности нагрева;  $l_{ДУГИ.ДЛ\_2,3}$  – длина дуг фаз с удлиненной дугой;  $h_{ШЛАК}$  – высота шлака на поверхности жидкого металла.

$$\left\{ \begin{array}{l} K\bar{b}_{КОР\_1(2)} = 0.975 \& K\bar{b}_{КОР\_3} = 0.975 \& K\bar{b}_{ДЛ\_2(1)} = 1.05 \\ I_{ДУГИ.СР} = \frac{I_{ДУГИ.СР.КОР\_ДУГИ} + I_{ДУГИ.СР.ДЛ\_ДУГИ}}{2} \\ KИИ_{\Sigma НОВ} \geq KИИ_{\Sigma ИСХ} \\ KИ_{\Sigma НОВ} \leq KИ_{\Sigma ИСХ} \& KИ_{КОР\_1(2)} \rightarrow \min \& KИ_{КОР\_3} \rightarrow \min \\ l_{ДУГИ.ДЛ\_2(1)} \leq h_{ШЛАК} \end{array} \right. , \quad (1.1.18)$$

где  $K\bar{b}_{КОР\_1(2)}$ ,  $K\bar{b}_{КОР\_3}$ ,  $K\bar{b}_{ДЛ\_2(1)}$  – балансовые коэффициенты двух фаз, находящихся в зоне действия зеркал жидкого металла и фазы на удалении от зеркала жидкого металла;  $I_{ДУГИ.СР}$  – среднее значение тока дуги по трём фазам;  $I_{ДУГИ.СР.КОР\_ДУГИ}$  – среднее значение тока дуги по трём фазам для режима работы с короткими дугами;  $I_{ДУГИ.СР.ДЛ\_ДУГИ}$  – среднее значение тока дуги по трём фазам для режима работы с длинными дугами;  $KИ_{\Sigma ИСХ}$ ,  $KИ_{\Sigma НОВ}$  – исходное и новое значение суммарного по трём фазам коэффициента теплового излучения;  $KИ_{КОР\_1(2)}$ ,  $KИ_{КОР\_3}$  – коэффициент теплового излучения фаз с короткой дугой;  $KИИ_{\Sigma НОВ}$ ,  $KИИ_{\Sigma ИСХ}$  – исходное и новое значение суммарного по трём фазам ко-

эффициента интенсивности нагрева;  $l_{\text{ДУГИ.ДЛ}_2(l)}$  – длина дуги фазы с удлинённой дугой;  $h_{\text{ШЛАК}}$  – высота шлака на поверхности жидкого металла.

Таким образом, с учётом обозначенных критериев, может быть реализован следующий алгоритм определения оптимальных значений ставок параметров регулирования  $Z_{\text{ЗДЛ},2,3}$ :

1) моделируется электрический режим с исходным значением уставок параметра регулирования  $R_{\text{ДУГИ.ЗДЛ},2,3}$ . Фиксируются исходные параметры [1.2-1.4, 1.5-1.8].

2) выполняется моделирование для всех возможных сочетаний уставок параметров регулирования. Результаты, удовлетворяющие одной из систем критериев (1.3) - (1.7), в зависимости от номера рабочей кривой, фиксируются для дальнейшего анализа.

3) полученные в результате шага 2 варианты новых сочетаний уставок  $Z_{\text{ЗДЛ},2,3}$  анализируются с целью выявления наилучшего сочетания из возможных. Результаты закладываются в состав нового, оптимизированного профиля плавки.

4) последовательность шагов 1-3 повторяется для всех рабочих сочетаний ступеней печного трансформатора, реактора (при наличии) и номера рабочей кривой.

### **1.3. Разработка усовершенствованных способов и алгоритмов управления режимами работы газокислородных горелок и кислородных фурм, используемых в ДСП**

#### ***1.3.1 Анализ существующих алгоритмов управления РСВ-горелками и инжекторами углерода в мощных дуговых сталеплавильных печах***

Несмотря на то, что вопрос повышения энергоэффективности ДСП с применением различных подходов освещён весьма обширно, в открытых источниках представлено незначительное количество работ, направленных на повышение энергоэффективности путём модернизации алгоритмов управления газокислородным оборудованием ДСП, таким как комбинированные РСВ-горелки, а также инжекторы углеродосодержащего материала. Для дальнейшего понимания отметим, что комбинированные РСВ-горелки могут работать в двух основных режимах: го-

релки и фурмы. При переводе RCB в режим горелки обеспечивается ускорение процесса расплавления шихты в зонах печной ванны с низкой интенсивностью воздействия теплового излучения электрической дуги. В режиме фурмы осуществляется подача кислорода для обеспечения операции обезуглероживания стали на стадии доводки. Отметим, что структура профиля работы RCB-горелок в подавляющем большинстве современных систем управления ДСП и УКП унифицирована и может быть представлена в виде таблицы 1.4. Фотографии профилей, применяемых фирмами Simens VAI (Primetals) и Danieli, полученные непосредственно на производственных объектах, приведены на рис.1.6 и 1.7. В свою очередь, инжекторы углеродосодержащего материала предназначены для вдувания углеродосодержащего материала мелкой фракции и интенсификации процесса образования вспененного шлака для обеспечения экранирования электрических дуг на поздних стадиях плавления шихты с целью увеличения их теплового КПД.

Таблица 1.4.

Унифицированная структура профиля работы RCB-горелки

Бадья 1				Бадья 2				Бадья 3			
W <sub>уд</sub> , КВтч/т	Q <sub>O2_гл</sub> , м <sup>3</sup> /ч	Q <sub>O2_вт</sub> , м <sup>3</sup> /ч	Q <sub>CH4</sub> , м <sup>3</sup> /ч	W <sub>уд</sub> , КВтч/т	Q <sub>O2_гл</sub> , м <sup>3</sup> /ч	Q <sub>O2_вт</sub> , м <sup>3</sup> /ч	Q <sub>CH4</sub> , м <sup>3</sup> /ч	W <sub>уд</sub> , КВтч/т	Q <sub>O2_гл</sub> , м <sup>3</sup> /ч	Q <sub>O2_вт</sub> , м <sup>3</sup> /ч	Q <sub>CH4</sub> , м <sup>3</sup> /ч
W <sub>уд1.1</sub>	Q <sub>O2_гл1.1</sub>	Q <sub>O2_вт1.1</sub>	Q <sub>CH41.1</sub>	W <sub>уд2.1</sub>	Q <sub>O2_гл2.1</sub>	Q <sub>O2_вт2.1</sub>	Q <sub>CH42.1</sub>	W <sub>уд1.1</sub>	Q <sub>O2_гл1.1</sub>	Q <sub>O2_вт1.1</sub>	Q <sub>CH41.1</sub>
W <sub>уд1.2</sub>	Q <sub>O2_гл1.2</sub>	Q <sub>O2_вт1.2</sub>	Q <sub>CH41.2</sub>	W <sub>уд2.2</sub>	Q <sub>O2_гл2.2</sub>	Q <sub>O2_вт2.2</sub>	Q <sub>CH42.2</sub>	W <sub>уд1.2</sub>	Q <sub>O2_гл1.2</sub>	Q <sub>O2_вт1.2</sub>	Q <sub>CH41.2</sub>
W <sub>уд1.3</sub>	Q <sub>O2_гл1.3</sub>	Q <sub>O2_вт1.3</sub>	Q <sub>CH41.3</sub>	W <sub>уд2.3</sub>	Q <sub>O2_гл2.3</sub>	Q <sub>O2_вт2.3</sub>	Q <sub>CH42.3</sub>	W <sub>уд1.3</sub>	Q <sub>O2_гл1.3</sub>	Q <sub>O2_вт1.3</sub>	Q <sub>CH41.3</sub>
W <sub>уд1.4</sub>	Q <sub>O2_гл1.4</sub>	Q <sub>O2_вт1.4</sub>	Q <sub>CH41.4</sub>	W <sub>уд2.4</sub>	Q <sub>O2_гл2.4</sub>	Q <sub>O2_вт2.4</sub>	Q <sub>CH42.4</sub>	W <sub>уд1.4</sub>	Q <sub>O2_гл1.4</sub>	Q <sub>O2_вт1.4</sub>	Q <sub>CH41.4</sub>

Шаг		Бадья 1				Бадья 2				Бадья 3				Бадья 4			
1	Газ (Нм <sup>3</sup> /ч)	1>2	Нижн	200	1>2	Нижн	200	1>2	Нижн	200	1>2	Нижн	200	1>2	Нижн	200	
	Отнош-е	7,0	Верхн	2,1	7,0	Верхн	2,1	7,0	Верхн	2,1	7,0	Верхн	2,1	7,0	Верхн	2,1	
2	Газ (Нм <sup>3</sup> /ч)	2>3	Нижн	400	2>3	Нижн	400	2>3	Нижн	400	2>3	Нижн	400	2>3	Нижн	400	
	Отнош-е	80,0	Верхн	2,1	80,0	Верхн	2,1	80,0	Верхн	2,1	80,0	Верхн	2,1	80,0	Верхн	2,1	
3	Газ (Нм <sup>3</sup> /ч)	3>4	Нижн		3>4	Нижн		3>4	Нижн		3>4	Нижн		3>4	Нижн		
	Отнош-е	90,0	Верхн		90,0	Верхн		90,0	Верхн		90,0	Верхн		90,0	Верхн		
4	Газ (Нм <sup>3</sup> /ч)	4>5	Нижн		4>5	Нижн		4>5	Нижн		4>5	Нижн		4>5	Нижн		
	Отнош-е	999,0	Верхн		999,0	Верхн		999,0	Верхн		999,0	Верхн		999,0	Верхн		

Рис.1.6. Структура профиля работы RCB-горелок ф. Siemens

Danieli Алгоритмическая система	Профиль плавки										ЭНЕРГО	Рефинирование
	Ф. шаг 1	Ф. шаг 2	Ф. шаг 3	Ф. шаг 4	Ф. шаг 5	Ф. шаг 6	Ф. шаг 7	Ф. шаг 8	Ф. шаг 9	Ф. шаг 10		
Положение электродов, мм	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Время под током, сек	120	60	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Процент эл. энергии для бады (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25000
Эл. энергия для бады, кВт*час	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Вес каждой ванны, кг	0	0	0	85000	85000	108000	129000	145000	155000	165000	0	0
Ступень	10	11	12	13	14	14	14	14	14	14	13	13
Кривая тока	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
Чувствительность электродов	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Удельная электродоустойчивость, кВт*час/тонна	270	280	290	310	330	340	350	360	360	370	370	0
1-я горелка (расход природного газа), м3/час	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
1-я кислородная форсунка, м3/час	0	1800	2000	2000	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1700
1-я горелка (расход кислорода), м3/час	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
2-я горелка (расход природного газа), м3/час	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
2-я кислородная форсунка, м3/час	1800	1800	2000	2000	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	2000
2-я горелка (расход кислорода), м3/час	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
3-я горелка (расход природного газа), м3/час	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
3-я кислородная форсунка, м3/час	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000
3-я горелка (расход кислорода), м3/час	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
2-я угловая форсунка, л/мин	20	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20
4-я горелка (расход природного газа), м3/час	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
4-я кислородная форсунка, м3/час	0	0	0	0	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	0
4-я горелка (расход кислорода), м3/час	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
3-я угловая форсунка, л/мин	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20
Подана кислород в через 1-ю угловую форсунку, м3/час	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1-я угловая форсунка, л/мин	0	0	0	0	15	20	20	20	20	20	20	20
Процент открытий клапана газоахлеста, %	28	28	28	28	30	30	30	30	30	30	30	30
Давление [ММ-СО2]	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-6
Расход извести, кг	5500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Скорость отдачи извести, л/мин	200	200	150	150	150	150	150	200	250	250	250	0
Расход МАГМел, кг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	700
Скорость отдачи МАГМел, л/мин	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	350
Расход УМВК, кг	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Скорость отдачи УМВК, л/мин	55	55	55	55	55	55	55	55	0	0	0	75

Рис.1.7. Структура профиля работы РСВ-горелок ф. Danieli

Таким образом, вопрос модернизации алгоритмов работы РСВ-горелок и инжекторов углеродосодержащего материала (УСМ) является актуальной задачей, которая заслуживает рассмотрения в рамках отдельного исследования. В качестве объекта исследования, в данной работе выбрана гибкая модульная печь ДСП-1 (рис.1.8,1.9) с 4 РСВ-горелками и 2 инжекторами УСМ на одном из металлургических заводов России.



Рис. 1.8. Исследуемая модульная ДСП-1 (ГМП-1) 120 т. 95 МВА, функционирующая на одном из отечественных металлургических заводов

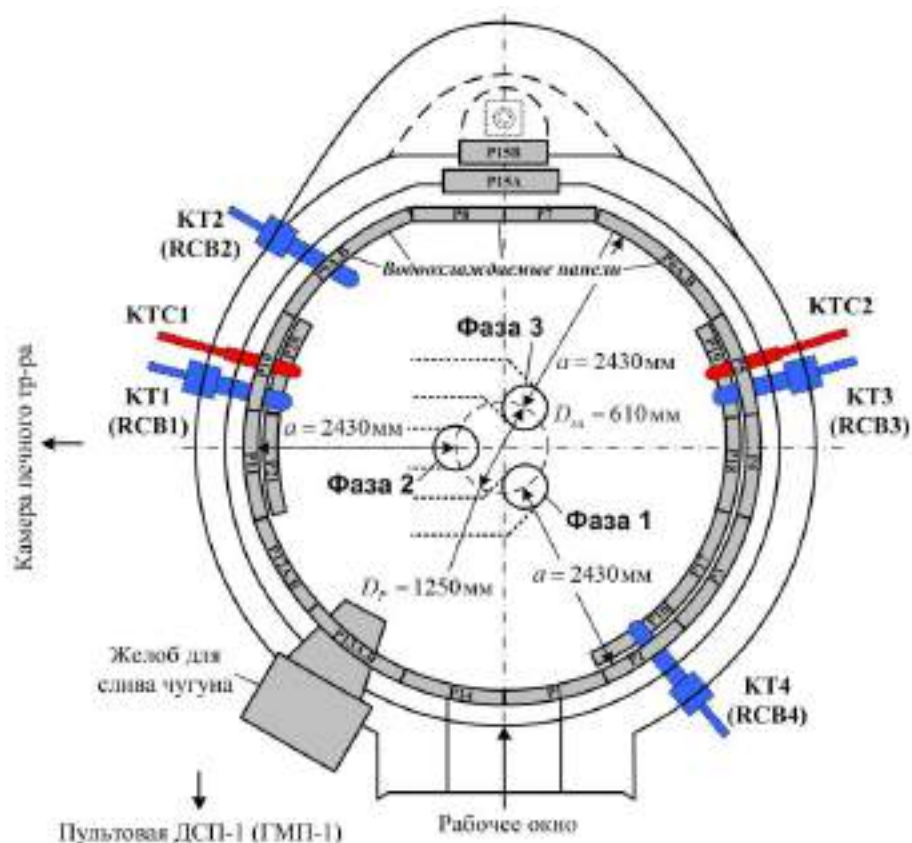


Рис. 1.9. Чертеж ДСП-1 (ГМП-1) с указанием расположения электродов фаз 1-3, комбинированных фурм-горелок (КТ, RCB), инжекторов углерода (КТС) и водоохлаждаемых панелей (P1-P21)

Необходимо отметить, что исследуемый электросталеплавильный агрегат может функционировать в двух основных режимах: 1) классическом режиме электроплавки с использованием твердой металлошихты (металлический лом, горячебрикетированное железо (ГБЖ), чушковый чугун, различные отходы металлургических цехов) и постепенной подачи жидкого чугуна массой до 80 тонн по мере процесса расплавления; 2) режиме кислородного конвертора (режим гибкой модульной печи (ГМП) ) с максимальной долей жидкого чугуна (до 95%). В рамках данной статьи, будет рассмотрен первый и основной режим, в соответствии с которым протекает около 90% от общего числа плавов. Для наглядности, основные технические показатели работы ДСП-1 сведены в таблице 1.5. Основные показатели расхода кислорода (в главном и вторичном контуре) и природного газа RCB-горелок в различных режимах работы приведены в таблице 1.6. Величина расхода УСМ, вдуваемого через один инжектор, в данном случае всегда постоянна и составляет 40 кг/мин.

Таблица 1.5

## Основные технические показатели работы ДСП-1

Основные усреднённые статистические показатели работы печной установки							
Время работы под током $t_{рт}$ , мин.	Время цикла плавки $t_{ц}$ , мин.	Время цикла плавки $t_{ц}$ , мин.	Уд. расход электроэнергии на жидкую сталь $W_{уд}$ , кВт·ч/т	Абсолют. и уд. вес жидкого чугуна $G_{чуг.абс.}$ т и $G_{чуг.уд}$ кг/т	Уд. расход лома, скрапов и др. материалов в завалке и подвалке $G_{лом.уд}$ , кг/т	Уд. расход металлошхты (лом и чугун) $G_{шхт.уд}$ , кг/т	Уд. расход УСМ $m_{усм.уд}$ кг/т
27,24	74,74	47,50	226,53	64,19 574,55	611,39	1180,3	3,97
Уд. расход ГБЖ $G_{гбж.уд}$ , кг/т	Уд. расход кислор. $Q_{O_2.уд}$ , м <sup>3</sup> /т	Уд. расход газа $Q_{газ.уд}$ , м <sup>3</sup> /т	Относительное число плавок с подвалкой $N_{плав}$ , %	Суточная производительность ДСП-1 $PP_{сут}$ , т/сут и кол-во плавок в сутках $n_{плав}$ .	Вес жидкой стали на выпуске $G_{мет}$ , т	Температура жидкой стали на выпуске $T_{вып.}$ , °С	Уд. расход электродов (с учетом / без учета потерь при поломках) УРЭ, кг/т
56,47	64,47	6,28	6,28	2069,5 18,41	112,43	1655,1	1,410 1,400

Таблица 1.6

## Основные параметры работы комбинированных РСВ-горелок

Режим работы комбинированной РСВ-горелки	Горелка №1			Горелка №2			Горелка №3			Горелка №4		
	$Q_{O_2.гл.}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{O_2.вт.}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{сн4}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{O_2.гл.}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{O_2.вт.}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{сн4}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{O_2.гл.}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{O_2.вт.}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{сн4}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{O_2.гл.}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{O_2.вт.}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{сн4}$ , м <sup>3</sup> /ч
Горелка (низкая инт.)	200	100	100	200	100	100	200	100	100	200	100	100
Горелка (средняя инт.)	300	150	200	300	150	200	300	150	200	300	150	200
Горелка (высокая инт.)	550	400	450	550	400	450	550	400	450	550	400	450
Режим фурмы (низкая инт.)	1100	150	150	1100	150	150	1100	150	150	1100	150	150
Режим фурмы (высокая инт.)	3500	150	150	3500	150	150	3500	150	150	3500	150	150

Технологический процесс выплавки стали в классическом режиме осуществляется следующим образом. Изначально, производится поджиг горелок в режиме низкой интенсивности. Печь готовится к плавке. Далее, после завалки металлошихты, начала подачи жидкого чугуна и зажигания дуг горелка переводится в режим высокой интенсивности. Отметим, что режим средней интенсивности на практике используется редко. Его применение зачастую связано с возникновением ситуации частичного или полного перекрытия горелки негабаритным ломом для предотвращения возникновения обратного пламени и повышенного износа огнеупорной футеровки [1.9-1.10]. По мере достижения состояния печной ванны, близкой к полному расплавлению твёрдой шихты, оператор принимает решение о переводе горелки в режим фурмы высокой интенсивности. Режим низкой интенсивности на практике не применяется. Впоследствии, по мере выхода шлака [1.11] через рабочее окно и достижения определённого уровня обезуглероживания расплава, оператор даёт команду на включение инжектора УСМ. Дальнейшее управление инжектором осуществляется сталеваром в ручном режиме с визуальным контролем закрытия дуг через рабочее окно, а также оценкой характера шума от дуг при нагреве жидкой ванны. При этом переключение сочетаний ступени печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой производится по классическому профилю с удельным расходом электроэнергии  $W_{уд}$  в качестве основного критерия.

В целом, применяемая на производстве технология является эффективной и обеспечивает выпуск расплава требуемого качества в заданных объёмах. Но при этом имеет место потенциал для модернизации и внедрения новой, автоматизированной системы управления РСВ-горелками и инжекторами углерода. В нынешних условиях эффективность ручного управления, основанного на наборе эмпирических признаков, в существенной мере зависит от опыта сталевара ДСП. Применение автоматизированной системы [1.12, 1.13] позволит осуществлять управление на основе технических средств диагностики, что в результате обеспечит формирование более оптимального подхода к управлению по сравнению с существующим.



### 1.3.2. Разработка усовершенствованного алгоритма управления РСВ-горелками и инжекторами УСМ ДСП-1 (95 МВА)

Как отмечалось ранее, задачей данного исследования является разработка автоматизированного алгоритма управления РСВ-горелками и инжекторами УСМ. Для этого необходим универсальный показатель, который позволит судить о реальных технологических процессах, протекающих внутри ванны печи. В качестве такого показателя может выступать содержание высших гармоник в составе сигнала тока электрической дуги. Применение подобного подхода достаточно подробно описано в работе [1.14] для решения задачи управления процессом переключения ступеней печного трансформатора, реактора и номеров рабочих кривых. Использование аналогичного подхода для управления РСВ-горелками и инжекторами УСМ ранее в научно-технической литературе не рассматривалась.

В данном случае наиболее удобным и оптимальным параметром для оценки уровня высших гармоник в составе тока дуги является коэффициент шлака, который определяется в соответствии со следующими формулами:

$$K_1 = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2 - I_{(0)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% = \frac{I_{BG}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (1.19)$$

$$K_{ШЛАК} = \frac{A}{K_1} \cdot 100\%, \quad (1.20)$$

где  $K_1$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока дуги (в зарубежной терминологии – Total Harmonic Distortion или  $THD_I$ ),  $I$  – действующее (среднеквадратическое) значение тока;  $I_{(1)}$  – действующее значение тока 1-ой гармоники;  $I_{(0)}$  – постоянная составляющая тока;  $I_{BG}$  – действующее значение высших гармоник,  $A$  – масштабный коэффициент. Отметим, что величина  $K_{ШЛАК}$  может быть рассчитана на основании гармонического состава напряжения дуги, а также только нечётных гармоник. В данном случае, необходимость в этом отсутствует, поскольку речь идёт об управлении горелками и инжекторами, а не диагностики стадии плавки, для которой применение обозначенных показателей имеет ряд преимуществ [1.15-1.17].

Основная идея, которая лежит в основе предлагаемого алгоритма автоматического управления РСВ-горелками и инжекторами УСМ, заключается в следующем. По результатам анализа большого количества плавков был сделан вывод о том, что при достижении состояния печной ванны, близкой к полному расплавлению твёрдой шихты, наблюдается резкий рост  $K_{ШЛАК}$  вследствие активного шлакообразования [1.17-1.19]. Данное событие является критерием для перехода РСВ-горелки из режима горелки в режим фурмы. Далее, по мере снижения содержания углерода в расплаве, а также выхода шлака через рабочее окно, дуги обнажаются, что приводит к резкому снижению величины  $K_{ШЛАК}$ . В этом случае, необходимо включить в работу инжекторы УСМ, а также перевести фурму в режим пониженной интенсивности для обеспечения перемешивания расплава. Блок-схема предлагаемого алгоритма управления представлена на рис.1.10 [1.20].

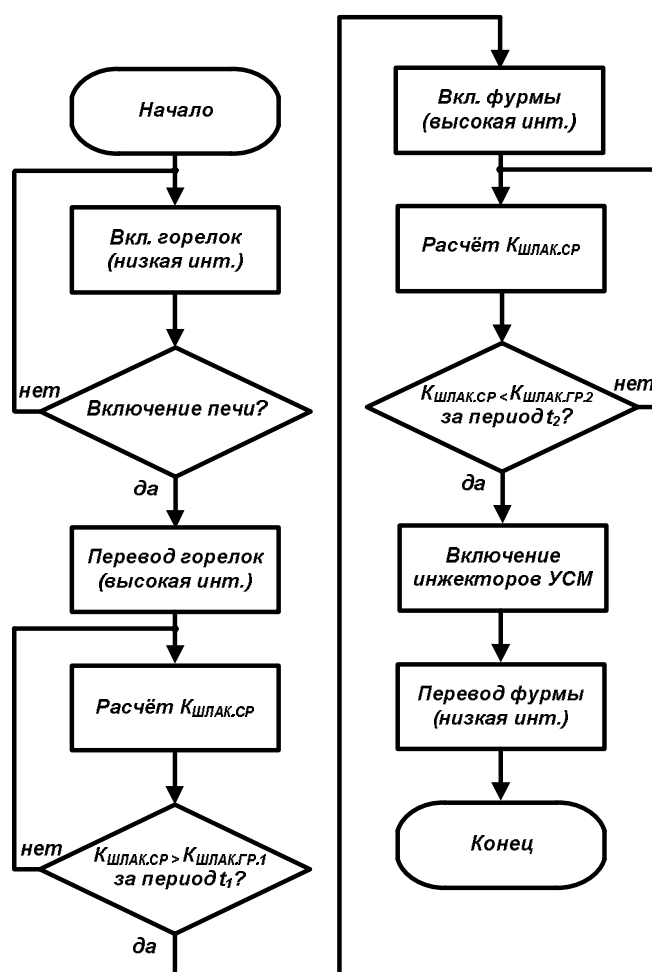


Рис. 1.10. Блок-схема автоматического алгоритма управления РСВ-горелками и инжекторами УСМ ДСП-1 (95 МВА)

Ниже приведём пошаговое описание работы данного алгоритма в рамках одной характерной плавки ДСП-1 (95 МВА) с указанием реальных параметров:

Начало плавки, подготовка к завалке металлошихты и заливке чугуна. Включение горелок в режиме низкой интенсивности с  $Q_{O_2.ГЛГ}=200$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{O_2.ВТ}=100$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{CH_4}=100$  м<sup>3</sup>/ч.

Включение печи, перевод горелок в режим высокой интенсивности с  $Q_{O_2.ГЛГ}=550$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{O_2.ВТ}=400$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{CH_4}=450$  м<sup>3</sup>/ч.

Выполнение расчёта средней величины коэффициента шлака  $K_{ШЛАК.СР}$  с применением фильтра скользящей средней с постоянного времени  $T_{\phi}=30$  с.

Проверка выполнения условия  $K_{ШЛАК.СР} > 40$  за период  $t_1=30$  с. В случае, если условие выполняется, РСВ-горелка переводится в режим фурмы высокой интенсивности с  $Q_{O_2.ГЛГ}=3500$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{O_2.ВТ}=150$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{CH_4}=150$  м<sup>3</sup>/ч. В ином случае, возврат к расчёту  $K_{ШЛАК.СР}$  и повторная проверка.

Повторение шага 3 алгоритма с последующей проверкой условия  $K_{ШЛАК.СР} < 30$  за период  $t_2=30$  с. В случае, если условие выполняется, осуществляется включение инжектора УСМ, а фурма переводится в режим низкой интенсивности с  $Q_{O_2.ГЛГ}=1100$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{O_2.ВТ}=150$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{CH_4}=150$  м<sup>3</sup>/ч.

#### **1.4. Разработка усовершенствованных способов и алгоритмов управления инжекторами углерода для создания слоя вспененного шлака**

Одним из путей по обеспечению максимального теплового КПД электрических дуг является их экранирование вспененным шлаком. Для этого на конечной стадии плавки через специальные инжекторы в ванну печи осуществляется подача углеродосодержащего материала (УСМ). При этом управление расходом УСМ осуществляет специальная вспомогательная система в составе системы управления электрическим режимом, поставляемой в комплекте с основным технологическим оборудованием.

Отметим, что практически во всех современных системах подход к управлению инжекторами на протяжении последних десятков лет остаётся неизменным. Опыт эксплуатации показывает, что штатные решения не всегда являются эффективными и не обеспечивают полного экранирования дуг вспененным шлаком на поздних стадиях плавки, а также в ряде случаев приводят к существ-

венно завышенному расходу УСМ. Таким образом, основной целью данной работы является анализ недостатков существующего подхода к управлению инжекторами на примере системы ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия), а также разработка новой, более эффективной системы управления инжекторами, в которой выявленные недостатки будут компенсированы.

#### ***1.4.1. Краткий обзор современных подходов к диагностике уровня вспененного шлака в ДСП. Анализ недостатков системы управления инжекторами УСМ на примере системы ARCOS***

Очевидно, что для управления режимом работы инжектора УСМ, необходимо обладать актуальной информацией об уровне вспененного шлака в ванне печи. Для решения данной задачи в промышленности существует несколько подходов. Первый подход подразумевает установку на кожухе печи виброакселерометров, сигнал с которых в дальнейшем с помощью специальных алгоритмов преобразуется в сигнал задания на расход УСМ. В основе данного принципа лежит различие среды прохождения звуковых волн при горении открытых дуг и среды, формируемой при наведении вспененного шлака. Первой практической реализацией подобного подхода с возможностью построения пространственной модели распределения вспененного шлака в ванне печи стал модуль FSM (Foaming Slag Manager), разработанный фирмой Siemens VAI (Германия) и получивший своё дальнейшее развитие в системе Melt Expert (Primetals Technologies, Великобритания). Для наглядности, функциональная схема модуля FSM приведена на рис.1.11. Отметим, что данному направлению посвящено определённое количество отечественных и зарубежных исследований, в качестве примера которых можно привести работы [1.21-1.22]. Несмотря на эффективность, применение метода виброакустической диагностики не получило широкого распространения на действующем производстве. Это связано с тем, что эксплуатация виброакселерометров в агрессивных условиях электросталеплавильных цехов часто приводит их к выходу из строя.

В связи с этим, в подавляющем большинстве современных систем управления электрическим режимом [1.23] применяется второй подход, в соответствии с

которым управление режимом работы инжектора осуществляется на основании величины коэффициента шлака, который определяется по формуле:

$$K_{\text{ШЛАК.}} = \frac{A}{K_I}, \quad (1.21)$$

где  $K_I$  - суммарный коэффициент гармонических составляющих тока (в зарубежной терминологии – Total Harmonic Distortion или  $THD_I$ ),  $A$  – масштабный коэффициент.

В свою очередь, величина суммарного коэффициента гармонических составляющих тока определяется в соответствии со следующим выражением:

$$K_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2 - I_{(0)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% = \frac{I_{\text{ВГ.}}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (1.22)$$

где  $I$  - действующее (среднеквадратическое) значение тока;  $I_{(1)}$  – действующее значение тока 1-ой гармоники;  $I_{(0)}$  – постоянная составляющая тока;  $I_{\text{ВГ.}}$  - действующее значение высших гармоник.

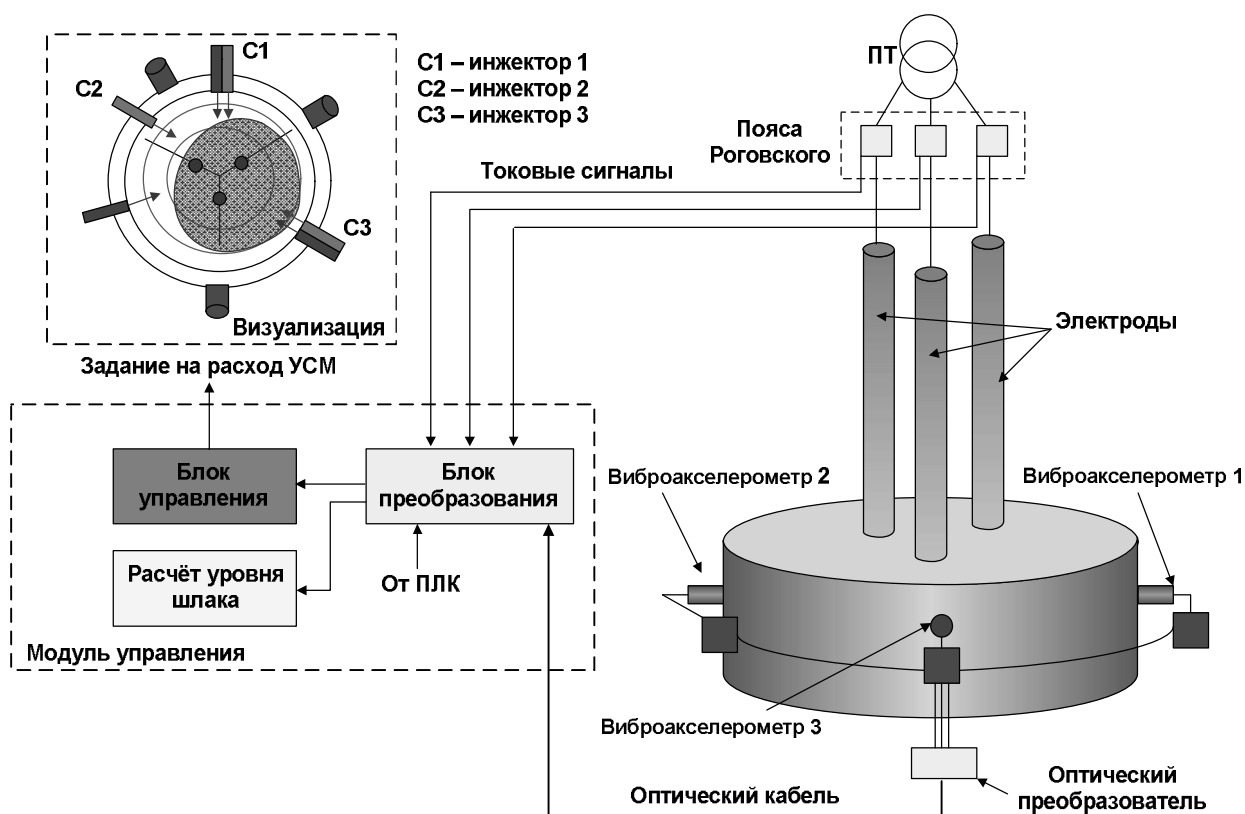


Рис. 1.11. Функциональная схема модуля диагностики уровня вспененного шлака FSM (Foaming Slag Manager), разработанного фирмой Siemens VAI (Германия)

В основе управления инжектором по величине  $K_{ШЛАК}$  лежит принцип, суть которого заключается в том, что по мере увеличения тепловой постоянной времени дуги  $\Theta_D$  и наведения вспененного шлака доля высших гармоник в составе сигнала тока электрической дуги существенно сокращается. Аналогичный эффект используется в системах диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений дуг, что подробно описано в работе [1.15] и наглядно продемонстрировано с помощью рис.1.12. Отметим, что тепловая постоянная времени электрической дуги является переменной в составе дифференциального уравнения мгновенной проводимости электрической дуги (уравнения Касси) [1.3], которое выражается следующей формулой:

$$\Theta_D(t) \frac{dg_D(t)}{dt} = \left( \frac{u_D^2(t)}{E_D^2(t)} - 1 \right) g_D(t) dt, \quad (1.23)$$

где  $g_D(t)$  – мгновенное значение проводимости электрической дуги,  $\Theta_D$  - тепловая постоянная времени электрической дуги,  $E_D(t)$  – противо-ЭДС электрической дуги.

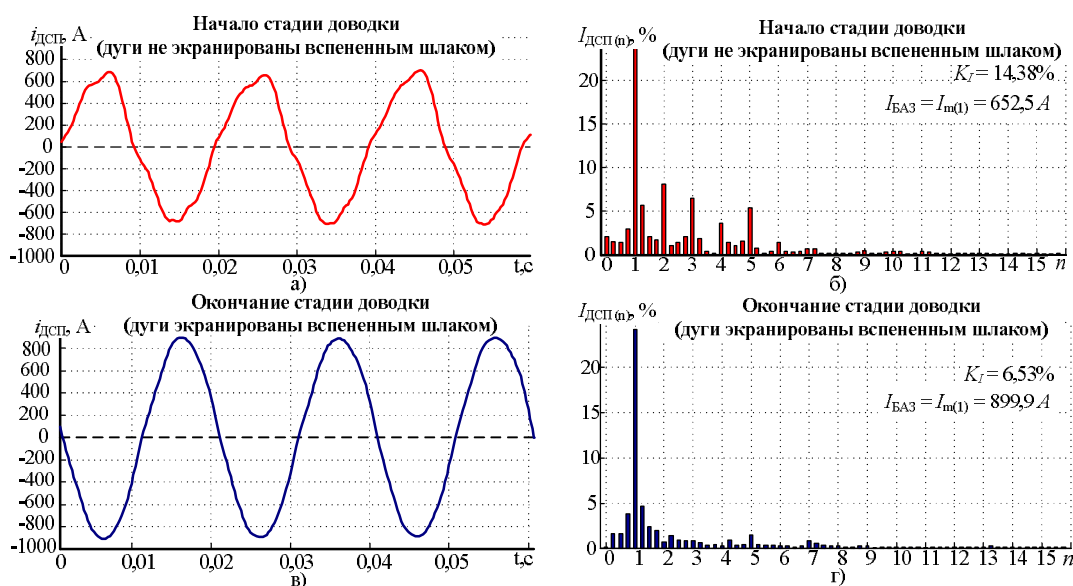


Рис.1.12. Влияние стадии плавления шихты на уровень высших гармоник в составе сигнала тока электрической дуги

Как упоминалось ранее, подход к управлению инжекторами с использованием величины  $K_{ШЛАК}$  для подавляющего большинства современных систем управления электрическим режимом является типовым и не менялся за последние десятилетия. Рассмотрим структуру блока управления расходом УСМ в составе сис-

темы управления электрическим режимом ARCOS, получившей наиболее широкое распространение на отечественном и зарубежном рынке (рис.1.13).

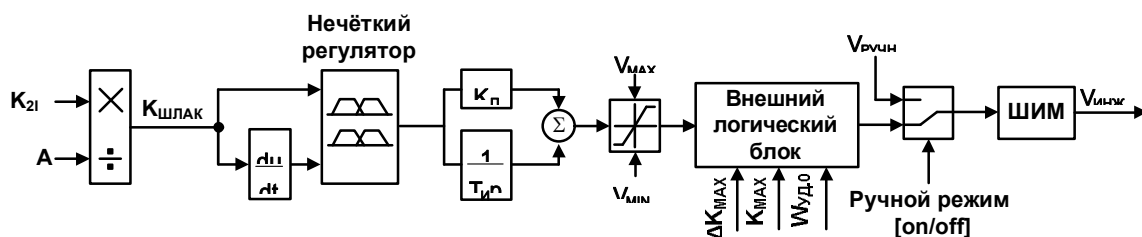


Рис.1.13. Структура блока управления инжектором УСМ в системе управления электрическим режимом ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия).

Приведём краткое описание работы данного блока. Изначально, в системе производится расчёт коэффициента шлака  $K_{ШЛАК}$  в соответствии с формулами (1.10, 1.11). Далее, на вход нечёткого регулятора поступает два сигнала в режиме реального времени: непосредственно  $K_{ШЛАК}$  и первая производная от  $K_{ШЛАК}$ . Нечёткий регулятор содержит в себе три основные предустановленные характеристики. Первая характеристика устанавливает формальные границы для 5 уровней образования вспененного шлака, которые в системе ARCOS имеют названия «no slag» (шлак отсутствует), «poor slag» (слабое образование вспененного шлака), «medium slag» (среднее образование вспененного шлака), «good slag» («хорошее образование вспененного шлака»), «excellent slag» («наилучшее образование вспененного шлака»). Вторая характеристика определяет границы для 3 уровней, характеризующих динамику шлакообразования: «slag growing» (уровень вспененного шлака растёт), «slag shrinking» («уровень вспененного шлака сокращается»), «slag steady» (уровень вспененного шлака стабилен). Третья характеристика формирует уставку сигнала задания на открытие (закрытие) инжектора для 5 основных режимов работы: «no injection» («инжектор выведен из работы»), «low injection» («низкая интенсивность работы инжектора»), «medium injection» («средняя интенсивность работы инжектора»), «high injection» (высокая интенсивность работы инжектора), «max injection» («максимальная интенсивность работы инжектора»). Работа регулятора осуществляется по набору заранее предустановленных правил, которые сведены в таблице 1.7. Например, если система наблюдает

отсутствие вспененного шлака, а также отсутствие динамики его увеличения, инжектор переводится в режим максимально интенсивной работы. В ином случае, если уровень вспененного шлака максимален и продолжает нарастать, система выводит инжектор из работы и прекращает подачу УСМ в ванну печи. Для наглядности, на рис. 1.14 представлены основные характеристики нечёткого регулятора, полученные на действующем производственном объекте.

На выходе нечёткого регулятора в данном случае формируется сигнал задания на открытие инжектора, находящийся в диапазоне от -1 до 1,5. При этом величина «-1» соответствует максимально быстрому закрытию инжектора и сокращению подачи УСМ, а величина «1,5» - наоборот, максимально быстрому открытию инжектора и увеличению подачи УСМ. Выходной сигнал с нечёткого регулятора поступает на традиционный ПИ-регулятор, в котором реализуется приведение сигнала задания из безразмерных единиц в проценты. Далее, сигнал задания на открытие (закрытие) инжектора проходит через стандартный блок ограничения в диапазоне от  $V_{MIN}$  до  $V_{MAX}$ , внешний логический блок, который выводит регулятор из работы при превышении максимальной величины  $K_{ШЛАК}$  или скорости его нарастания, а также отслеживает момент начала работы блока управления в целом по достижению заданной величины удельного расхода электроэнергии  $W_{уд}$ . В итоге, результирующий выходной сигнал поступает на блок ШИМ, в котором формируется непосредственное воздействие на механизм открытия (закрытия) инжектора. Отметим, что в системе также предусмотрена возможность ручного управления инжектором, что может быть полезно при возникновении нештатных ситуаций.

Таблица 1.7.

Набор правил для работы нечёткого регулятора в блоке управления инжектором УСМ в системе ARCOS

№	Уровень шлака	Темп нарастания уровня вспененного шлака	Режим работы инжектора
1	Excellent slag (наилучшее образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного Шлака растёт)	No injection (инжектор выведен из работы)
2	Excellent slag (наилучшее образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	No injection (инжектор выведен из работы)



Продолжение таблицы 1.7.

№	Уровень шлака	Темп нарастания уровня вспененного шлака	Режим работы инжектора
3	Excellent slag (наилучшее образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	Low injection (низкая интенсивность работы инжектора)
4	Good slag (хорошее образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного Шлака растёт)	No injection (инжектор выведен из работы)
5	Good slag (хорошее образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Low injection (низкая интенсивность работы инжектора)
6	Good slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	Medium injection (средняя интенсивность работы инжектора)
7	Medium slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного Шлака растёт)	Low injection (низкая интенсивность работы инжектора)
8	Medium slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Medium injection (средняя интенсивность работы инжектора)
9	Medium slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	High injection (высокая интенсивность работы инжектора)
10	Poor slag (слабое образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного Шлака растёт)	Medium injection (средняя интенсивность работы инжектора)
11	Poor slag (слабое образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Max injection (максимальная интенсивность работы инжектора)
12	Poor slag (слабое образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	High injection (высокая интенсивность работы инжектора)
13	No slag (шлак отсутствует)	Slag growing (уровень вспененного Шлака растёт)	High injection (высокая интенсивность работы инжектора)
14	No slag (шлак отсутствует)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Max injection (максимальная интенсивность работы инжектора)
15	No slag (шлак отсутствует)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	Max injection (максимальная интенсивность работы инжектора)

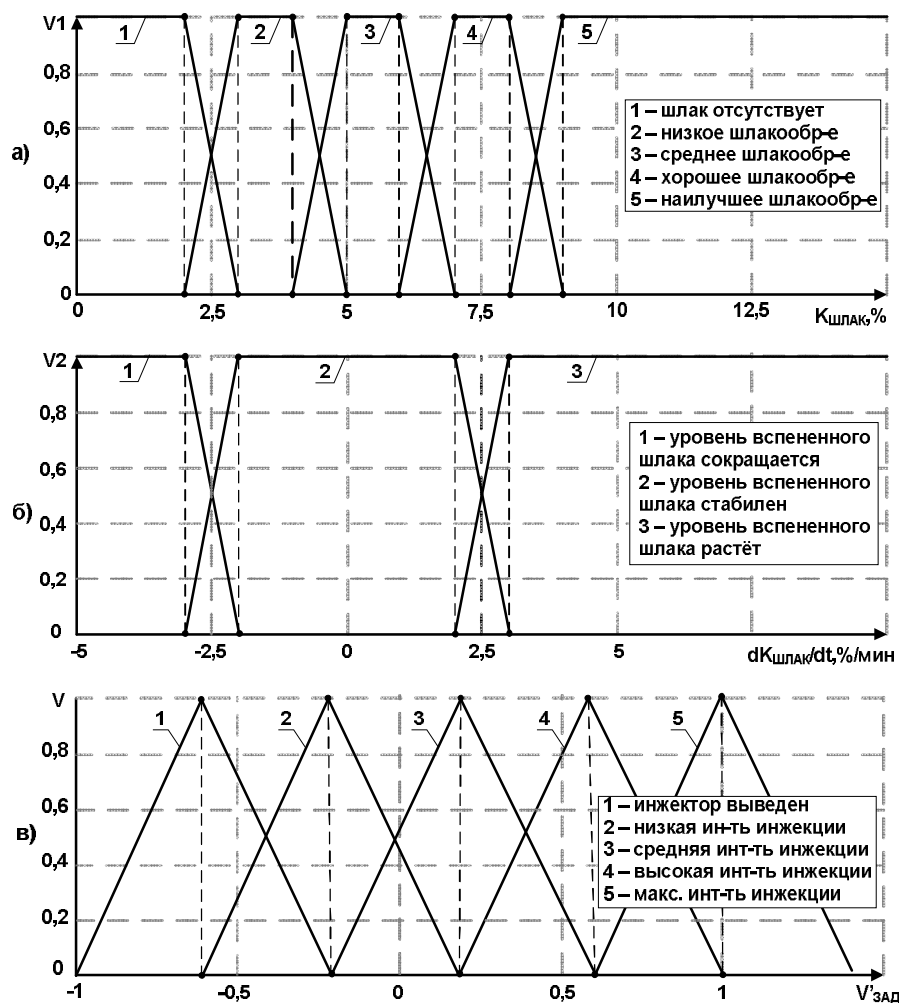


Рис.1.14. Характеристики нечёткого регулятора в блоке управления инжекторами системы ARCOS, отвечающие за: а) оценку уровня вспененного шлака; б) оценку динамики изменения уровня вспененного шлака; в) формирование сигнала задания на открытие инжектора.

Анализ недостатков существующих технических решений. Разработка усовершенствованной структуры блока управления инжектором

Структура блока управления инжекторами УСМ в системе ARCOS имеет ряд недостатков, которые были выявлены в процессе эксплуатации на различных металлургических предприятиях России и зарубежных стран. Во-первых, показатель  $K_I$  [1.2, 1.14, 1.24], на основе которого выполняется расчёт  $K_{\text{шлак}}$ , обладает сильной зависимостью от несимметричных режимов горения дуг, а также возмущающих воздействий по длине электрической дуги [1.2, 1.13, 1.25]. Вследствие этого, возникает необходимость применять входные фильтры сигнала с большими постоянными времени (до 15-20 секунд), что приводит к вы-

сокой инерционности системы, неоптимальным шлаковым режимам и перерасходу УСМ. Кроме того, в структуре блока не учитывается режим аргонной продувки (при наличии), который оказывает существенное влияние на гармонический состав тока дуги. По этой причине одно и то же значение  $K_{ШЛАК}$  может быть показателем оптимального шлакового режима при низкой интенсивности продувки расплава, но недостаточной при продувке высокой интенсивности. Помимо вышеперечисленного, существующая система также не учитывает ситуацию, при которой из-за использования УСМ низкого качества не удастся достигнуть оптимального шлакового режима и инжекторы будут работать при существенной величине расхода вхолостую, а также возможной ситуации поломки одного из инжекторов УСМ, в результате которого возникает несимметричное закрытие дуг вспененным шлаком.

Для компенсации обозначенных недостатков, предлагается использовать усовершенствованную систему управления УСМ [1.26-1.27], которая имеет ряд отличий от существующей. Так, в новой системе вместо коэффициента шлака  $K_{ШЛАК}$ , который рассчитывается на основе  $K_{2l}$ , используется параметр  $K_{ШЛАКУ}$ , рассчитываемый на основании величины относительного действующего значения нечётных гармоник напряжения электрической дуги в соответствии со следующими формулами:

$$U'_{Д.ВГ.НЕЧЁТΣ} = \frac{\sqrt{U_{Д(3)}^2 + U_{Д(5)}^2 + U_{Д(7)}^2 + U_{Д(9)}^2}}{U_{2ФН}} \cdot 100\%, \quad (1.24)$$

$$K_{ШЛАКУ} = \frac{U'_{Д.ВГ.НЕЧЁТΣ}}{A} \cdot 100\%, \quad (1.25)$$

где  $U_{Д(3)}$ ,  $U_{Д(5)}$ ,  $U_{Д(7)}$ ,  $U_{Д(9)}$  - действующие значения 3,5,7 и 9 гармоник напряжения электрической дуги соответственно,  $U_{2ФН}$  – номинальное фазное напряжение печного трансформатора на текущей ступени РПН.

Отметим, что для расчёта  $U'_{ВГ.НЕЧЁТΣ}$  необходимо выполнить косвенный расчёт мгновенного значения напряжения электрической дуги в каждой фазе, который осуществляется на основании прямых измерений токов дуг и фазных напряжений в соответствии со следующей системой:

$$\begin{cases} u_{д1}(t) = u_{2\phi1}(t) - i_{д1}(t)R_{KC1} - L_{KC1} \frac{di_{д1}(t)}{dt} \pm M_{21} \frac{di_{д2}(t)}{dt} \pm M_{31} \frac{di_{д3}(t)}{dt} \\ u_{д2}(t) = u_{2\phi2}(t) - i_{д2}(t)R_{KC2} - L_{KC2} \frac{di_{д2}(t)}{dt} \pm M_{12} \frac{di_{д1}(t)}{dt} \pm M_{32} \frac{di_{д3}(t)}{dt} \\ u_{д3}(t) = u_{2\phi3}(t) - i_{д3}(t)R_{KC3} - L_{KC3} \frac{di_{д3}(t)}{dt} \pm M_{13} \frac{di_{д1}(t)}{dt} \pm M_{23} \frac{di_{д2}(t)}{dt} \end{cases}, \quad (1.26)$$

где  $R_{KC1}$ ,  $R_{KC2}$ ,  $R_{KC3}$  – активное сопротивление участка короткой сети,  $L_{KC1}$ ,  $L_{KC2}$ ,  $L_{KC3}$  – индуктивное сопротивление участка короткой сети,  $u_{д1}(t)$ ,  $u_{д2}(t)$ ,  $u_{д3}(t)$  – мгновенное значение напряжения дуги,  $u_{2\phi1}(t)$ ,  $u_{2\phi2}(t)$ ,  $u_{2\phi3}(t)$  – мгновенное значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ,  $i_{д1}(t)$ ,  $i_{д2}(t)$ ,  $i_{д3}(t)$  – мгновенные значения токов дуг,  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{23}$ ,  $M_{32}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{31}$  – коэффициенты взаимной индуктивности между фазами печи (знаки при составляющих с данными коэффициентами в системе уравнений определяются индивидуально для каждого объекта в зависимости от ориентации консолей в пространстве).

Выбор  $U'_{ВГ.НЕЧЁТ.Σ}$  в качестве параметра управления обусловлен результатами исследования [1.11], в котором доказано, что данный показатель имеет прямую связь с величиной тепловой постоянной времени дуги  $\theta_{д}$ , а также в наименьшей мере подвержен влиянию несимметричных режимов и возмущающих воздействий по дли не электрической дуги. Благодаря этому, отпадает необходимость в применении входных фильтров с большими постоянными времени, что решает проблему инерционности исходной системы.

Помимо нового параметра управления, в системе предусмотрены два дополнительных усовершенствования: 1) использована более сложная структура нечёткого регулятора, в которой предопределён индивидуальный набор характеристик, для различных режимов продувки расплава аргоном. Необходимость этого связана с тем, что при более интенсивной продувке значение  $K_{ШЛАКУ}$ , свидетельствующее о достижении оптимального шлакового режима, будет несколько завышено по сравнению с тем же значением при низкой интенсивности продувки. Несмотря на то, что показатель  $K_{ШЛАКУ}$  является стабильным и не подвержен сильному влиянию возмущений, вызванных продувкой, данная опция может быть полезна для печей малой и средней мощности; 2) предусмотрен дополнительный блок, который отслеживает продолжительную работу инжекторов без существенного изменения шлакового режима. При возникновении та-

кой ситуации, система управления адаптирует электрический режим путём перехода на более короткую длину электрической дуги, формируемой переходом на новую рабочую кривую  $N_{PK}$ , что позволит увеличить тепловой КПД дуг. При этом набор правил, инициирующих переход на более короткую дугу, может определяться индивидуально для каждого отдельно взятого объекта. С учётом вышеперечисленного, функциональная схема усовершенствованного блока управления УСМ приведена на рис. 1.15. Возможная структура алгоритма управления рабочей кривой  $N_{PK}$  приведена на рис. 1.16. В данном случае, выбор значения  $N_{PK}$ , помимо стандартных условий по абсолютному расходу электроэнергии, использует также другие технологические параметры, такие как температура водоохлаждаемых панелей, а также коэффициент вспенивания шлака, рассчитанный по сигналу  $U'_{ВГ.НЕЧЁТ.Σ}$ . Набор сочетаний ступеней печного трансформатора и номеров рабочих кривых для различных режимов данного алгоритма приведён в таблице 1.8. При этом режимы 6,7 и 8 соответствуют режимам с разными длинами дуг для поздней стадии плавки.

Таким образом, применение усовершенствованного блока позволит обеспечить более рациональный расход УСМ, сформировать электрический режим с максимальным тепловым КПД электрических дуг [1.26] в соответствии с текущим распределением вспененного шлака в ванне печи, а также адаптировать работу инжектора к различным режимам продувки расплава. При этом особую актуальность для дальнейших исследований приобретает задача установки взаимосвязи между  $K_{ШЛАКУ}$ , уровнем вспененного шлака и режимом продувки расплава.

На рис.1.16  $W_{АБС}$  – абсолютное значение потребленной электроэнергии [кВт·ч];  $W_{ГР}$  – граничные значения абсолютного расхода электроэнергии, используемые для перехода к точкам алгоритма [кВт·ч];  $W_{РАСЧ.}$  – расчетное значение ожидаемого расхода электроэнергии для закрытия пальцев;  $VT_{Пан}$  – рассчитанные скорости изменения температуры водоохлаждаемых панелей [°С/мин];  $VT_{Зад.}$  – граничные значения скоростей изменения температуры водоохлаждаемых панелей [°С/мин];  $K_{ВСПЕН.}$  – коэффициент вспенивания шлака, рассчитываемый на основании информации о высших гармониках токов дуг;  $K_{ВСПЕН.ГР}$  –

граничные значения коэффициентов вспенивания шлака, используемые для изменения длины электрической дуги на стадии доводки металла.

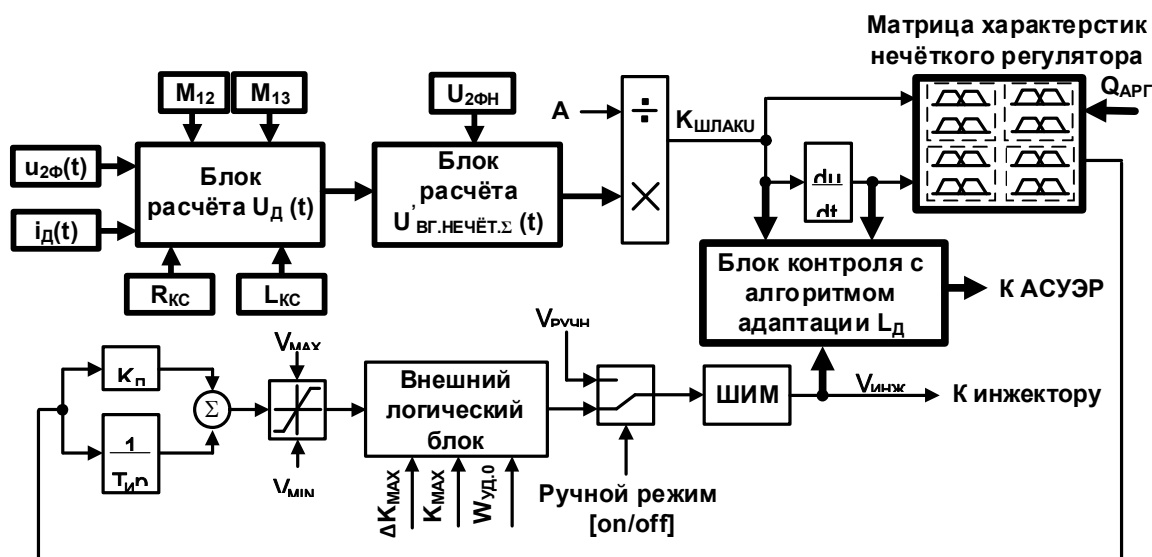


Рис.1.15 Структура усовершенствованного блока управления инжектором УСМ

Таблица 1.8.

Набор сочетаний ступеней печного трансформатора и номеров рабочих кривых для различных режимов алгоритма автоматической адаптации длины дуги к шлаковому режиму

№ режима	Номер ступени печного трансформатора $N_{ТР}$	Номер рабочей кривой $N_{РК}$
1	7	5
2	9	5
3	9	3
4	8	4
5	9	5
6	8	3
7	8	2
8	8	1

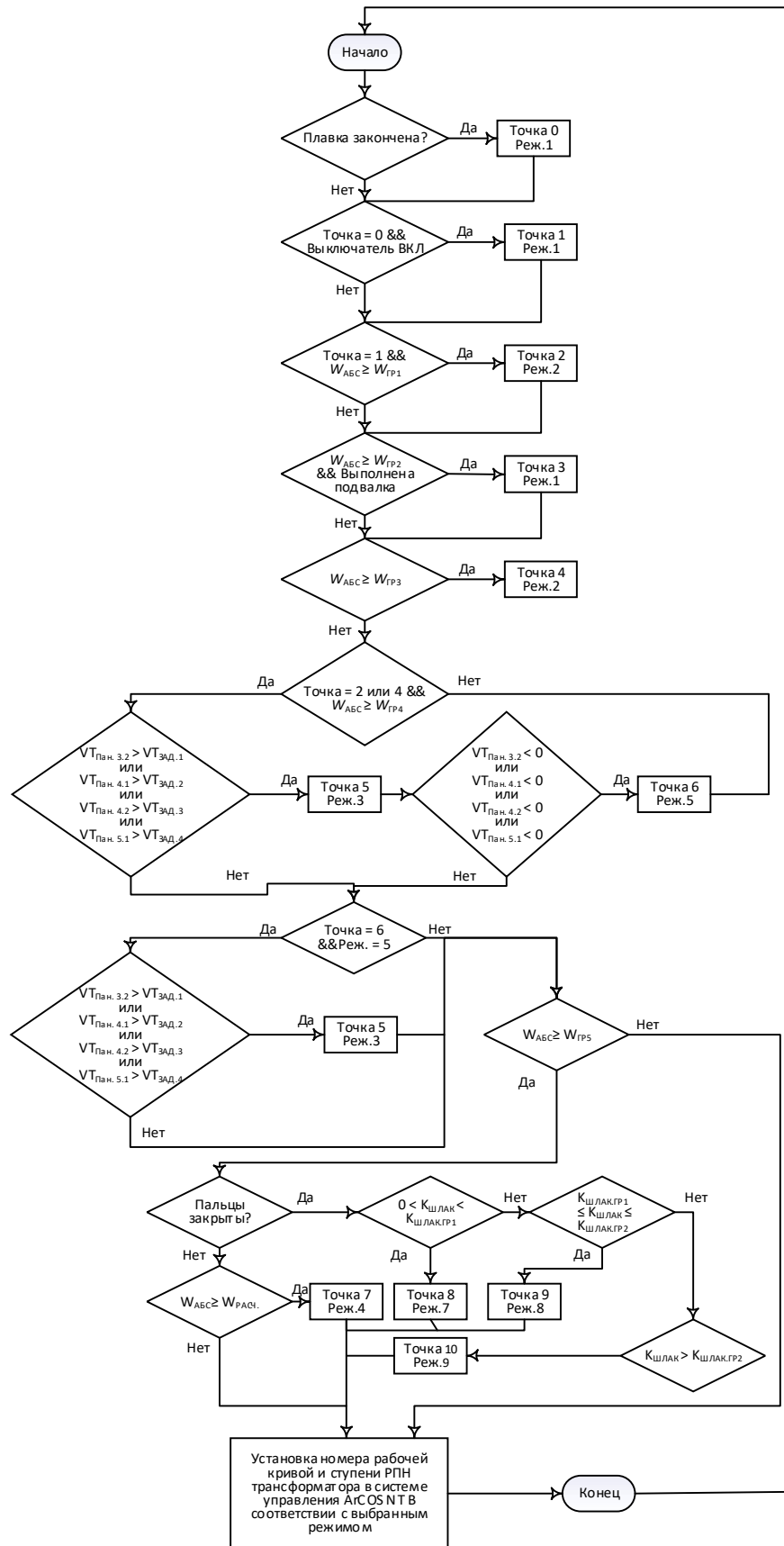


Рис.1.16. Блок-схема усовершенствованного алгоритма управления электрическим режимом работы ДСП-120 шахтного типа с функцией адаптации длины электрической дуги на стадии доводки жидкой стали

## 1.5. Разработка усовершенствованных способов и алгоритмов управления электрическими и технологическими режимами УКП

Современные электросталеплавильные агрегаты в большинстве случаев оснащены собственными системами управления электрическими режимами, установленными заводами изготовителями (регуляторы Melt Expert, ArCOS, Simelt, Q-REG, HI-REG, Ferrotron – DECTEQ и др.). Функциональные возможности вышеперечисленных систем управления для УКП являются ограниченными. В большинстве систем управления заданные параметры регулирования (полное сопротивление фазы  $Z_{2\phi}$ , активное сопротивление дуг  $R_d$  или полные проводимости фаз  $Y_{2\phi}$ ) рассчитываются заранее для различных сочетаний ступеней РПН печного трансформатора ( $N_{TP}$ ) и рабочих кривых ( $N_{PK}$ ), определяющих длину электрической дуги, а выбор необходимых ступеней трансформатора осуществляется вручную технологическим персоналом. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в современных системах управления электрическими режимами УКП отсутствует автоматическая адаптация электрических режимов к изменяющимся режимам аргонной продувки, а также шлаковым режимам, от которых зависит степень экранирования электрических дуг и их тепловой КПД.

Таким образом, актуальной задачей является разработка интеллектуальных систем автоматического управления электрическими режимами УКП с функцией динамической адаптации длин электрических дуг и ступеней РПН печного трансформатора к текущему шлаковому режиму и режиму аргонной продувки, с учетом расположения возмущений (зеркал металла) на поверхности жидкой ванны относительно электродов фаз УКП, создаваемых работой продувочных блоков в днище стальной ванны или аварийной фурмы. В качестве критерия, по которому предлагается реализация динамической коррекции электрических режимов УКП, может выступать гармонических составляющих тока  $K_1$  (в зарубежной терминологии – параметр Total Harmonic Distortion или  $THD_1$ ).



### ***1.5.1. Результаты экспериментальных исследований поведения поверхности жидкого металла и шлака при различных режимах аргонной продувки.***

Технически, операция аргонной продувки выполняется с помощью специальных продувочных блоков установленных, в большинстве случаев, в днище стальной ванны. Режим донной продувки выставляется вручную сталеваром с визуальной оценкой степени перемешивания металла через рабочее окно. В данном случае расход аргона и его давление используются как основные задающие параметры. При продувке аргоном на поверхности жидкой ванны с внешним слоем шлака образуется зеркало металла. Размеры зеркала зависят от расхода аргона, состояния и положения донных пробок, толщины шлакового слоя, температуры расплава и шлака. Вследствие интенсивной аргонной продувки зеркало металла создает возмущения оказывающие негативное влияние на режимы горения электрических дуг фаз УКП, расположенных наиболее близко к зоне продувки. Рассмотрим данный процесс на примере установок ковш-печь (рис. 1.17), с мощностью печного трансформатора 25 МВА (ПАО «Северосталь», г. Череповец). Схемы расположения продувочных блоков в днищах стальной ванны показаны на рис. 1.18. В обоих случаях фазы 1 и 2 подвержены наиболее сильному влиянию зеркала металла.



а)

б)

Рис. 1.17. Общий вид УКП1 (а) и УКП2 (б)

Достижение максимального эффекта по повышению стойкости футеров-

ки стальной требует проведения дополнительных работ по коррекции электрических режимов УПК1,2 и алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых из-за изменения влияния зеркала жидкого металла на режимы горения электрических дуг.

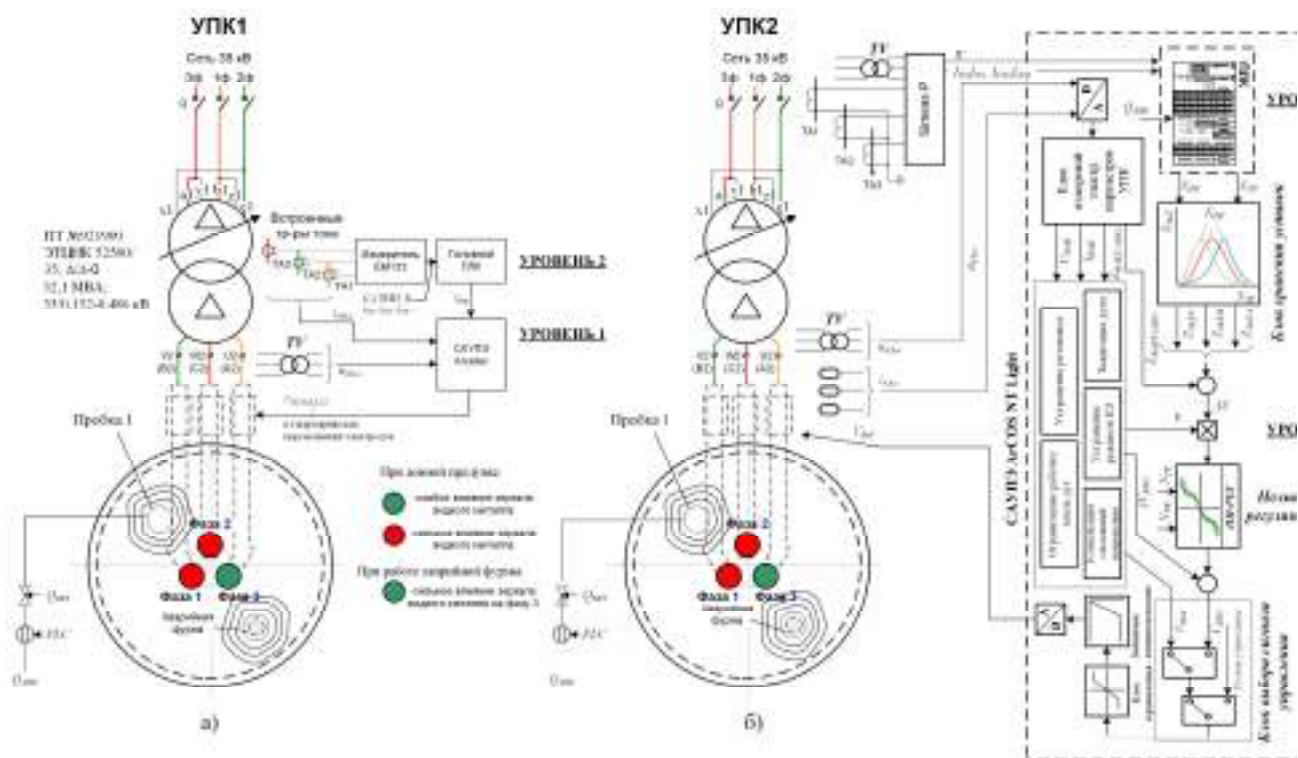


Рис. 1.18. Расположение продувочного блока в днище стальной и функциональные схемы систем автоматического управления электрическими режимами УПК1,2 ЭС СП

На представленных УПК были проведены экспериментальные исследования поведения поверхности жидкого металла и шлака при различных режимах аргонной продувки и выполнены исследования геометрии зеркала жидкого металла при работе аварийной фурмы. Исследования проводились с использованием видеофиксации. Были проведены четыре серии экспериментов. Первая серия для пониженной температуры расплава  $T = 1568 \text{ }^\circ\text{C}$  и толщины шлака  $h_{\text{ш}} = 150 \text{ мм}$ , вторая – для повышенной температуры  $T = 1602 \text{ }^\circ\text{C}$  и толщины шлака  $h_{\text{ш}} = 150 \text{ мм}$ . Первая и вторая серии экспериментов проводились при донной продувке аргоном, третья и четвертая серии экспериментов проводились при аргонной продувке через аварийную фурму. Третья серия экспериментов проводилась для пониженной температуры  $T = 1552 \text{ }^\circ\text{C}$  и

толщины шлака  $h_{III} = 120$  мм, четвертая – для повышенной температуры  $T = 1610$  °С и толщины шлака  $h_{III} = 120$  мм. Это позволило оценить влияние степени разжижения шлака на геометрические параметры зеркала, а также на образование волн и брызг.

В качестве примера рассмотрим более подробно первую серию экспериментов для УКП1 при различных режимах аргонной продувки. На рис. 1.19 четко прослеживается процесс образования зеркала, увеличение его диаметра, а также появление волн и брызг, закорачивающих в начале фазу «1», а затем фазы «1» и «2». Граничное значение давления  $P_{АРГ.}$ , при котором негативное воздействие на фазы становится максимальным возможным, составляет 8 атм. Посредством компьютерного анализа набора фотокадров с использованием основных оптических характеристик видеоаппаратуры (угол и высота расположения камеры, значение оптического зума и т.д.) были восстановлены геометрические параметры зеркала жидкого металла. Анализ показал, что диаметр зеркала при интенсивной продувке достигает значения  $D_3 = 1005$  мм. Критическое значение  $D_{3.КРИТ.}$  составляет 577 мм, что приводит к наиболее нестабильным режимам нагрева со значительными колебаниями токов и мощностей дуг, и сопровождается снижением КПД электрических дуг, что сказывается на эффективности нагрева жидкой ванны. Результаты анализа геометрических параметров зеркала сведены в табл. 1.9. По полученным данным построена зависимость  $D_3 = f(P_{АРГ.})$  (рис. 1.19), для которой получено уравнение регрессии. Порядок и вид уравнения выбирались исходя из максимального значения коэффициента достоверности аппроксимации  $R^2$ . Приемлемая точность математической модели диаметра зеркала достигалась при  $R^2 > 0,95$ .

Следует отметить, что при работе аварийной фурмы увеличение зеркала металла происходит быстрее. При давлении аргона равном 4 атм. происходит резкое увеличение диаметра жидкого металла на поверхности шлакового

слоя до значения 985 мм. Максимальный диаметр зеркала при интенсивной продувке достигает значения  $D_3 = 1577$  мм.

При наиболее интенсивных режимах продувки волны и брызги жидкого металла могут приводить к периодическим изменениям длины дуги в определённой фазе, а в некоторых случаях приводить к эксплуатационным коротким замыканиям, что в свою очередь приводит к сильным колебаниям мощности электрической дуг. Кроме того, при интенсивной продувке вследствие влияния зеркала металла снижается КПД дуг в фазах, находящихся в непосредственной близости к продувочным блокам.

Таблица 1.9

Результаты измерений геометрических параметров зеркала жидкого металла для УКП1 при различных режимах аргонной продувки (серия измерений №1, соответствующая донной продувке при  $T = 1568$  °С)

Номер опыта	Давление аргона $P_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$ , атм.	Диаметр зеркала жидкого металла $D_3$ , мм	Наличие волн жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 1	Наличие волн жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 2
1	0	0	-	-
2	4	111	-	-
3	6	242	-	-
4	8	577	+	+
5	10	726	+	+
6	12	782	+	+
7	14	893	+	+
8	16	1005	+	+

Осциллограммы колебаний мгновенных значений токов на первичной стороне печного трансформатора при высокой интенсивности продувки УКП1 приведены на рис. 1.21. Очевидно, что подобное явление оказывает сильное негативное влияние на результирующие энергетические показатели эффективности эксплуатации печного комплекса.

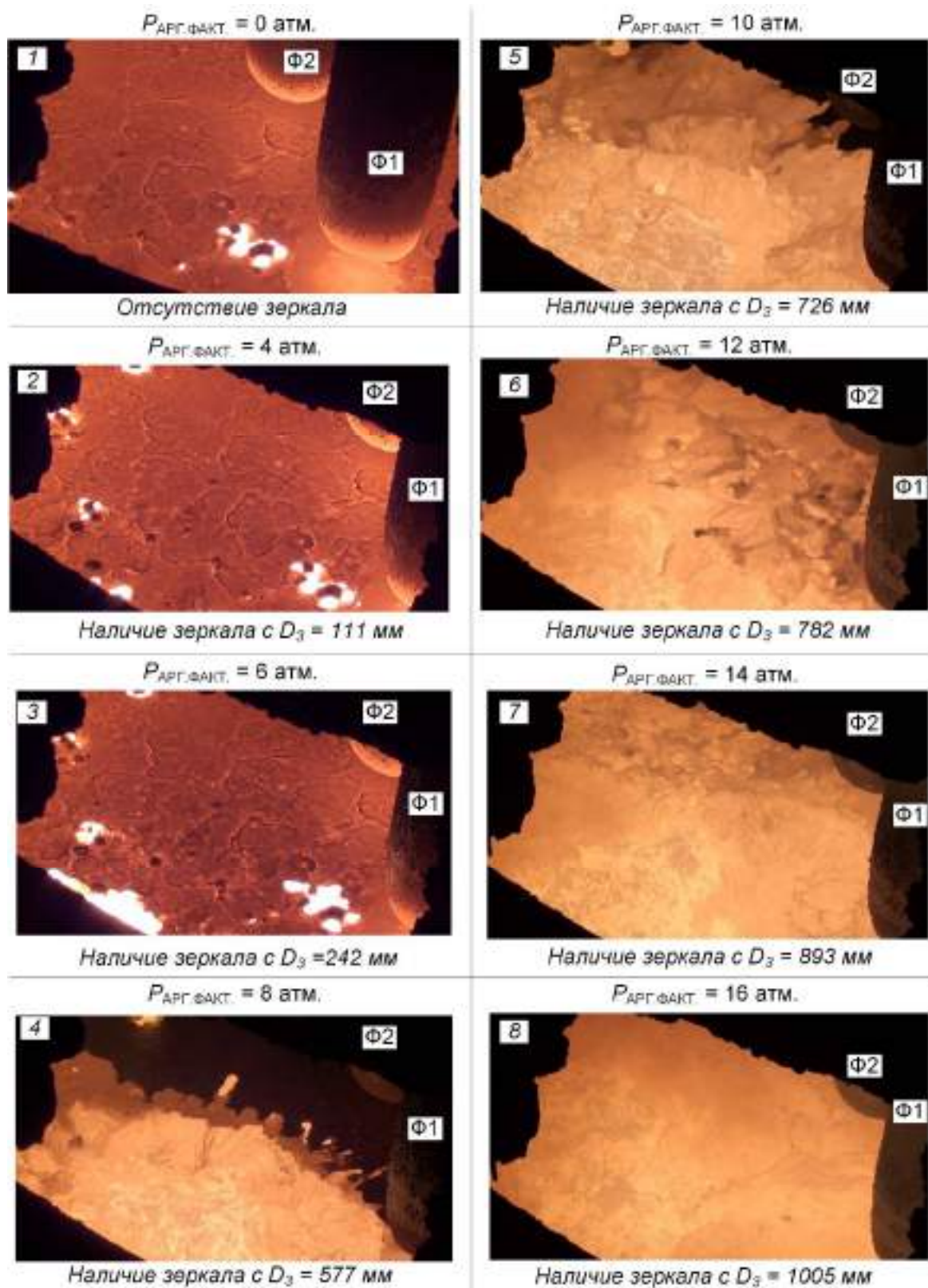


Рис. 1.19. Исследование зеркала жидкого металла на УКП1 ЭС при различных режимах аргонной продувки (донная продувка) (температура перед проведением эксперимента  $T = 1568 \text{ }^\circ\text{C}$ ; толщина шлака  $h_{\text{Ш}} = 150 \text{ мм}$ )



Рис. 1.20. Экспериментальная зависимость диаметра зеркала жидкого металла на УКП1 при донной продувке аргоном и температуре металла  $T = 1568^\circ\text{C}$

Необходимо отметить, что результаты научных исследований, проведенные на различных электросталеплавильных комплексах [1.28-1.29] выявили закономерности изменения гармоник тока в течение всего цикла плавки. В частности, было доказано, что режимы горения электрических дуг на жидкую ванну наилучшим образом описываются изменением эквивалентного действующего значения четных гармонических составляющих, либо суммарным коэффициентом гармонических составляющих тока  $K_I$  (в зарубежной терминологии – Total Harmonic Distortion или  $THD_I$ ):

$$K_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2 - I_{(0)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% = \frac{I_{ВГ}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (1.27)$$

где  $I$  - действующее (среднеквадратическое) значение тока;  $I_{(1)}$  – действующее значение тока 1-ой гармоники;  $I_{(0)}$  – постоянная составляющая тока;  $I_{ВГ}$  - действующее значение высших гармоник тока.

Для того, чтобы определить величину коэффициента шлака  $K_{\text{ШЛАК}}$  можно применить обратную величину коэффициента гармонических составляющих тока  $K_I$  с учетом масштабного коэффициента,  $a$ :

$$K_{\text{ШЛАК.}} = \frac{a}{K_I}, \quad (1.28)$$

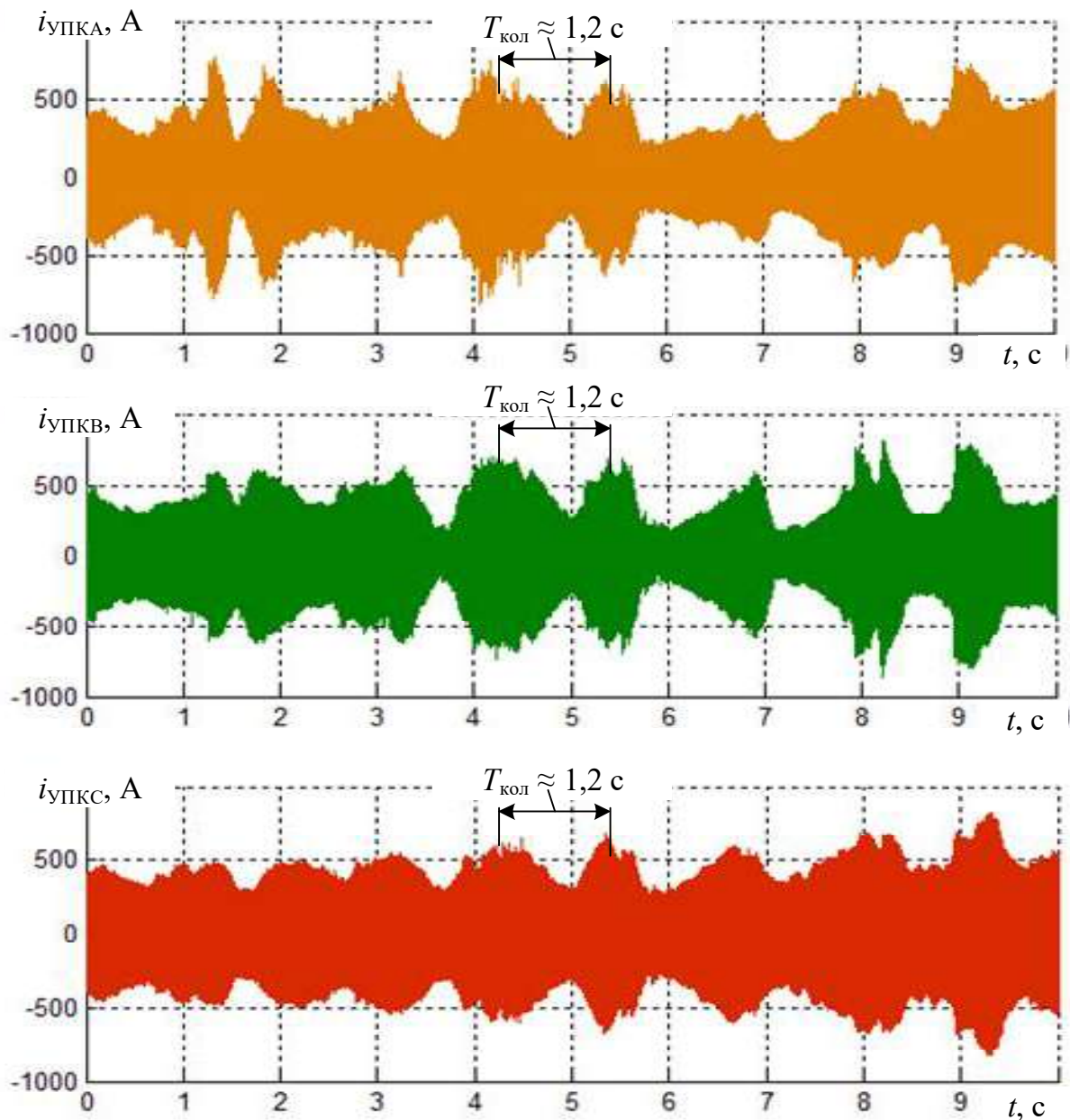


Рис. 1.21. Изменение мгновенных значений токов на первичной стороне печного трансформатора УКП, при интенсивной продувке аргоном с  $P_{\text{Арг}} > 12$  атм

В свою очередь коэффициент  $a$  может быть определен как произведение числа 100 на минимальное значение  $K_{\text{Imin}}$ , зафиксированное за цикл плавки при существующей электрической дуге ( $I_{\text{Д}} > 0$ ), следует отметить, что на практике значение  $K_{\text{Imin}} = 2,0 - 2,5\%$ :

$$a = 100 \cdot K_{\text{Imin}}, \quad (1.29)$$

При корректном расчете параметра  $a$  максимальное значение  $K_{\text{ШЛАК}}$ , равное 100 единицам, будет соответствовать наиболее стабильному режиму горения электрической дуги с максимальным тепловым КПД.

Использование параметра  $K_{\text{ШЛАК}}$  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. Данный факт лег в основу нового алгоритма управления электрическим режимом УКП.

***1.5.2. Разработка усовершенствованных алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых, обеспечивающих автоматическую адаптацию электрических режимов УКП1,2 в зависимости от режима аргонной продувки и шлакового режима.***

Как уже было сказано ранее, что для минимизации влияния зеркала металла на режимы горения электрических дуг необходимо произвести разработку усовершенствованных алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых, обеспечивающих автоматическую адаптацию электрических режимов УКП1,2 в зависимости от режима аргонной продувки и шлакового режима. Блок-схема усовершенствованного алгоритма управления показана на рис. 1.22. Для работы данного алгоритма определены граничные значения коэффициентов шлака  $K_{\text{ШЛАК}}$  и также предложена формула расчета коэффициента шлака с использованием информации о гармоническом составе токов на первичной стороне печного трансформатора:

$$K_{\text{ШЛАК} / \Phi_i} = K_{\text{ШЛАК} / \Phi_i}_{-1} + (K_{\text{ШЛАК} / i} - K_{\text{ШЛАК} / \Phi_i}_{-1}) \cdot \frac{T_{\text{ЦИКЛ}}}{T_{\Phi}}, \quad (1.30)$$

где  $K_{\text{ШЛАК}}$  – мгновенное (нефильтрованное) значение коэффициента шлака;  $K_{\text{ШЛАК} / \Phi}$  – фильтрованное значение  $K_{\text{ШЛАК}}$ ;  $T_{\Phi}$  – постоянная времени фильтра;  $T_{\text{ЦИКЛ}}$  – фиксированное время опроса контроллера (0,1 сек).

Для настройки разработанных алгоритмов управления, с помощью специализированного меню на визуализации сталевара, задаются следующие параметры: 1) граничные коэффициенты  $K_{\text{ГР1}}, K_{\text{ГР1.1}}, K_{\text{ГР2}}, K_{\text{ГР2.1}}, K_{\text{ГР3}}, K_{\text{ГР3.1}}$ , при которых происхо-



дит переключение  $N_{PK}$ ; 2) весовые коэффициенты  $K_{B(i)}$ , учитывающие влияние изменения вторичного напряжения ПТ при переключении ступеней РПН на уровни высших гармоник тока; 3) постоянная времени фильтра  $T_{\Phi}$ , для получения фильтрованного значения  $K_{ШЛАК}$ , используемого в алгоритме автоматического переключения рабочих кривых; 4) минимальное значение тока для исключения работы алгоритма в режиме работы печного трансформатора на холостом ходу (в данном случае 40А). Далее активируется основная часть алгоритма, по определению номеров рабочих кривых  $N_{PK}$  в зависимости от текущего уровня коэффициента шлака  $K_{ШЛАК}$  в зависимости от того действует ли в данный момент донная продувка или аварийная фурма. Более наглядно данный процесс показан на рис. 1.22. На представленных графиках в целях упрощения смоделировано поведение фильтрованного значения  $K_{ШЛАК}$  с возрастающим и спадающим участками.

Для режима донной продувки при достижении граничных коэффициентов шлака  $K_{ГР1.1}$ ,  $K_{ГР2.1}$ ,  $K_{ГР3.1}$  осуществляется увеличение номера рабочей кривой с  $N_{PK} = 1$  до  $N_{PK} = 4$  с увеличением длины электрической дуги и изменением степени несимметрии горения дуг. Для повышения устойчивости работы алгоритма и исключения автоколебаний при переключении  $N_{PK}$ , в алгоритм введены дублирующие значения граничных коэффициентов, работающие на понижение номера рабочей кривой, — это  $K_{ГР1}$ ,  $K_{ГР2}$ ,  $K_{ГР3}$ . Для режима работы аварийной фурмы использованы только две пары граничных значения коэффициента шлака на повышение рабочей кривой ( $K_{ГР1.1}$ ,  $K_{ГР2.1}$ ,  $K_{ГР1}$ ,  $K_{ГР2}$ ) и, соответственно, три значения рабочих кривых с  $N_{PK} = 4$  до  $N_{PK} = 6$  с различной несимметрией горения дуг. Во втором случае увеличение номера рабочей кривой соответствует уменьшению длины электрической дуг и увеличению несимметрии длин электрических дуг с учетом расположения возмущения на поверхности жидкого металла, создаваемого работой аварийной фурмы [1.30-1.34].

Для обеспечения оптимальных значений тепловых КПД электрических дуг при изменении режима аргонной продувки и толщины шлака для указанных выше рабочих кривых  $N_{PK}$  введены различные балансовые коэффициенты  $K_{БАЛ1,2,3}$  к уставкам импеданса  $Z_{2\Phi1,2,3}$  вторичного электрического контура УКП.

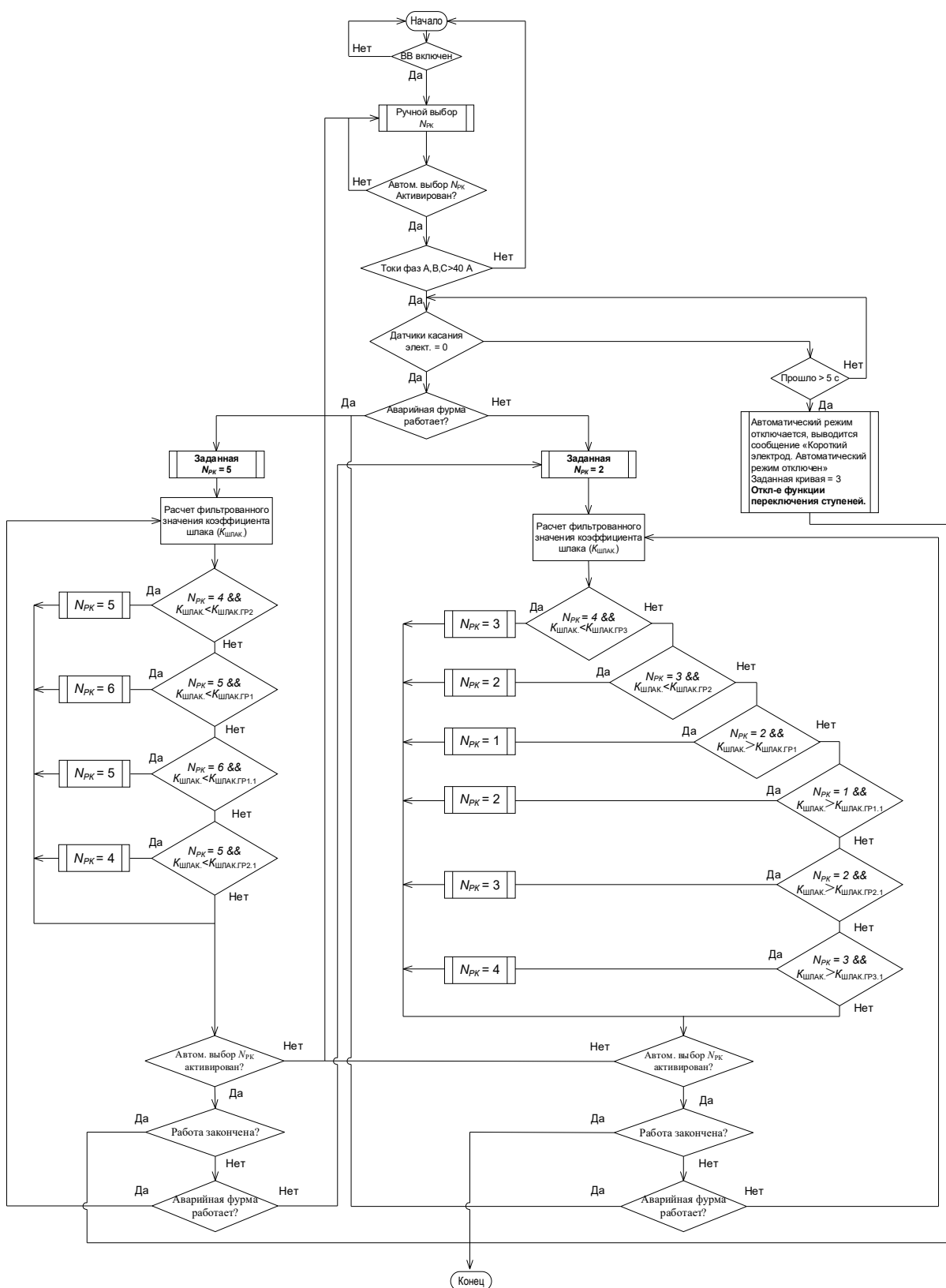


Рис. 1.22. Блок-схема разработанного алгоритма автоматического переключения рабочих кривых в системе управления ArCOS NT Light УКП в функции текущего коэффициента шлака

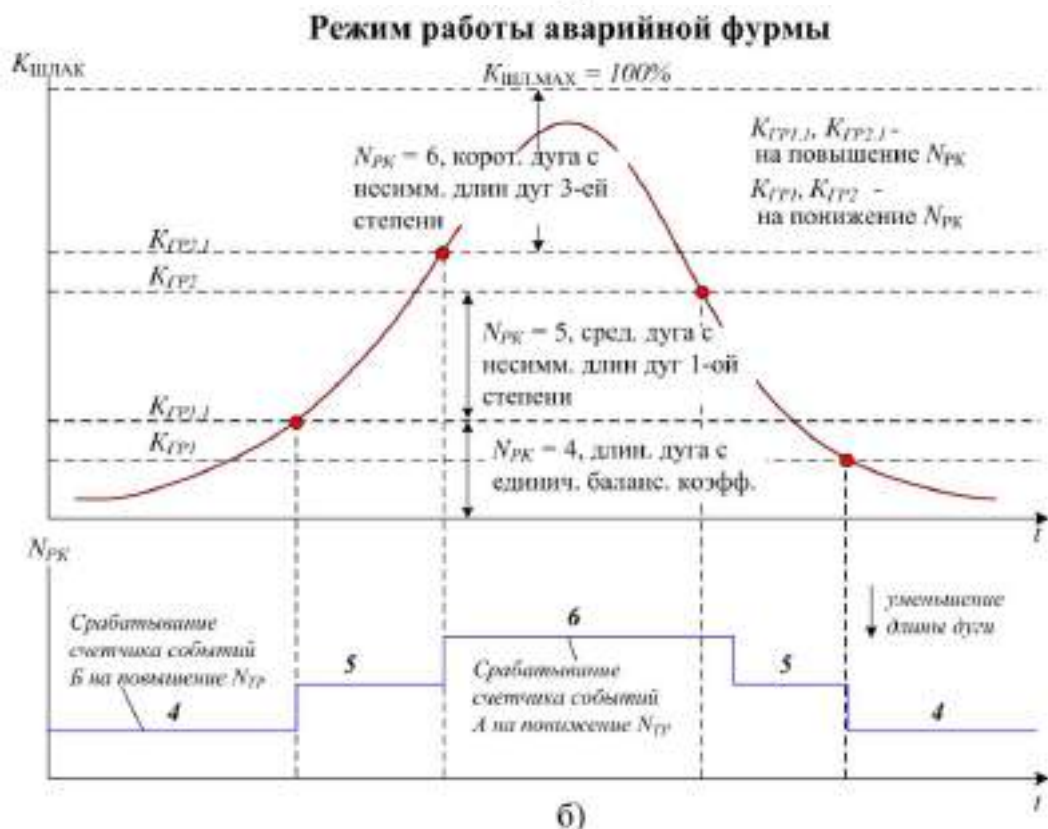
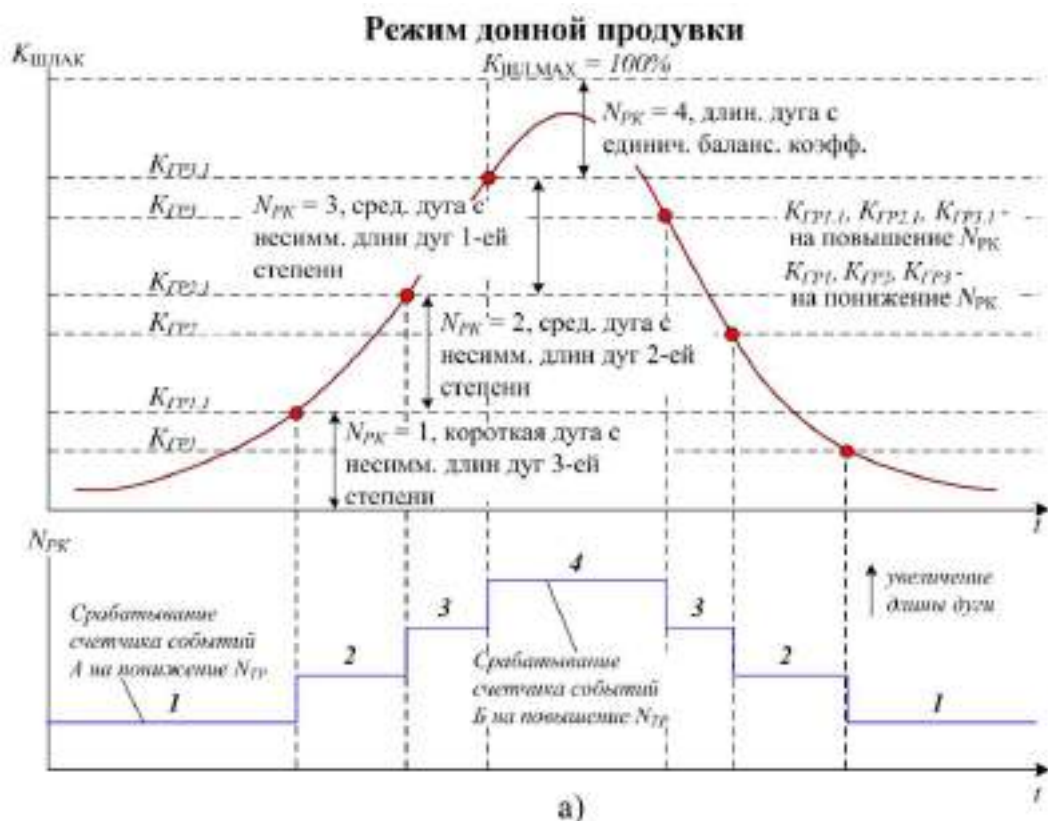


Рис. 1.23. Пояснение работы алгоритма автоматического переключения рабочих кривых в зависимости от уровня коэффициента шлака  $K_{\text{шлак}}$   
 а – для режима донной продувки; б – для режима работы аварийной фурмы

На основании проведенных ранее экспериментальных исследований, описанных в [1.30, 1.32, 1.35], было показано, что для обеспечения стабильного горения дуг и сохранения теплового КПД при увеличении диаметра зеркала металла, длины дуг, определенные заданием импеданса вторичного электрического контура  $Z_{2Ф.Зад.}$ , в ближайших к зеркалу металла фазах, должны быть уменьшены, а в фазе, которая находится на удалении от источника возмущений – увеличена. Исходя из этого для режима коротких дуг ( $N_{PK} = 1$ ) использованы максимально несимметричные длины дуг с  $K_{БАЛ1} = 0,95$ ;  $K_{БАЛ2} = 0,95$ ;  $K_{БАЛ3} = 1,1$ . Для  $N_{PK} = 2$  использованы  $K_{БАЛ1} = 0,96$ ;  $K_{БАЛ2} = 0,96$ ;  $K_{БАЛ3} = 1,08$ . Для  $N_{PK} = 3$  использованы  $K_{БАЛ1} = 0,975$ ;  $K_{БАЛ2} = 0,975$ ;  $K_{БАЛ3} = 1,05$ . Для спокойного режима продувки и нормальной толщины шлака, при которых  $K_{ШЛАК}$  имеет максимальное значение, используется  $N_{PK} = 4$  с  $K_{БАЛ1,2,3} = 1$ . При использовании аварийной фурмы укорачивается длина дуги в фазе 3, ближайшей к зеркалу металла. При этом балансовые коэффициенты для режима горения коротких дуг  $N_{PK} = 6$  равны:  $K_{БАЛ1} = 1,025$ ,  $K_{БАЛ2} = 1,025$ ,  $K_{БАЛ3} = 0,95$ . Для режима горения средних дуг  $N_{PK} = 5$  равны:  $K_{БАЛ1} = 1$ ,  $K_{БАЛ2} = 1,03$ ,  $K_{БАЛ3} = 0,97$ . В режиме горения длинных дуг и продувке через аварийную фурму  $N_{PK} = 4$   $K_{БАЛ1,2,3} = 1$ , аналогично режиму донной продувки.

Необходимо отметить, что перед настройкой алгоритмов управления отдельно для каждой УКП были проведены дополнительные экспериментальные исследования по определению предварительных весовых коэффициентов  $K_{ВЕС.}$ , используемых в формулах для расчета коэффициентов шлака. При настройке алгоритмов предварительные значения коэффициентов корректировались для достижения оптимального переключения  $N_{PK}$ .

В формуле расчета текущего значения коэффициента шлака, используемого для сравнения с граничными значениями для режима донной продувки  $K_{ШЛАК12}$ , находится как среднее арифметическое значение коэффициентов шлака фаз 1 и 2 (2 и 1 по первичной стороне ПТ), при этом для режима работы аварийной фурмы рассчитывается значение  $K_{ШЛАК23}$  как среднее арифметическое значение коэффициентов шлака фаз 1 и 3 (2 и 3 по первичной стороне ПТ).

## **1.6. Результаты промышленных испытаний усовершенствованных автоматизированных систем управления электрическими и технологическими режимами ДСП и УКП на действующих металлургических предприятиях**

### ***1.6.1 Оценка эффективности разработанной усовершенствованной системы управления электрическим режимом по коэффициенту шлака на примере двухпозиционной УКП***

Несимметричные уставки регулируемого параметра позволяют стабилизировать процесс горения дуги за счет уменьшения ее длины в нестабильной зоне печи, возникающей из-за воздействия на электрическую дугу как зеркала жидкого металла, образуемого в результате аргонной продувки, так и операций подачи материалов в ковш при нагреве. Данные принципы оптимизации электрических режимов УКП являются универсальными и могут применяться на УКП различной мощности и конфигурации, что обуславливает практическую значимость достигнутых в исследовании результатов.

Как было отмечено ранее, на большинстве современных установок УПК управление электрическими режимами осуществляется в ручном режиме, не обеспечивающим необходимую динамическую адаптацию мощности и длины дуг, в зависимости от режима аргонной продувки и состояния шлака. Также для двухпозиционной УКП часто отсутствует адаптация электрических режимов к каждой рабочей позиции агрегата. Таким образом, более точное автоматическое управление электрическими режимами электродуговых установок возможно за счет применения алгоритмов переключения  $N_{ТР}$  и  $N_{РК}$  с динамической адаптацией электрических режимов с использованием информации о высших гармониках дуг, а также подстроенные под конкретные особенности установки. Например, адаптирующиеся под режим аргонной продувки и шлаковый режим.

Для обеспечения оптимальных значений тепловых КПД электрических дуг при изменении режима аргонной продувки и толщины шлака для указанных ранее рабочих кривых  $N_{РК}$  введены различные балансовые коэффициенты  $K_{БАЛ1,2,3}$  к уставкам импеданса  $Z_{2Ф1,2,3}$  вторичного электрического контура УКП. На основании проведенных ранее экспериментальных исследований, описанных в [1.15-1.16], было показано, что для обеспечения стабильного горения дуг и сохранения тепло-

вого КПД при увеличении диаметра зеркала металла, длины дуг, определенные заданием импеданса вторичного электрического контура  $Z_{2Ф.Зад.}$ , в ближайших к зеркалу фазах, должны быть уменьшены, а в фазе, которая находится на удалении от источника возмущений – увеличена. Исходя из этого для коротких дуг ( $N_{PK} = 1$ ) использованы максимально несимметричные длины дуг с  $K_{БАЛ1} = 0,95$ ;  $K_{БАЛ2} = 0,95$ ;  $K_{БАЛ3} = 1,1$ . Для  $N_{PK} = 2$  использованы  $K_{БАЛ1} = 0,96$ ;  $K_{БАЛ2} = 0,96$ ;  $K_{БАЛ3} = 1,08$ . Для  $N_{PK} = 3$  использованы  $K_{БАЛ1} = 0,975$ ;  $K_{БАЛ2} = 0,975$ ;  $K_{БАЛ3} = 1,05$ . Для спокойного режима продувки и нормальной толщины шлака, при которых  $K_{ШЛАК}$  имеет максимальное значение, используется  $N_{PK} = 4$  с  $K_{БАЛ1,2,3} = 1$ . При использовании аварийной фурмы укорачивается длина дуги в фазе 3, ближайшей к зеркалу металла. При этом балансовые коэффициенты для режима горения коротких дуг  $N_{PK} = 6$  равны:  $K_{БАЛ1} = 1,025$ ,  $K_{БАЛ2} = 1,025$ ,  $K_{БАЛ3} = 0,95$ . Для режима горения средних дуг  $N_{PK} = 5$  равны:  $K_{БАЛ1} = 1$ ,  $K_{БАЛ2} = 1,03$ ,  $K_{БАЛ3} = 0,97$ . В режиме длинных дуг и продувке через аварийную фурму  $N_{PK} = 4$   $K_{БАЛ1,2,3} = 1$ , аналогично режиму продувки.

Необходимо отметить, что перед настройкой алгоритмов управления отдельно для каждой УКП были проведены дополнительные экспериментальные исследования по определению предварительных весовых коэффициентов  $K_{ВЕС.}$ , используемых в формулах для расчета коэффициентов шлака. При настройке алгоритмов предварительные значения коэффициентов корректировались для достижения оптимального переключения  $N_{PK}$ .

В формуле расчета текущего значения коэффициента шлака, используемого для сравнения с граничными значениями для режима донной продувки  $K_{ШЛАК12}$ , находится как среднее арифметическое значение коэффициентов шлака фаз 1 и 2 (2 и 1 по первичной стороне ПТ), при этом для режима работы аварийной фурмы рассчитывается значение  $K_{ШЛАК23}$  как среднее арифметическое значение коэффициентов шлака фаз 1 и 3 (2 и 3 по первичной стороне ПТ).

На рис. 1.24 приведены графики, иллюстрирующие фактическую работу усовершенствованных алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых. Предлагаемые технические решения были внедрены в действующее производство, что подтверждается наличием акта внедрения (см. приложение 1.1).

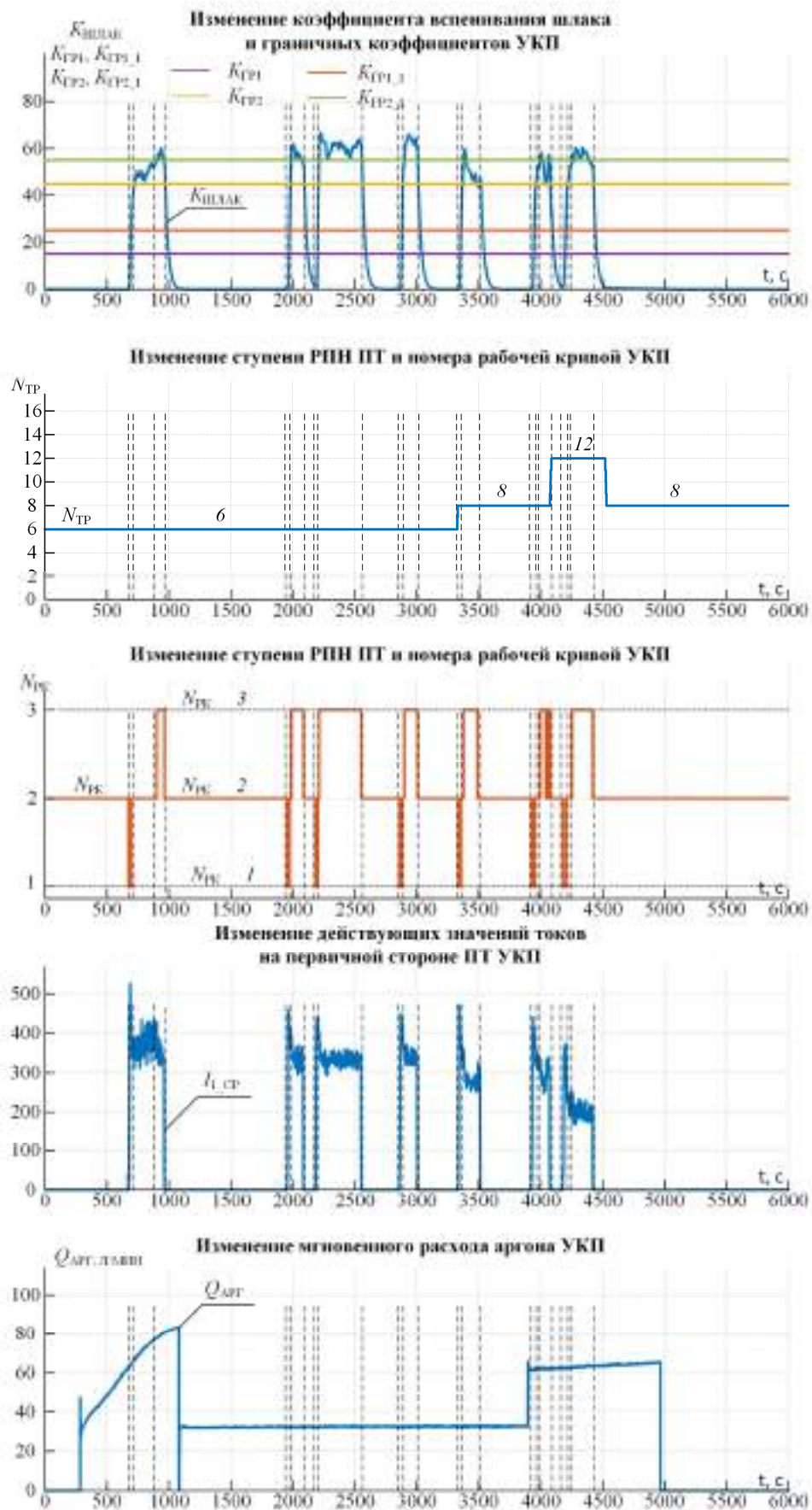


Рис. 1.24. Работа алгоритма автоматического переключения рабочих кривых  $N_{РК}$  в зависимости от уровня коэффициента шлака  $K_{ШЛАК}$  в исследуемом УКП

### ***1.6.2 Оценка эффективности разработанной усовершенствованной системы управления инжекторами УСМ на примере ДСП-1***

Напомним, что основная идея, которая лежит в основе предлагаемого алгоритма автоматического управления РСВ-горелками и инжекторами УСМ, заключается в следующем. При достижении состояния печной ванны, близкой к полному расплавлению твёрдой шихты, наблюдается резкий рост  $K_{ШЛАК}$  вследствие активного шлакообразования [1.15]. Данное событие является критерием для перехода РСВ-горелки из режима горелки в режим фурмы. Далее, по мере снижения содержания углерода в расплаве, а также выхода шлака через рабочее окно, дуги обнажаются, что приводит к резкому снижению величины  $K_{ШЛАК}$ . В этом случае, необходимо включить в работу инжекторы УСМ, а также перевести фурму в режим пониженной интенсивности для обеспечения перемешивания расплава. Блок-схема предлагаемого алгоритма управления была представлена ранее на рис.1.10.

Ниже приведём пошаговое описание работы данного алгоритма в рамках одной характерной плавки ДСП-1 (95 МВА) с указанием реальных параметров:

Начало плавки, подготовка к завалке металлошихты и заливке чугуна. Включение горелок в режиме низкой интенсивности с  $Q_{O_2.ГЛ}=200$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{O_2.ВГ}=100$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{CH_4}=100$  м<sup>3</sup>/ч.

Включение печи, перевод горелок в режим высокой интенсивности с  $Q_{O_2.ГЛ}=550$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{O_2.ВГ}=400$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{CH_4}=450$  м<sup>3</sup>/ч.

Выполнение расчёта средней величины коэффициента шлака  $K_{ШЛАК.СР}$  с применением фильтра скользящей средней с постоянного времени  $T_{\phi}=30$  с.

Проверка выполнения условия  $K_{ШЛАК.СР} > 40$  за период  $t_I=30$  с. В случае, если условие выполняется, РСВ-горелка переводится в режим фурмы высокой интенсивности с  $Q_{O_2.ГЛ}=3500$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{O_2.ВГ}=150$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{CH_4}=150$  м<sup>3</sup>/ч. В ином случае, возврат к расчёту  $K_{ШЛАК.СР}$  и повторная проверка.



Повторение шага 3 алгоритма с последующей проверкой условия  $K_{ШЛАК.СР} < 30$  за период  $t_2=30$  с. В случае, если условие выполняется, осуществляется включение инжектора УСМ, а фурма переводится в режим низкой интенсивности с  $Q_{O_2.ГЛ}=1100$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{O_2.ВТ}=150$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{CH_4}=150$  м<sup>3</sup>/ч.

Для наглядности, на рисунке 1.25 приведены графики, которые отражают ход протекания одной характерной плавки с указанием моментов изменений в режимах работы РСВ-горелок и инжекторов УСМ как для исходного (ручного) режима работы, так и для случая работы нового алгоритма (см. рисунок 1.25.б, где точки 1.1,2.1 – момент перевода горелки в режим высокой интенсивности для нового и исходного режима соответственно; 1.2,2.2 - момент перевода РСВ-горелок в режим фурмы для нового и исходного алгоритма соответственно; 1.3 – момент включения инжекторов УСМ и перевода фурмы в режим низкой интенсивности в новом алгоритме; 2.3 – момент включения инжекторов УСМ в исходном алгоритме).

Анализ характеристик показал, что при ручном алгоритме управления перевод горелки в режим высокой интенсивности был произведён несвоевременно. Время запаздывания составило около 3 минут. Также несвоевременно было произведено переключение РСВ-горелки в режим фурмы. Время запаздывания составило около 2 минут. Отметим, что включение инжектора УСМ было произведено практически своевременно, но в рамках других характерных плавков запаздывание также имело место. При этом отметим, что ручное управление инжекторами является возможным, но в рамках отдельного исследования рекомендуется рассмотреть применение автоматической системы управления с учётом того, что момент её включения в работу определён. Таким образом, использование новый алгоритм управления РСВ-горелками и инжекторами УСМ был внедрён в действующее производство, что подтверждается наличием акта внедрения (см. приложение 1.2).

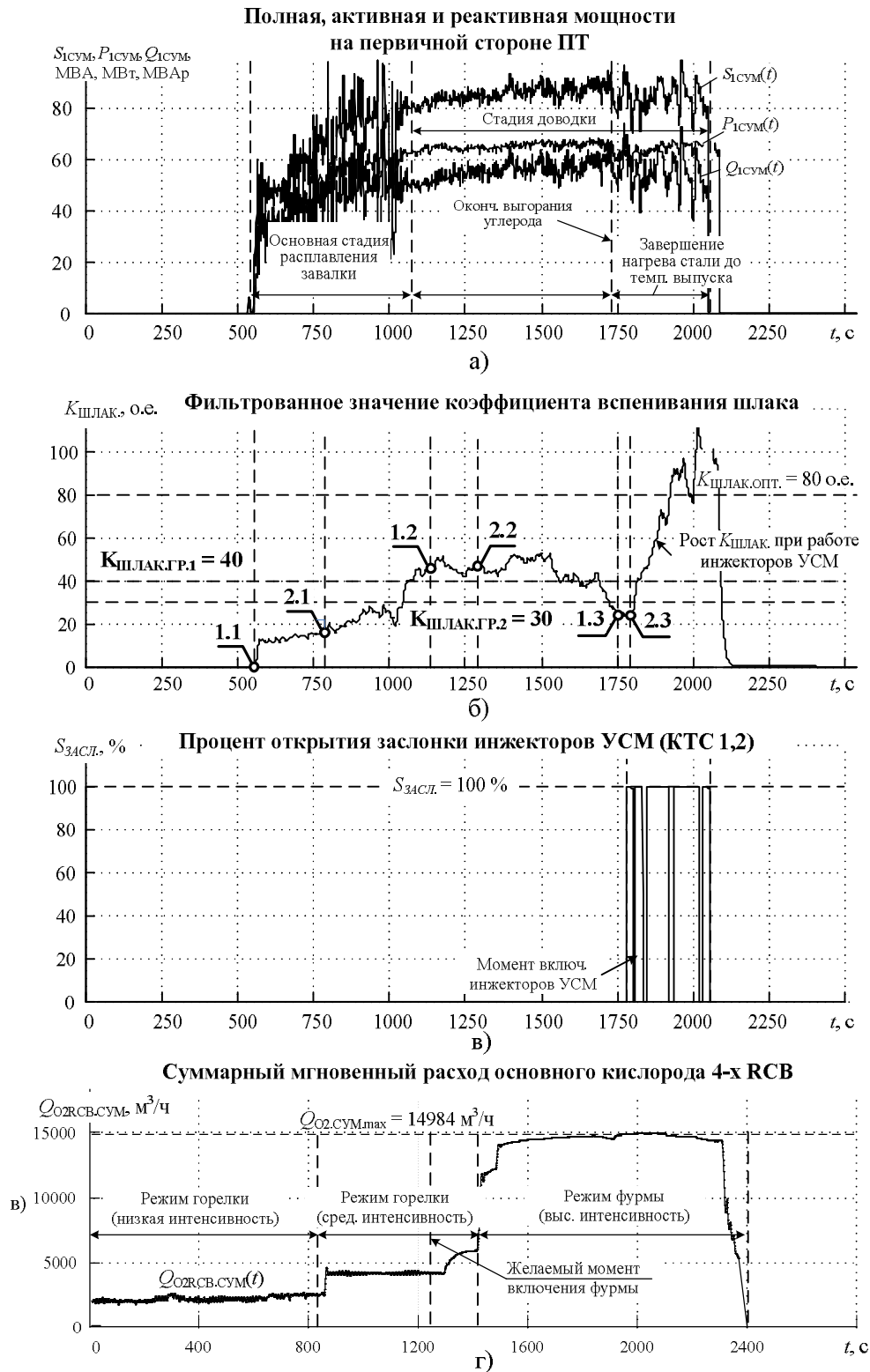


Рис.1.25. Временные характеристики типовой плавки в ДСП-1 (95 МВА): а) Суммарные полная, активная и реактивная мощности  $S_{1СУМ}, P_{1СУМ}, Q_{1СУМ}$ ; б) фильтрованное значение коэффициента шлака  $K_{ШЛАК}$  с  $T_{\Phi}=30$  с; в) процент открытия заслонки инжектора УСМ  $S_{ЗАСЛ.}$ ; г) суммарный мгновенный расход кислорода в 4-х РСВ-горелках  $Q_{O_2.СУМ}$

### *1.6.3 Оценка эффективности применения разработанной методики расчета оптимальных уставок параметра регулирования на примере ШП-125. Разработка методики оценки изменения удельного расхода электроэнергии и электродов.*

Как было сказано ранее, ключевым фактором, влияющим на удельное электропотребление в ДСП и УКП ( $W_{уд}$ ) и удельный расход электродов (УРЭ), является качество настройки системы управления электрическим режимом, включающей в себя систему задания профиля плавки и систему автоматического управления положением электродов. Одной из задач, которая возникла в процессе исследований, является задача проведения адекватной оценки эффективности выполненных мероприятий с точки зрения изменения энергетических показателей работы ДСП и УКП, таких как  $W_{уд}$  и УРЭ.

Основной сложностью в данном случае является правильный учёт влияния технологических факторов в сравниваемых периодах работы электросталеплавильных агрегатов: до и после изменения режимов или замены системы управления. Для ДСП к таким факторам относятся: качество и состав металлошихты, технология шихтовки завалки и подвалок, количество подвалок, количество жидкого чугуна и время его подачи в рабочее пространство печи, влияние технологии производства различных марок стали, режимы работы газоочистки, качество шлакообразующих материалов, режимы электроснабжения и т.д. В свою очередь для УКП основные технологические факторы, влияющие на  $W_{уд}$  это: разное время цикла обработки металла и время работы под током, разные режимы продувки аргоном, влияние состояния футеровки ковша, различная исходная температура жидкого металла перед началом цикла обработки и т.д. Еще необходимо отметить значительное влияние согласованности режимов работы дуговой сталеплавильной печи и машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), которая в значительной степени определяет время нагрева металла в ковше, т.к. в соответствии с технологией производства УКП является промежуточным звеном («буфером») между ДСП и МНЛЗ. Говоря об удельном расходе электродов необходимо учитывать такие факторы как состав металлошихты за-

валки и подвалок на предмет наличия компонентов, повышающих вероятность зависаний шихты в шахте и поломок электродов при обвалах. Помимо этого, выполняется достоверный анализ содержания негабаритного лома в завалке и подвалках.

В данных условиях прямой расчет и последующее сопоставление среднемесячного значения расхода электроэнергии и расхода электродов при оценке эффективности внесённых изменений является некорректным, поскольку не позволяет отразить фактический технический эффект на фоне множества меняющихся технологических факторов. При анализе массивов плавов целесообразно использовать методы статистического, корреляционного и регрессионного анализов с выборкой параметров, имеющих высокую статистическую связь с удельным расходом электроэнергии и электродов.

В настоящее время в научной литературе имеется достаточно много исследований, посвященных регрессионным моделям электропотребления ДСП и УКП, а также оценке изменения удельного расхода электродов от поломок. Однако в данных исследованиях не описаны подходы приведения факторов к наиболее тяжелым условиям работы агрегата в рамках базового и гарантийного периодов. В рамках данного раздела, приводится решение данной задачи.

Рассмотрим ситуации, когда на исследуемом электросталеплавильном агрегате (ДСП или УКП) осуществляется модернизация систем автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов с заменой старого регулятора на новый или на существующем регуляторе выполняется изменение таблиц уставок импедансов вторичного электрического контура  $Z_{23AD}$ , сопротивлений дуг  $R_{д.3AD}$ , параметров нелинейных регуляторов и других вспомогательных блоков, а также корректируются профили плавов, определяющие сочетания ступеней печного трансформатора  $N_{ТР}$ , рабочей кривой  $N_{РК}$  и ступени реактора  $N_{Р}$  (при наличии). Будем считать, что выполненные изменения направлены на достижение технического эффекта по снижению удельного расхода электроэнергии  $W_{уд}$ . После выполнения работ по вводу в эксплуатацию новой системы управления или изменения параметров существующей системы определяется гарантийный период работы электросталеплавильного агре-

гата (ДСП или УКП), длительность которого, как правило, составляет от 1 до 3 месяцев. Также определяется базовый период (период предгарантийных испытаний) аналогичной длительности, при котором электросталеплавильный агрегат работал с исходными электрическими режимами.

Для обоих рассматриваемых периодов времени ведётся сбор необходимой информации об энергетических, технологических и временных параметрах агрегатов в виде паспортов плавов. На основании паспортов всех плавов обозначенных периодов формируются две статистические выборки, включающие в себя основные энергетические, временные и технологические параметры, определенные для каждой плавки. После чего, осуществляется исключение непоказательных плавов. Например, для ДСП при исключении плавов могут применяться следующие правила:

1) три первые плавки после горячих ремонтов футеровки ДСП; 2) три первые плавки после замены подины ДСП; 3) плавки с большим временем цикла более 60 минут; 4) плавки, где время без тока составляет более 20 минут. Для УКП при исключении плавов могут применяться следующие критерии: 1) все плавки с повторными обработками; 2) плавки со стальковшем после ремонта; 3) плавки с использованием аварийной фурмы.

Для полученных выборок с исключенными плавками проводится предварительный корреляционный анализ, который позволяет выявить факторы, оказывающие наибольшую статистическую взаимосвязь с удельным расходом электроэнергии  $W_{уд}$ , рассчитанным на тонну жидкого полупродукта. Основным параметром, отражающим степень линейной статистической взаимосвязи одного фактора с другим, является коэффициент парной корреляции  $r$ , значение которого находится в диапазоне  $r = -1 \div 1$ . Положительные значения  $r$  свидетельствуют о наличии прямой зависимости между параметрами, а отрицательные – об обратной, т.е. увеличение одного параметра сопровождается уменьшением другого, и наоборот.

На основании корреляционного анализа определяются значимые временные и технологические факторы с коэффициентами парной корреляции  $r \geq 0,1$  и составляется уравнение регрессии:

$$W_{уд} = \sum_{i=0}^n (K_i \cdot X_i) + m \cdot X_0, \quad (1.31)$$

где  $X_i$  – значение фактора,  $X_0$  – фиктивная переменная,  $K_i$  – коэффициент уравнения регрессии,  $n$  – количество факторов,  $m$  – коэффициент при фиктивной переменной.

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по методу наименьших квадратов, сущность которого заключается в том, что сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от рассчитанных по уравнению регрессии должна быть минимальна. При нахождении коэффициентов для выборок, соответствующих периодам до и после использования усовершенствованных режимов, уравнение регрессии должно в обоих случаях обеспечивать величину коэффициента детерминации  $R^2 = 0,80 - 0,90$ . При невозможности достижения данной величины уравнение может быть скорректировано за счет добавления (исключения) факторов или за счет введения степенных составляющих.

Далее рассчитываются средние значения факторов для каждого из периодов. На основании этих данных и коэффициентов парной корреляции происходит оценка условий работы агрегата. На данном этапе требуется определить, в каком периоде условия работы были более тяжелыми с точки зрения желаемого технического эффекта по экономии электроэнергии. Для этого оцениваются средние значения параметров с коэффициентом парной корреляции  $|r| \geq 0,5$ . При положительных значениях  $r$  для анализируемого фактора более сложным периодом является тот период, в котором значение временного или технологического фактора больше, а при отрицательных  $r$  наоборот – чем меньше значение, тем сложнее условия. Далее выполняется подстановка средних значений факторов в уравнение регрессии более тяжелого периода. После чего рассчитываются два средних значения удельного расхода электроэнергии на жидкую сталь для предгарантийного ( $W_{уд1.СР}$ ) и гарантийного периодов ( $W_{уд2.СР}$ ). На заключительном этапе выполняется сравнение полученных значений  $W_{уд1.СР}$  и  $W_{уд2.СР}$  и оценивается технический эффект в изменении удельного расхода электроэнергии. Оценка производится на основании следующего выражения:

$$\delta W_{уд} = \frac{W_{уд2.СР} - W_{уд1.СР}}{W_{уд1.СР}} \cdot 100\% \quad (1.32)$$

Для сравнения расчетов полученного эффекта при использовании усовершенствованной методики и методики, основанной на прямом анализе, рассмотрим дуговую сталеплавильную печь шахтного типа ШП-125 (125 тонн, 85 МВА, ПАО «Северсталь», г. Череповец) с системой автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов ArCOS NT. На исследуемой печи в рамках проведения НИОКР была проведена работа по коррекции параметров системы управления ArCOS NT (таблиц уставок импеданса вторичного электрического контура, коэффициентов усиления нелинейных ПИ-регуляторов регуляторов импеданса). Также скорректированы существующие профили плавов. Изменения были направлены на достижение технического эффекта по экономии электроэнергии и электродов. После завершения работ по оптимизации электрических режимов ШП-125 был проведен трехмесячный период гарантийных испытаний, в рамках которого была получена статистическая выборка временных, энергетических и технологических показателей работы ШП-125 с использованием электронных паспортов плавов. Аналогичная выборка была сформирована для трехмесячного периода, предшествующего изменениям параметров системы управления ArCOS NT и профилей плавов.

В соответствии с описанной выше методикой с целью выявления значимых временных и технологических параметров, оказывающих влияние на  $W_{уд}$ , для каждой полученной выборки были рассчитаны корреляционные таблицы с коэффициентами парной корреляции  $r$ , описывающими тесноту статистической связи между  $W_{уд}$  и основными факторами. На основании корреляционного анализа были определены значимые временные и технологические факторы с коэффициентами парной корреляции  $r \geq 0,1$  (таблица 1.10). В таблице 1.10 представлены следующие параметры ШП-125:  $W_{абс.}$  – абсолютный расход электроэнергии;  $t_{рт}$  – время работы под током ШП-125 (125 тонн, 85 МВА);  $t_{цикл}$  – время цикла плавки ШП-125 (125 тонн, 85 МВА);  $Q_{O_2}$  – суммарный расход кислорода;  $K_{шлак}$  – коэффициент вспенивания шлака;  $t_{межпл.}$  – межплавочный период;  $G_{БРУ}$  – вес известняка БРУ ф40-80 мм;  $G_{ЗА}$  – вес скрапа;  $U_{сети}$  – напряжение питающей сети;  $Q_{ГАЗ}$  – суммарный расход газа;  $m_{угля}$  – суммарная масса углеродсодержащих материалов;  $G_{15А}$  – вес стружки 15А;  $G_{OЗ}$  – вес отходов зачистки;

$n_{корз.}$  – количество завалочных бадей;  $G_{ИЮ}$  – вес извести обожженной;  $n_{пл.под.}$  – номер плавки по кампании подины;  $n_{под.зав.}$  – относительное число плавков с подвалкой на завалку;  $G_{чуг.кр}$  – вес жидкого чугуна с весов крана;  $G_{вып.}$  – вес выпускаемого жидкого полупродукта;  $G_{чуг.арм}$  – вес чугуна, задаваемый на АРМ сталевара;  $P_{кд}$  – среднее разряжение после камеры дожига в газоочистительной системе;  $G_{2АШ}$  – вес скрапа 2АШ;  $t_{без.тока}$  – время нахождения ШП-125 (125 тонн, 85 МВА);  $t_{2Ф}$  – суммарное время работы на двух дугах.

Таблица 1. 10

Корреляционный анализ энергетических, временных и технологических факторов, используемых в уравнении регрессии для исследуемой ШП-125 (125 тонн, 85 МВА)

Факторы в уравнении регрессии	Коэффициенты парной корреляции для $W_{уд}$		Факторы в уравнении регрессии	Коэффициенты парной корреляции для $W_{уд}$	
	Предгарантийный период	Гарантийный период		Предгарантийный период	Гарантийный период
$W_{АБС.}$	0,91	0,89	$G_{ОЗ}$	0,11	0,14
$t_{РТ}$	0,72	0,77	$n_{корз.}$	0,1	0,12
$t_{цикл}$	0,47	0,52	$G_{ИЮ}$	0,1	0,12
$Q_{O_2}$	0,34	0,29	$n_{пл.под.}$	-	0,1
$K_{шлак}$	0,33	0,24	$n_{под.зав.}$	-0,2	-0,14
$t_{межпл.}$	0,17	0,24	$G_{чуг.кр}$	-0,35	-0,25
$G_{БРУ}$	-	0,22	$G_{вып.}$	-0,27	-0,26
$G_{ЗА}$	0,2	0,21	$G_{чуг.арм}$	-0,29	-0,28
$U_{сети}$	0,22	0,2	$P_{кд.}$	0,21	-
$Q_{ГАЗ}$	0,21	0,15	$G_{2АШ}$	0,19	-
$m_{угля}$	0,26	0,15	$t_{без.тока}$	-0,12	-
$G_{15А}$	0,16	<b>0,14</b>	$t_{2Ф}$	<b>-0,1</b>	-

На следующем этапе для обеих выборок выполнялся регрессионный анализ, в рамках которого проводилась оценка значимости отдельных факторов по критерию Стьюдента (t-критерий). В результате нескольких итераций для двух анализируемых периодов был определен общий вид уравнения регрессии для двух анализируемых периодов, при котором достигаются максимально возможные значения коэффициента детерминации  $R^2$  и минимальные значения средней квадратической ошибки  $\delta$ .



Подставив данные факторы в уравнение (1.31), получим уравнения регрессии следующего вида:

$$W_{уд.} = a \cdot t_{PT} + b \cdot G_{чуг.кран.} + c \cdot n_{под.зав.} + d \cdot n_{корз.} + e \cdot G_{15A} + f \cdot G_{O_3} + g \cdot G_{вып.} + h \cdot Q_{O_2} + i \cdot Q_{газ} + j \cdot m_{угля} + k \cdot K_{шлак} + l \cdot P_{кд.} + m \cdot U_{сети} + n \cdot t_{межпл.} + o \cdot G_{3A} + p \cdot G_{ио} + q \quad (1.33)$$

где  $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p$  и  $q$  – коэффициенты уравнения регрессии при основных факторах и свободном члене.

Для выборки, соответствующей предгарантийному периоду, применение уравнения регрессии (1.31) обеспечивает максимальное значение  $R^2 = 0,849$ , при этом для гарантийного периода значение  $R^2 = 0,853$ , что является приемлемым уровнем. Далее с использованием известного метода наименьших квадратов определены коэффициенты уравнения регрессии, представленные в таблице 1.11.

Таблица 1.11.

Значение коэффициентов уравнения регрессии для исследуемой ШП-125 (125 тонн, 85 МВА)

Анализируемый период	Коэффициенты уравнения регрессии			
Предгарантийный период	$a = 6,074987$	$b = -0,367484$	$c = -0,823199$	$d = 2,143521$
	$e = 0,088295$	$f = 0,545430$	$g = -1,784728$	$h = 0,001992$
	$i = -0,024066$	$j = 0,000348$	$k = 0,082822$	$l = -0,003845$
	$m = 9,778407$	$n = 0,224838$	$o = -0,106221$	$p = 0,045403$
	$q = -59,208748$			
Гарантийный период	$a = 5,883339$	$b = -0,225621$	$c = 2,696035$	$d = 0,957435$
	$e = 0,141219$	$f = 0,725366$	$g = -1,725222$	$h = -0,001492$
	$i = -0,002236$	$j = 0,002952$	$k = 0,057202$	$l = -0,001098$
	$m = 13,173443$	$n = 0,071665$	$o = -0,052655$	$p = 1,1497$
	$q = -197,336946$			

В соответствии с разработанной методикой расчет удельного расхода электроэнергии для ШП-125 (125 тонн, 85 МВА) для двух временных периодов осуществляется путем подстановки в анализируемые уравнения регрессии средних значений факторов для выборки, соответствующей гарантийному и предгарантийному периодам с исключением плавок согласно утвержденным критериям (таблица 1.12).

Таблица 1.12.

Средние значения энергетических временных и технологических факторов, используемых в уравнении регрессии для исследуемой ШП-125 (125 тонн, 85 МВА)

Предгарантийный период															
$n_{\text{ПОД. ЗАВ. О.Е.}}$	$n_{\text{КОРР. ШТ.}}$	$G_{\text{ЧУГ.КР. Т}}$	$G_{15A, Т}$	$G_{\text{ОЗ. Т}}$	$G_{\text{ВЫП. Т}}$	$Q_{\text{O}_2, \text{М}^3}$	$Q_{\text{ГАЗ. М}^3}$	$m_{\text{УГЛЯ, КГ}}$	$K_{\text{ШЛАК. О.Е.}}$	$P_{\text{КД}}$	$U_{\text{СЕТИ, КВ}}$	$t_{\text{РТ, МИН.}}$	$t_{\text{МЕЖПЛ. МИН.}}$	$G_{\text{ЗА, Т}}$	$G_{\text{ОИ, Т}}$
0,29	2,02	50,3	2,23	0,23	128,43	5553	719,3	453,1	81,6	-880	35,95	35,21	6,61	55,8	0,09
Гарантийный период															
$n_{\text{ПОД. ЗАВ. О.Е.}}$	$n_{\text{КОРР. ШТ.}}$	$G_{\text{ЧУГ.КР. Т}}$	$G_{15A, Т}$	$G_{\text{ОЗ. Т}}$	$G_{\text{ВЫП. Т}}$	$Q_{\text{O}_2, \text{М}^3}$	$Q_{\text{ГАЗ. М}^3}$	$m_{\text{УГЛЯ, КГ}}$	$K_{\text{ШЛАК. О.Е.}}$	$P_{\text{КД}}$	$U_{\text{СЕТИ, КВ}}$	$t_{\text{РТ, МИН.}}$	$t_{\text{МЕЖПЛ. МИН.}}$	$G_{\text{ЗА, Т}}$	$G_{\text{ОИ, Т}}$
<u>0,24</u>	2,02	<u>47,4</u>	<u>3,38</u>	<u>0,35</u>	<u>127,9</u>	<u>5482</u>	720,8	<u>337,6</u>	81,0	-830	35,94	34,21	6,64	<u>59,5</u>	0,16

Следует отметить, что гарантийный период более тяжелый, поскольку в данном периоде присутствуют факторы, которые препятствуют достижению эффекта и повышают удельный расход электроэнергии (в таблице 1.12 выделены подчеркиванием). Средние значения факторов тяжелого периода подставляются в два уравнения регрессии с рассчитанными коэффициентами.

В результате замены системы автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов для исследуемой ШП-125 (125 тонн, 85 МВА) было достигнуто уменьшение значения удельного расхода электроэнергии на тонну жидкой стали на 1,754% (таблица 1.13), что подтверждается актом внедрения (приложение 1.3).

Таблица 1.13.

Анализ изменения удельного расхода электроэнергии ШП-125 (125 тонн, 85 МВА) на жидкую сталь с использованием полученных уравнений регрессии

Анализируемый период	$R^2$ , о.е.	Среднеквадратическая ошибка $\delta$ , %	$W_{\text{УД.СР. КВТ} \cdot \text{Ч/Т}}$	Относительное изменение $\delta W_{\text{УД.СР.}}$ , %
Предгарантийный период	0,849	3,171	251,57	—
Период гарантийных испытаний	0,853	3,187	247,15	<b>-1,754</b>

Прямой сравнительный анализ контролируемых показателей ШП-125 (125 тонн, 85 МВА), описанный в методике оценки эффективности режимов, показал, что при использовании усовершенствованных электрических режимов была достигнута экономия электроэнергии на 1% (таблица 1.14).

Таблица 1.14.

Сравнительный анализ удельного расхода электроэнергии для ШП-125 (125 тонн, 85 МВА) за периоды предгарантийный и гарантийных испытаний (прямое сопоставление)

Наименование показателя	Значение показателя $W_{уд.ср.}$ , кВт·ч/т		
	Предгарантийный период	Гарантийный период	Относит. изменение, %
Удельный расход электроэнергии на жидкую сталь	251,63	249,12	<b>-1,000</b>

Исходя из этого можно сказать, что прямой технический эффект требует дополнительных уточнений, поскольку гарантийный период имел более тяжелые условия работы.

Анализ изменения удельного расхода электродов после коррекции электрических режимов производится для аналогичных периодов времени, что и для расчета удельного расхода электроэнергии. Поскольку замена электродов происходит не на каждой плавке, то при анализе УРЭ получается ограниченная выборка по сравнению с выборкой для анализа удельного расхода электроэнергии. Для повышения объема выборки предлагается применение нового подхода с использованием кластеров. Суть данного подхода заключается в том, что берется кластер, который включает в себя период от установки электрода до следующей его замены. По этому кластеру эквивалентируются значения энергетических, временных и технологических показателей и составляется выборка повышенной размерности.

Далее осуществляется корреляционный анализ, в котором определяются значимые временные и технологические факторы, по методу наименьших квадратов определяются коэффициенты уравнения регрессии, рассчитываются средние значения факторов. После этого выполняется расчет удельных значе-

ний расхода электродов от поломок УРЭ [кг/т] для двух анализируемых периодов времени в соответствии со следующим выражением:

$$УРЭ = \frac{РЭП}{ПП} = \frac{n_{ЭЛ.ПОЛОМ} \cdot G_{ЭЛ.СР.}}{ПП}, \quad (1.34)$$

где  $РЭП$  – абсолютный расход электродов от поломок за анализируемый период [кг];  $n_{ЭЛ.ПОЛОМ.}$  – количество сломанных электродов за анализируемый период [шт.];  $G_{ЭЛ.СР.}$  – средний вес одного электрода [кг];  $ПП$  – объем производства жидкого полупродукта за анализируемый период [т].

На заключительном этапе производится сравнение значений  $УРЭ_1$  и  $УРЭ_2$ , оценивается технический эффект в изменении удельного расхода электродов от поломок. Оценка производится на основании следующего выражения:

$$\delta УРЭ = \frac{УРЭ_2 - УРЭ_1}{УРЭ_1} \cdot 100\%. \quad (1.35)$$

Для уточненной оценки удельного расхода электродов с учетом неодинаковых производственных показателей в рассматриваемых периодах, согласно разработанной методике, формируется кластерная выборка, на основании которой с помощью регрессионного анализа выполняется сравнение удельного расхода электродов по основному используемому производителю. Следует отметить, что выбор факторов для регрессионного анализа осуществляется на основании корреляционного анализа доступных параметров, входящих в выборки.

В таблице 1.15 представлены следующие параметры ШП-125:  $t_{РТ}$  – время работы под током ШП-125 (125 тонн, 85 МВА);  $t_{ЦИКЛ}$  – время цикла плавки ШП-125 (125 тонн, 85 МВА);  $N_{ПОЛОМ.}$  – относительное количество кластеров с поломками электродов;  $W_{УД.}$  – удельный расход электроэнергии, рассчитанный относительно веса жидкого полупродукта;  $N_{УСТ.РЕЗ.}$  – относительное число кластеров, где выполнялась установка стволов из резерва без наращивания;  $t_{2Ф}$  – суммарное время работы на двух дугах;  $G_{СТ}$  – вес стружки после лаборатории;  $Q_{O_2}$  – суммарный расход кислорода;  $W_{АБС.}$  – абсолютный расход электроэнергии;  $Q_{ГАЗ}$  – суммарный расход газа;  $U_{СЕТИ}$  – напряжение питающей сети;  $T_{ВЫП}$  – температура металла на выпуске;  $Q_{ЧУГ.ЧУШ.}$  – вес твердого чугуна;  $G_{O_3}$  – вес отходов зачистки;  $G_{ВЫП.}$  – вес выпускаемого жидкого полупродукта;  $P_{КД}$  – среднее разряжение после камеры дожига в газоочистительной системе;  $G_{6А}$  – вес

скрапа бА;  $N_{КОРЗ}$  – количество завалочных бадей;  $n_{ПЛ.ПОД}$  – номер плавки по кампании подины;  $G_{ЧУГ.АРМ}$  – вес чугуна, задаваемый на АРМ сталевара;  $K_{ШЛАК}$  – коэффициент вспенивания шлака;  $m_{УГЛЯ}$  – суммарная масса углеродсодержащих материалов;  $G_{ЧУГ.КР}$  – вес жидкого чугуна с весов крана;  $N_{ПОД.ЗАВ.}$  – относительное количество плавов в кластерах с подвалкой на завалку;  $G_{ВЫП.}$  – вес выпускаемого жидкого полупродукта;  $N_{ПЛ.КЛ.}$  – число плавов в кластере;  $t_{МЕЖПЛ.}$  – межплавочный период.

Таблица 1.15.

Корреляционный анализ энергетических, временных и технологических факторов, используемых в уравнении регрессии для исследуемой ШП-125

Факторы в уравнении регрессии	Коэффициенты парной корреляции для $W_{уд}$		Факторы в уравнении регрессии	Коэффициенты парной корреляции для $W_{уд}$	
	Предгарантийный период	Гарантийный период		Предгарантийный период	Гарантийный период
$t_{РТ}$	0,38	0,35	$G_{ОЗ}$	0,18	0,13
$t_{ЦИКЛ}$	0,33	0,3	$P_{КД}$	0,12	0,13
$N_{ПОЛОМ.}$	0,19	0,25	$Q_{6А}$	-	0,11
$W_{уд}$	0,22	0,24	$N_{КОРЗ.}$	-	-0,1
$N_{УСТ.РЕЗ.}$	0,5	0,23	$n_{ПЛ.ПОД.}$	-0,11	-0,12
$t_{2Ф}$	0,09	0,22	$G_{ЧУГ.АРМ}$	-0,15	-0,14
$G_{СТ}$	0,17	0,19	$K_{ШЛАК}$	-0,16	-0,14
$Q_{O_2}$	0,17	0,19	$m_{УГЛЯ}$	-0,16	-0,17
$W_{АБС.}$	0,13	0,18	$G_{ЧУГ.КР}$	-0,18	-0,18
$Q_{ГАЗ}$	0,15	0,18	$N_{ПОД.ЗАВ.}$	-0,18	-0,19
$U_{СЕТИ}$	0,21	0,18	$G_{ВЫП.}$	-0,22	-0,23
$T_{ВЫП}$	0,17	0,17	$N_{ПЛ.КЛ.}$	-0,31	-0,47
$Q_{ЧУГ.ЧУШ.}$	-	0,14	$t_{МЕЖПЛ.}$	0,11	-

На следующем этапе для обеих выборок произведен регрессионный анализ, в рамках которого проводилась оценка значимости отдельных факторов по критерию Стьюдента (t-критерий). В результате нескольких итераций для двух анализируемых периодов был определяется общий вид уравнения регрессии, при котором достигаются максимально возможные значения коэффициента детерминации  $R^2$  и минимальные значения средней квадратической погрешности  $\delta$ . Подставив данные факторы в уравнение (1.31), получим уравнения регрессии следующего вида:

$$\begin{aligned}
 YPЭ = & a \cdot N_{\text{ПЛ.КЛ.}} + b \cdot N_{\text{УСТ.РЕЗ.}} + c \cdot N_{\text{ПОЛОМ.}} + \\
 & + d \cdot N_{\text{ПОД.ЗАВ.}} + e \cdot G_{\text{ЧУГ.КР.}} + f \cdot G_{\text{СТ.}} + g \cdot G_{\text{ВЫП.}} + h \cdot W_{\text{УД}} + i \cdot Q_{\text{O}_2} + j \cdot Q_{\text{ГАЗ}} + \\
 & (1.36) \\
 & + k \cdot m_{\text{угля}} + l \cdot K_{\text{шлак}} + m \cdot P_{\text{КД}} + n \cdot n_{\text{ПЛ.ПОД}} + \\
 & + o \cdot t_{\text{РТ}} + p \cdot U_{\text{сети}} + q
 \end{aligned}$$

где  $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p$  и  $q$  – коэффициенты уравнения регрессии при основных факторах и свободном члене.

Для выборки, соответствующей предгарантийному периоду, применение уравнения регрессии обеспечивает максимальное значение  $R^2 = 0,548$ , при этом для гарантийного периода значение  $R^2$  равно 0,521, что является приемлемым уровнем.

Также по методу наименьших квадратов определены коэффициенты уравнения регрессии, представленные в таблице 1.16.

Таблица 1.16.

Значение коэффициентов уравнения регрессии для исследуемой ШП-125 (125 тонн, 85 МВА)

Анализируемый период	Коэффициенты уравнения регрессии			
Предгарантийный период	$a = 0,04030892$	$b = 0,61650323$	$c = 0,10990702$	$d = -0,0812623$
	$e = -0,0030575$	$f = 0,20071964$	$g = -0,0245931$	$h = 0,00515139$
	$i = 0,00004335$	$j = 0,00085868$	$k = -0,0001832$	$l = -0,00774091$
	$m = 0,0000153$	$n = -0,0000341$	$o = 0,07519274$	$p = 0,06552081$
	$q = -1,73620717$			
Гарантийный период	$a = -0,0517216$	$b = 0,37825712$	$c = 0,43651362$	$d = -0,1336353$
	$e = -0,0050205$	$f = 0,32242139$	$g = -0,0117354$	$h = 0,00383856$
	$i = 0,00006218$	$j = 0,00002299$	$k = -0,0002113$	$l = -0,01665654$
	$m = 0,0000419$	$n = -0,0001547$	$o = 0,01696680$	$p = 0,10761777$
	$q = -1,17900127$			

В соответствии разработанной методикой расчет удельного расхода электродов для ШП-125 (125 тонн, 85 МВА) для двух временных периодов осуществляется путем подстановки в анализируемые уравнения регрессии средних значений факторов для выборки, соответствующей гарантийному и предгарантийному периодам с исключением плавков (таблица 1.17).

Таблица 1.17.

Средние значения энергетических временных и технологических факторов, используемых в уравнении регрессии для исследуемой ШП-125 (125 тонн, 85 МВА)

Предгарантийный период															
$УРЭ$ , кг/т	$N_{ПЛ.КЛ}$ , шт	$N_{УСТ.РЕЗ.}$ , о.е.	$N_{ПОЛОМ.}$ , о.е.	$N_{ПОД.ЗАВ}$ , о.е.	$G_{ЧУГ.КР.}$ , т	$G_{СТ.}$ , т	$W_{УД}$ , кВт·ч/т	$Q_{O_2}$ , м <sup>3</sup>	$Q_{ГАЗ}$ , м <sup>3</sup>	$m_{УГЛЯ}$ , кг	$K_{ШЛАК}$ , о.е.	$P_{КД}$	$n_{ПЛ.ПОД}$	$t_{РТ}$ , мин.	$U_{СЕТИ}$ , кВ
1,22	11,6	0,18	0,02	0,35	50,53	0,04	251,4	5620	732,8	463	55,02	-882	582	35,4	36,2
Гарантийный период															
$УРЭ$ , кг/т	$N_{ПЛ.КЛ}$ , шт	$N_{УСТ.РЕЗ.}$ , о.е.	$N_{ПОЛОМ.}$ , о.е.	$N_{ПОД.ЗАВ}$ , о.е.	$G_{ЧУГ.КР.}$ , т	$G_{СТ.}$ , т	$W_{УД}$ , кВт·ч/т	$Q_{O_2}$ , м <sup>3</sup>	$Q_{ГАЗ}$ , м <sup>3</sup>	$m_{УГЛЯ}$ , кг	$K_{ШЛАК}$ , о.е.	$P_{КД}$	$n_{ПЛ.ПОД}$	$t_{РТ}$ , мин.	$U_{СЕТИ}$ , кВ
1,18	11,8	<u>0,25</u>	<u>0,1</u>	<u>0,29</u>	<u>47,72</u>	0,05	247,37	5512	731,5	<u>335,6</u>	<u>56,27</u>	823	705	35,2	34,8

Так же, как и в случае с удельным расходом электроэнергии, следует отметить, что гарантийный период более тяжелый, поскольку в данном периоде присутствуют факторы, которые препятствуют достижению эффекта и повышают удельный расход электроэнергии (в таблице 1.17 выделены подчеркиванием). Средние значения факторов тяжелого периода подставляются в два уравнения регрессии с рассчитанными коэффициентами.

В результате изменения настроек действующей системы автоматического управления электрическими режимами и перемещение электродов для исследуемой ШП-125 (125 тонн, 85 МВА) в соответствии с методикой, было достигнуто уменьшение значения удельного расхода электродов на тонну жидкой стали на 2,56% (таблица 1.18), что подтверждается актом внедрения (приложение 1.3).

Таблица 1.18.

Анализ изменения удельного расхода электродов для ШП-125 (125 тонн, 85 МВА) с использованием полученных уравнений регрессии

Анализируемый период	Коэф. детерминации $R^2$	Ср. уд. расход электродов по уравнению регрессии $УРЭ_{СР}$ , кг/т	Относительное изменение $\delta УРЭ_{СР}$ , %
Предгарантийный период	0,548	1,147	—
Гарантийный период	0,521	1,118	<b>-2,56</b>
Изменение удельного расхода электродов при прямом сравнении показателей $УРЭ$ на жидкую сталь по конечным кластерным выборкам без учета влияния технологических факторов			<b>-3,59</b>

## **2. РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕГЛАМЕНТИРОВАННОГО ПАРАМЕТРА ШЕРОХОВАТОСТИ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ФРИКЦИОННЫМИ УСЛОВИЯМИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ. ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПЫТАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**2.1. Разработка математической модели процесса и режимов формирования параметров шероховатости поверхностей узлов трения металлургических механизмов**

*2.1.1 Разработка математической модели процесса и режимов формирования параметров шероховатости поверхностей узлов трения металлургических механизмов методом нанесения покрытий гибким инструментом – брашинг*

Технология плакирования гибким инструментом требует сбалансированного подбора многих конструктивных и технологических параметров. В различной степени на стабильность процесса нанесения равномерного сплошного покрытия оказывают влияние конструктивные (диаметр и ширина щетки, диаметр, длина и плотность набивки ворса); технологические (частота вращения щетки, скорость перемещения обрабатываемого изделия, натяг, время обработки) и термодинамические (температура в зоне контакта ворса с поверхностью, температура и свойства материала покрытия и обрабатываемой детали и др.) факторы.

В основу математической модели положена геометрия контакта гибких элементов (ворсинок) вращающейся металлической щетки с плоской поверхностью. При этом были приняты следующие допущения и начальные условия: каждая последующая ворсинка, идущая за контактирующей в данный момент



времени, не снимает только что нанесенный материал покрытия; разогрев материала-донора до температуры, необходимой для начала процесса сцепления частиц материала-донора с ворсинками щетки и равной (0,7–0,8) температуры плавления материала-донора, обеспечивается при усилии прижатия материала-донора к ворсу щетки 20–40 Н; коэффициент использования материала-донора равен  $K_{исп} = 0,85–0,9$ ; шероховатость поверхности в результате лакирования не ухудшается; относительная сплошность покрытия определяется количеством ворсинок щетки и числом их взаимодействий с поверхностью за один проход щетки.

Для вывода математической зависимости рассмотрим металлическую щетку с равномерно распределенным по периметру ворсом, обрабатывающую плоскую металлическую поверхность, которая перемещается сонаправленно скорости движения ворса на участке контактирования его с поверхностью (рисунок 2.1) [2.1-2.3].

Обозначим геометрические параметры щетки:  $r$  – радиус щетки, мм;  $b$  – ширина щетки, мм;  $d_{в}$  – диаметр ворса, мм;  $l_{в}$  – длина ворса щетки, мм;  $n_{в}$  – число ворсинок щетки.

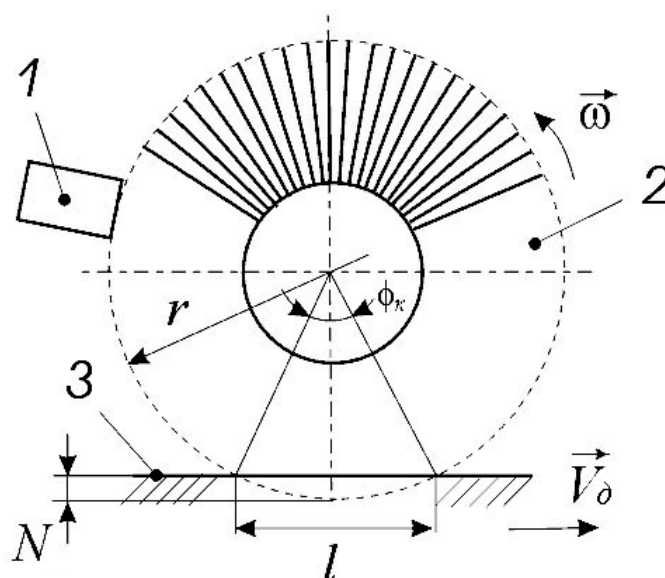


Рисунок 2.1 - Расчетная схема процесса нанесения покрытия:

1 – брусок из материала покрытия, 2 – металлическая щетка, 3 - обрабатываемая поверхность

Параметры процесса:  $\omega$  – угловая скорость вращения щетки, рад/с;  $V_d$  – скорость перемещения обрабатываемой детали, мм/с;  $N$  – натяг (величина относительного сближения между щеткой и поверхностью детали), мм.

### **Определение оптимальной скорости перемещения обрабатываемой детали**

Оптимальную скорость скольжения ворса по поверхности детали можно определить из того условия, что каждая последующая ворсинка, идущая за контактирующей в данный момент времени, не должна снимать только что нанесенный материал покрытия.

Учитывая, что  $N \ll l_B$ , время контакта  $t_k$  ворсинки с поверхностью можно определить по формуле:

$$t_k = \frac{\varphi_k}{\omega}, \quad (2.1)$$

где  $\varphi_k$  – угол контакта ворса с обрабатываемой поверхностью, рад;

$\omega$  – угловая скорость вращения щетки, рад/с.

Из геометрических соображений  $\varphi_k$  можно определить, как:

$$\varphi_k = 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{N}{r}\right), \quad (2.2)$$

где  $N$  – натяг, мм;

$r$  – радиус щетки, мм.

При условии неподвижности обрабатываемой поверхности путь  $l$  скольжения ворсинки по поверхности будет равен:

$$l = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot N - N^2}. \quad (2.3)$$

Определим время  $\tau$ , с которым входят в контакт ворсинки, находящиеся на одной линии атаки по отношению к обрабатываемой поверхности. За время  $\tau$  свободный конец ворсинки проходит путь  $a$ , равный расстоянию между цен-

трами кончиков соседних ворсинок.

Площадь контактирующей поверхности щетки, на которую в среднем приходится один кончик ворсинки, приблизительно равна:

$$S_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot b}{n_B},$$

где  $r$  – радиус щетки, мм;

$b$  – ширина щетки, мм;

$n_B$  – число ворсинок щетки.

Представив площадь  $S_1$  в виде квадрата, приблизительно определим расстояние  $a$ :

$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot b}{n_B}}. \quad (2.4)$$

Зная угловую скорость вращения щетки и принимая во внимание, что  $a \ll r$ , находим:

$$\tau = \frac{a}{\omega \cdot r}. \quad (2.5)$$

Подставляя (2.4) в (2.5), после сокращений получаем:

$$\tau = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot b}{n_B \cdot r}}}{\omega}. \quad (2.6)$$

Составим уравнение для определения оптимальной скорости перемещения обрабатываемой детали  $V_d$ . Следующая за первой ворсинка, выходя из контакта с поверхностью, одновременно должна «догнать» точку соударения первой ворсинки о перемещающуюся поверхность. Принимая за начало времени момент вхождения первой ворсинки в контакт, получим:

$$t_K + \tau = \frac{l}{V_d},$$

откуда находим искомую скорость перемещения изделия:

$$V_{\text{д}} = \frac{l}{t_{\text{к}} + \tau}. \quad (2.7)$$

Подставляя (2.1)–(2.3), (2.6) в (2.7), окончательно получаем выражение для определения оптимальной скорости перемещения детали [2.2]:

$$V_{\text{д}} = \frac{\omega \sqrt{2 \cdot r \cdot N - N^2}}{\arccos\left(1 - \frac{N}{r}\right) + \sqrt{\frac{\pi \cdot b}{2 \cdot n_{\text{в}} \cdot r}}}. \quad (2.8)$$

### Определение оптимального времени обработки

Оптимальным будем называть время обработки  $t_{\text{опт}}$ , необходимое для образования покрытия с заданной сплошностью  $\lambda$ . Абсолютно сплошному покрытию соответствует  $\lambda = 1$ .

В единицу времени имеем новых соударений  $f$ :

$$f = \frac{n_{\text{в}} \cdot \omega}{2 \cdot \pi}. \quad (2.9)$$

Обработанной за одно взаимодействие ворсинки с поверхностью будем считать площадь прямоугольника  $S_{\text{акт}}$ , ширина которого равна диаметру рабочих элементов инструмента (ворса)  $d_{\text{в}}$ , а длина – длине контакта ворса  $l_{\text{с}}$ :

$$S_{\text{акт}} = d_{\text{в}} \cdot l_{\text{с}}. \quad (2.10)$$

Для построения математической модели процесса разобьем всю обрабатываемую поверхность на некоторое число таких элементарных квадратов, чтобы  $\Delta S \ll S_{\text{акт}}$ .

При равномерной плотности набивки ворса щетки и постоянной скорости обработки с достаточной степенью точности можно предположить, что вероятность попадания ворса щетки за время обработки на каждом участке  $\Delta S$  поверхности  $S_{\text{обр}}$  будет одинаковой.

Количество  $m$  таких участков на площади  $S_{\text{обр}}$  будет равным:

$$m = \frac{S_{\text{обр}}}{\Delta S}. \quad (2.11)$$

Таким образом, за одно взаимодействие ворса с поверхностью покрывается следующее количество  $p$  элементарных квадратов:

$$p = \frac{S_{\text{акт}}}{\Delta S}. \quad (2.12)$$

Для определения площади поверхности, обработанной в данный момент времени, необходимо сосчитать количество попаданий на необработанный участок  $n_{\text{необр}}$ . Тогда, учитывая (2.11), текущая площадь покрытия  $S_{\text{покр}}$  определится как:

$$S_{\text{покр}} = n_{\text{необр}} \cdot m. \quad (2.13)$$

Сплошность  $\lambda$  покрытия на обрабатываемой поверхности, учитывая (2.11) и (2.13):

$$\lambda = \frac{S_{\text{покр}}}{S_{\text{обр}}} = \frac{n_{\text{необр}}}{\Delta S}. \quad (2.14)$$

С другой стороны, число взаимодействий  $N_{\text{взаим}}$  за время  $t$  можно найти, используя формулу (2.9):

$$N_{\text{взаим}} = f \cdot t = \frac{n_{\text{в}} \cdot \omega \cdot t}{2 \cdot \pi}.$$

Откуда необходимое время обработки:

$$t = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_{\text{взаим}}}{n_{\text{в}} \cdot \omega}. \quad (2.15)$$

На основании полученных зависимостей разработано программное обеспечение, обеспечившее возможность проведения имитационного моделирования процесса нанесения покрытия [2.4, 2.5]. При моделировании процесса удобно оперировать числом взаимодействий ворса. Исходя из того, что время обработки определяется коэффициентом заполнения поверхности покрытием,

очевидно, что после каждого взаимодействия ворса инструмента с поверхностью необходимо сравнивать текущую сплошность покрытия с заданной. После нахождения требуемого числа взаимодействий  $N_{\text{взаим}}$  определялось искомое время  $t$  по формуле (2.15).

На рис. 2.2 приведены участки покрытий, полученные в результате проведения реального эксперимента и путем моделирования. Сплошность покрытия, полученного в реальном эксперименте, практически совпадает с расчетной, что подтверждает адекватность разработанной модели.

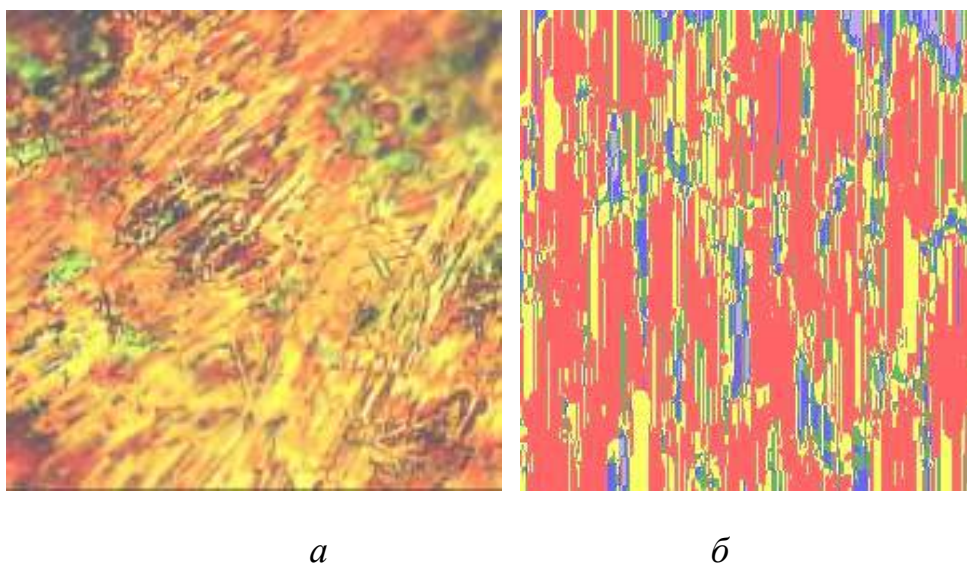


Рисунок 2.2. Участки реального (а) и смоделированного (б) покрытия ( $\lambda = 80 \%$ )

### ***2.1.2 Разработка математической модели процесса и режимов формирования параметров шероховатости поверхностей узлов трения металлургических механизмов методом создания адсорбционного монослоя***

Эмпирическая математическая модель процесса и режимов формирования параметров шероховатости методом создания адсорбционного монослоя получена для разработанного способа обработки поверхности [2.6]. Данный способ обработки относится к области технологии машиностроения, в частности к отделочно-упрочняющей обработке деталей машин и может быть использовано для повышения качества поверхностного слоя заготовки.

Отделочно-упрочняющая обработка заключается в пластическом деформировании поверхностного слоя деталей роликами, шариками, алмазными инденторами. При отделочно-упрочняющей обработке наблюдается пластическое деформирование всех исходных микронеровностей, их значительное уменьшение, а также пластическое деформирование исходных волн и уменьшение последних, макроотклонение практически не изменяется, увеличивается упрочнение и появляются остаточные напряжения [2.7].

Известен способ упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием, в котором осуществляют обкатку поверхности детали роликом с усилием, определяемым аналитически исходя из механических свойств материала детали [2.8].

Недостатком данного способа является сложность процесса, заключающаяся в большом количестве проходов (10-12) инструмента, и необходимости совершения технологического перехода для достижения требуемого качества поверхности заготовки.

Наиболее близким к заявляемому способу является способ упрочняющей обработки поверхностей деталей выглаживанием заключающийся в многократных проходах выглаживателя по заготовке, выполненного из мелкодисперсного кубического нитрида бора с цилиндрической формой заточки с принудительным охлаждением рабочей зоны сухим воздухом или инертным газом [2.9].

Недостатком указанного способа является сложность восстановления формы выглаживателя в результате износа, а после его восстановления требуется внесение корректив в технологические режимы обработки.

Техническая проблема предлагаемого изобретения заключается в создании способа отделочно-упрочняющей обработки выглаживанием цилиндрических поверхностей, роликом, позволяющим повысить качество обработки деталей, производительность процесса, а также улучшить технико-экономические показатели процесса.

Технический результат заключается в образовании адсорбционного антифрикционного мономолекулярного слоя, снижение возникновения задиров и наплывов перед инструментом на обрабатываемой поверхности.

Поставленная проблема решается тем, что в предлагаемом способе отделочно-упрочняющей обработки выглаживанием цилиндрических поверхностей, включающем движение выглаживателя с индентором с цилиндрической формой заточки по поверхности механически обработанной заготовки с установленной нагрузкой, согласно изобретению в качестве индентора используют ролик из конструкционной стали, при этом осуществляют подачу смазочного материала в место контакта ролика и заготовки, а нагрузку на ролик устанавливают в соответствии с выражением:

$$P = 1,15 \cdot n_{\sigma} \cdot n_b \cdot \sigma_{\epsilon} \cdot F, \quad (2.16)$$

где  $n_{\sigma}$  – коэффициент (3,46-4,19);

$n_b$  - коэффициент (0,5-0,96);

$\sigma_{\epsilon}$  –предел прочности материала заготовки при температуре 850 °С;

$F$  – номинальная площадь контакта ролика с деталью.

Коэффициенты  $n_{\sigma}$  и  $n_b$  выбираются на основе  $\sigma_{\epsilon}$  предела прочности материала заготовки при температуре 850<sup>0</sup>С, рассчитанного в соответствии [2.10]:

- при  $70 \leq \sigma_{\epsilon}, \text{МПа} \leq 80$  коэффициент  $n_{\sigma} = 4,08$ ,  $n_b = 0,7$ ;
- при  $81 \leq \sigma_{\epsilon}, \text{МПа} \leq 90$  коэффициент  $n_{\sigma} = 3,93$ ,  $n_b = 0,93$ ;
- при  $91 \leq \sigma_{\epsilon}, \text{МПа} \leq 98$  коэффициент  $n_{\sigma} = 3,64$ ,  $n_b = 0,51$ ;
- при  $\sigma_{\epsilon} > 98, \text{МПа}$  коэффициент  $n_{\sigma} = 3,51$ ,  $n_b = 0,64$ .

Сущность способа заключается в следующем: давящий ролик, выполненный из конструкционной стали обыкновенного качества, имеющий цилиндрическую геометрическую форму, насажен на свободно вращающийся вал, после чего заготовке сообщают вращающий момент, далее производят нагруже-



ние давилъного ролика вручную или механизированным способом с помощью нажимного винта, при этом давилъный ролик получает вращение за счет действия сил трения. Прикладываемую нагрузку выбирают расчетным путем согласно выражению, руководствуясь механическими свойствами материала заготовки, а также коэффициентами  $n_{\sigma}$  и  $n_{\nu}$ . После создания требуемой нагрузки подается расчетное количество смазочного материала капельным методом на поверхность давилъного ролика под углом  $30^{\circ}$  к вертикальной плоскости его поперечного сечения. В качестве смазочного материала используют масла индустриальные минеральные марок И-20, И-40, И-50 в соответствии с ГОСТ 20799-88.

Для повышения эффективности обработки перед работой давилъный ролик подают в поперечном направлении до создания натяга 0,1-0,8 мм. Диаметр давилъного ролика выбирают из конструктивных соображений. С увеличением диаметра давилъного ролика растет контактная площадь с обрабатываемой заготовкой и одновременным падением контактной нагрузки на единицу площади контакта при условии постоянства нагрузки, а также растут изгибающие моменты, действующие на валы.

Заявленный способ отделочно-упрочняющей обработки выглаживанием цилиндрических поверхностей осуществляется за счет подачи смазочного материала на поверхность давилъного ролика, который вращаясь, переносит его в контакт системы «давилъный инструмент-обрабатываемая заготовка». Смазочный материал в контакте фрикционной пары, характеризующейся высокими контактными напряжениями, создает мономолекулярный антифрикционный слой, который формируется одновременно на обрабатываемой заготовке и на давилъном ролике и объясняется следующим образом: первой стадией взаимодействия смазочного материала с рабочими поверхностями контактирующих деталей является физическая адсорбция молекул смазочного материала на этих поверхностях [2.11]. При этом на поверхность твердого тела попадают преимущественно молекулы того компонента среды, который обеспечивает наибольшее сни-

жение межфазного поверхностного натяжения. Более полярные молекулы вытесняют из адсорбционного слоя менее полярные молекулы (конкурентная адсорбция). Адсорбированные молекулы покрывают поверхность слоем толщиной в одну молекулу (мономолекулярным слоем). Полностью заполненный слой четко ориентирован, поскольку каждая молекула направлена активной (полярной) группой (или группами, если их несколько) к поверхности раздела фаз, а углеводородным радикалом (или радикалами) при полностью заполненном (насыщенном) адсорбционном слое - почти по нормали к поверхности раздела фаз в направлении объема среды. Активная концевая группа обеспечивает адсорбированной молекуле хорошую адгезию к подложке. [2.12]

Особенностью способа является то, что отделочно-упрочняющая обработка заготовки достигается за счет формирования тонкого мономолекулярного слоя, образованного смазочным материалом на контакте системы «давильный инструмент-обрабатываемая заготовка», через который происходит упругое взаимодействие данной системы без образования металлического контакта (без взаимного соприкосновения металлических поверхностей) и подаваемым в объеме, определенном экспериментально из проведенных исследований.

Пример осуществления способа.

Металлическую заготовку, выполненную из Стали 45 ГОСТ 1050-88, цилиндрической формы диаметром 55 мм и высотой 40 мм устанавливали на вал и сообщали ей вращающий момент при 500 об/мин. Давильный ролик диаметром 35 мм изготовленный из конструкционной стали обыкновенного качества Ст 3 ГОСТ 380-2005 прижимали к заготовке с силой  $P = 1,15 \cdot 4,08 \cdot 0,7 \cdot 78 \cdot 3,31 = 850$  Н, при этом подавали смазочный материал в объеме 0,08 л/мин. В результате получили деталь со следующими характеристиками: шероховатость после проведения обработки составила  $Ra=0,048-0,067$  мкм, упрочнение поверхности по сравнению с исходной увеличилось на 10%, улучшились геометрические характеристики детали. Количество проходов – 2. Данный способ позволяет об-

рабатывать детали за один установ, повысить качество обрабатываемой детали и уменьшить ее отклонения от формы.

Технический результат заключается в образовании адсорбционного антифрикционного мономолекулярного слоя, снижение возникновения задиров и наплывов перед инструментом на обрабатываемой поверхности.

По результатам обработки экспериментальных данных (исследования представлены в п.2.2.3 настоящего отчета) были получены следующие зависимости [2.6]:

Шероховатость инструмента (верхней ролик машины трения СМЦ-2):

$$\begin{aligned}
 y = & -0,45164 - 0,00022x_1 + 0,00014x_2 - 0,00065x_3 - 0,00077x_4 + 0,00028x_1x_2 + \\
 & + 0,00021x_1x_3 - 8,13 \cdot 10^{-5} x_1x_4 - 0,00029x_2x_3 - 3,13 \cdot 10^{-5} x_2x_4 - 0,00067x_3x_4 + \\
 & + 0,00011x_1x_2x_3 + 9,38 \cdot 10^{-5} x_1x_2x_4 - 1,88 \cdot 10^{-5} x_1x_3x_4 - 0,00041x_2x_3x_4 + \\
 & + 0,00016x_1x_2x_3x_4 - 0,00071x_1^2 - 0,00061x_2^2 + 9,21 \cdot 10^{-5} x_3^2 + 9,21 \cdot 10^{-5} x_4^2
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Шероховатость обрабатываемой заготовки (нижний образце машины трения СМЦ-2):

$$\begin{aligned}
 y = & -0,00065 + 0,00074x_1 + 0,00020x_2 - 0,00059x_3 - 0,00020x_4 - 0,00032x_1x_2 - \\
 & - 4,38 \cdot 10^{-5} x_1x_3 + 6,88 \cdot 10^{-5} x_1x_4 - 0,00036x_2x_3 - 0,00032x_2x_4 - 0,00079x_3x_4 + \\
 & + 0,00037x_1x_2x_3 - 0,00012x_1x_2x_4 - 1,88 \cdot 10^{-5} x_1x_3x_4 - 0,00041x_2x_3x_4 + \\
 & + 0,00027x_1x_2x_3x_4 - 0,00151x_1^2 + 0,00047x_2^2 + 0,00104x_3^2 + 0,00114x_4^2
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

### ***2.1.3 Разработка математической модели процесса и режимов формирования параметров шероховатости поверхностей узлов трения металлургических механизмов методом выглаживания поверхности с использованием ультразвуковой финишной обработки***

Одним из эффективных способов повышения прочности и износостойкости является поверхностное выглаживание с наложением ультразвуковых колебаний [2.13-2.15]. В процессе приработки контактных поверхностей при больших нагрузках, особенно при пуске и реверсе вращение винта нажимного механизма возможно схватывание поверхностей с образованием задиров, что может

существенно снизить ресурс работы деталей винтовой пара. Вышеуказанные явления уменьшаются при формировании соответствующей микрогеометрии контактирующих поверхностей. Одним из эффективных способов формирования требуемой микрогеометрии является выглаживание с наложением ультразвуковых колебаний (БУФО).

Значительный вклад в развитие безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО) внесли ученые и специалисты Санкт-Петербургского университета Петра Великого и ООО «Северо-Западный центр ультразвуковых технологий», которыми разработана серия установок БУФО и выполнен комплекс исследований [2.16, 2.17].

Применение поверхностной упрочняющей обработки с наложением УЗК позволяет получать структуру с размером зерна 5...10 нм на глубину 15...20 мкм от поверхности обрабатываемой детали, а твердость поверхностных слоев возрастает с 44...46 HRC до 54...56 HRC. При этом на поверхности детали возникают остаточные сжимающие напряжения [2.18].

На рис. 2.3. представлена схема установки БУФО для выглаживания с наложением ультразвуковых колебаний.

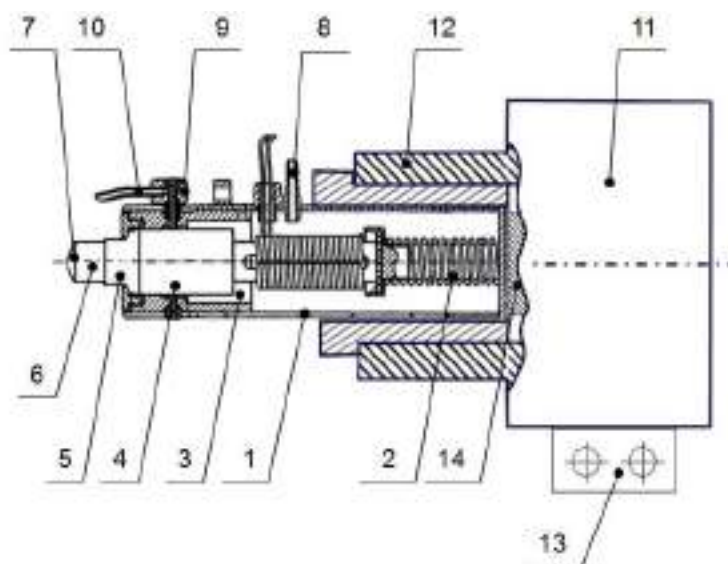


Рисунок 2.3. Схема установки БУФО для выглаживания с наложением ультразвуковых колебаний

Установка БУФО содержит последовательно размещенные в стакане 1 упругий элемент 2, магнестрикционный преобразователь 3, волновод 4, кон-

центратор 5, поворотное устройство 6 с установленным на его торце индентором 7. На стакане 1 с наружной его стороны расположен съемный прилив 8 и сливной штуцер 9 с направляющей трубкой 10 для подачи жидкой технологической охлаждающей среды. Стакан 1 коаксиально установлен в корпусе 11 с возможностью перемещения в направляющей 12. Снаружи корпус 11 снабжен кронштейном 13 для крепления к суппорту станка. Индентор 7, который воздействует на обрабатываемую поверхность, установлен с возможностью поворота и жесткой фиксации.

Схема размещения ультразвуковой системы на токарном станке представлена на рис. 2.4.

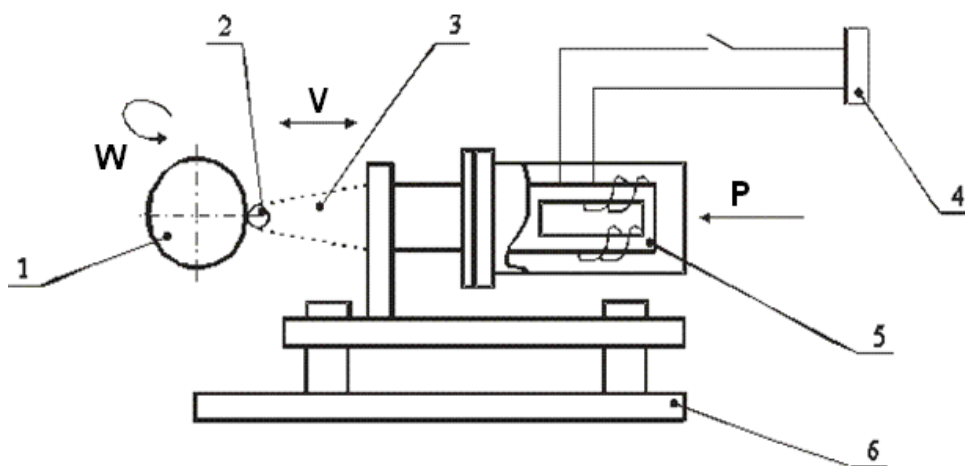


Рисунок 2.4. Схема размещения ультразвуковой системы на токарном станке: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – индентор; 3 – концентратор; 4 – генератор; 5 – магнестрикционный преобразователь; 6 – суппорт станка

Выглаживание осуществлялось с использованием установки БУФО-0,63/22. Основные характеристики ультразвуковой установки БУФО-0,63/22: мощность - 0,5 кВт; частота колебаний индентора – 20...22 кГц; амплитуда колебаний – 10...40 мкм; масса генератора – 7,5 кг, масса акустической головки – 4 кг.

Используя установку БУФО-0,63/22, проведена серия экспериментов, в ходе которых на токарно-винторезном станке модели 1К62, обрабатывались диски из стали марки 50Г с наружным диаметром  $D = 110$  мм и шириной  $b = 25$  мм. Материал индентера - сталь ШХ15 (твердость 64 HRC) [81]. В ходе экспери-

ментов варьировались режимы обработки: начальная глубина внедрения индентора в материал заготовки  $P = 0,1 \div 0,3$  мм (измерялась по делениям лимба токарного станка) и скорость вращения заготовки  $n = 240 \div 480$  об/мин.

Исследования микротопографии поверхностей, обработанных при различных режимах обработки, осуществлялись с использованием профилометра Mahr S2 (Германия) и 3D-интерферометра Bruker GT K1 (USA) в научно-исследовательском центре «Микротопография» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» [2.19-2.24].

При исследовании микротопографии поверхности на профилометре Mahr S2 все измерения осуществляли по 5 трассам на каждом образце при выделении профилей шероховатости стандартными фильтрами Гаусса с верхней и нижней границами  $\lambda_s = 2,5$  мм и  $\lambda_s = 0,008$  мм и профилей волнистости с верхней и нижней границами  $\lambda_s = 25$  мм и  $\lambda_s = 0,08$  мм. На рисунке. 2.5 представлен профиль исходной необработанной поверхность, полученный с использованием профилометра Mahr-S2.

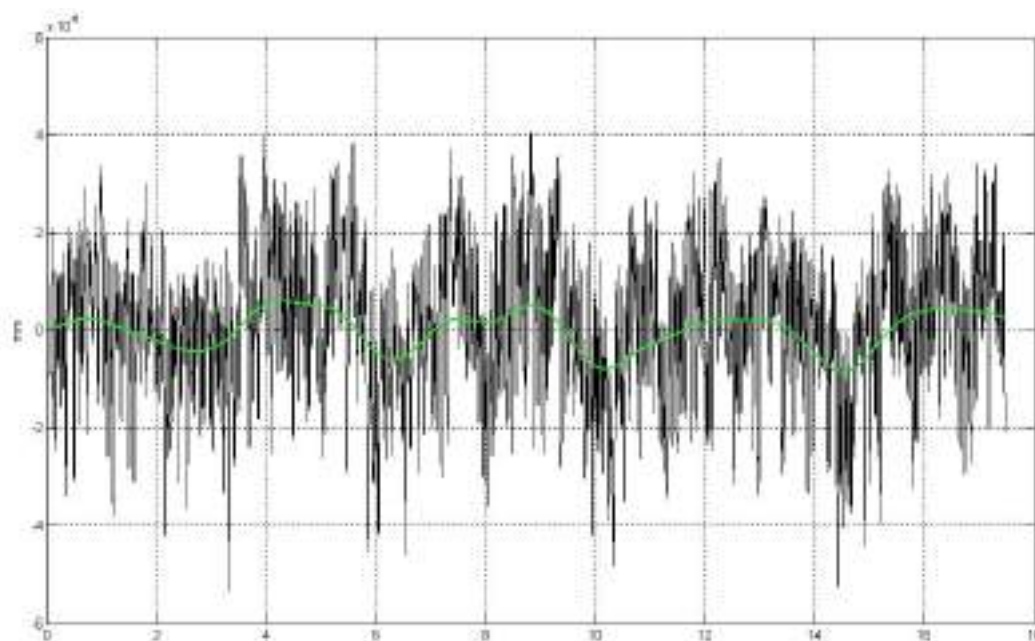


Рисунок 2.5 - Профиль исходной необработанной поверхность

Профиль поверхности, выглаженной с использованием установки БУФО-0,63/22, представлен на рис. 2.6.

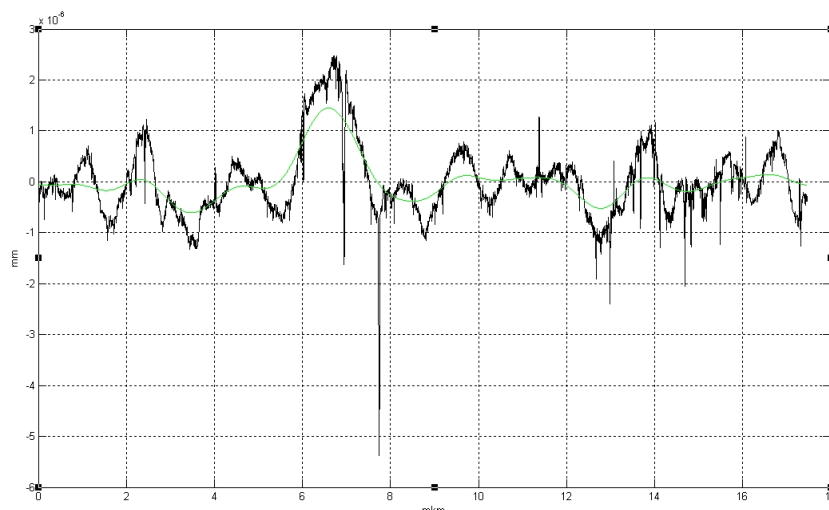


Рисунок 2.6. Профиль поверхности, выглаженной с использованием установки БУФО-0,63/22

В ходе экспериментов измерялись следующие параметры:  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости и  $P_s$  – среднее число вершин профиля на 1 см длины поверхности.

Полученные эмпирические математические зависимости представлены в формулах (2.19) - (2.20):

- зависимость среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  от величины начальной глубины  $P$  внедрения индентора при  $n=240$  об/мин:

$$R_a = 48,17P^4 - 44,06P^3 + 13,97P^2 - 1,97P + 0,18 \quad (2.19)$$

- зависимость среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  от скорости  $n$  вращения заготовки при начальной глубине внедрения индентора  $P=0,1$  мм:

$$R_a = 8 \cdot 10^{-13} n^5 - 0,1 \cdot 10^{-8} n^4 + 9 \cdot 10^{-7} n^3 - 0,0003 n^2 + 0,442 n + 0,18 \quad (2.20)$$

С целью обобщения вышеприведенных результатов и возможности их использования при БУФО плоских поверхностей на строгальных или фрезерных станках вводилась линейная скорость  $V$  точки контакта заготовки с индентором, которая определялась по формуле

$$V = \frac{\pi n}{60} D, \quad (2.21)$$

где  $D$  – диаметр обрабатываемой заготовки.

По результатам выполненных расчетов построена зависимость среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  от линейной скорости  $V$  точки контакта заготовки с индентором при начальной глубине внедрения индентора  $P=0,1$  мм:

$$Ra = -0,027V^5 + 0,353V^4 - 1,82V^3 + 4,694V^2 - 5,967V + 3,026 \quad (2.22)$$

Построена зависимость среднего числа вершин профиля на 1 см длины  $Pc$  от начальной глубины  $P$  внедрения индентора при скорости вращения заготовки  $n = 240$  об/мин:

$$Pc = -739261P^5 + 857165P^4 - 368753P^3 + 75914P^2 - 7796,1P + 355,63 \quad (2.23)$$

Построена зависимость среднего числа вершин профиля на 1 см длины  $Pc$  от скорости  $n$  вращения заготовки при начальной глубине внедрения индентора  $P=0,1$  мм:

$$Pc = -2 \cdot 10^{-10}n^5 + 3 \cdot 10^{-7}n^4 - 0,0002n^3 + 0,0781n^2 - 12,167n + 760,71 \quad (2.24)$$

Построена зависимость среднего числа вершин профиля на 1 см длины  $Pc$  от линейной скорости  $V$  точки контакта заготовки с индентором при начальной глубине внедрения индентора  $P=0,1$  мм:

$$Pc = -20,72V^5 + 209,12V^4 - 813,3V^3 + 1502,3V^2 - 1290,9V + 450,61 \quad (2.25)$$

### *Выводы*

На основе полученных эмпирических математических зависимостях можно сделать следующие выводы.

- При увеличении начальной глубины внедрения индентора средне арифметическое отклонения профиля  $Ra$  уменьшается и поверхность становится более гладкой. Однако при этом возрастают силы, действующие на индентор, и затраты энергии на вращение заготовки. Рациональной величиной начальной глубины внедрения индентора следует считать  $P=0,1 \div 0,15$  мм.

- При скорости  $n$  вращения заготовки в пределах  $280 \div 320$  об/мин, что соответствует линейной скорости точки контакта заготовки с индентором  $V = 1,61 \div 1,84$  м/с, средне арифметическое отклонения  $Ra$  принимает значение, близкое к минимальному, а среднее число вершин профиля на 1 см длины  $Pc$  становится максимальным.



## 2.2. Исследование процессов формирования микрорельефа контактирующих поверхностей при различных видах обработки поверхности. Исследование различных технологических операций для формирования заданного микрорельефа поверхности

### 2.2.1. Процесс формирования микрорельефа контактирующих поверхностей при обработке методом фрикционного плакирования

#### 2.2.1.1 Формирование микрорельефа при обработке методом фрикционного плакирования

##### *Материалы и методика исследования*

Ходовой винт ШВП. Химический состав ходового винта ШВП был определен с помощью спектрометра Spectro (Германия), результаты анализа представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

#### Химический состав исследуемой стали

Химические элементы, %			
C	Cr	V	Ni
0,72	0,5	0,22	0,125

Химический анализ показал, что по содержанию химических элементов сталь похожа на сталь марки 7ХФН, которая относится к инструментальным нетеплостойким сталям с повышенной вязкостью и прокаливаемостью. Для микроанализа из образца по стандартной методике были приготовлены продольные микрошлифы. Приготовление шлифа проводилось с использованием запрессовки образцов в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000 на линии пробоподготовки фирмы Buechler.

Для выявления микроструктуры поверхность шлифа подвергалась травлению в 4 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Zeiss Axio Observer 3 materials при увеличениях от 50 до 1000 крат с использованием системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO. Изображение микроструктуры с помощью цифровой камеры вводилось в компьютер и затем анализировалось с применением специализированных программ.

Микроструктура при увеличениях более 1000 крат, а также поверхность излома исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6490 LV во вторичных электронах.

Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проводился с использованием специальной приставки к сканирующему микроскопу – системы INCA Energy.

Микротвердость определяли на приборе Buehler Micromet (Бельгия) в соответствии с ГОСТ 9450-76.

### *Результаты*

На резьбовую поверхность ходового винта наносилось покрытие методом ФП [2.25-2.27]. Анализ поверхности винта без покрытия показал, что на поверхности имеются дефекты контактно-усталостного происхождения – выкрошки (рис. 2.7, а), которые образуются в процессе эксплуатации. Поверхность винта с нанесенным покрытием показана на рис. 2.17,б.

В качестве материала покрытия использовалась латунь Л-63 с микротвердостью 1270 МПа. МРСА показал, что при нанесении латунного покрытия перемешивание поверхностных слоев не наблюдается (рис. 2.8).

Микроструктура винта без покрытия и с нанесенным латунным покрытием представлена на рис. 2.9. Анализ показал, что микроструктура в центральной области исследуемого образца (рис. 2.9в) состоит преимущественно из зернистого перлита и небольшого количества перлита пластинчатого. Такая микроструктура, очевидно, сформировалась в результате отжига. Микротвердость центральной области винта составила 2355 МПа. Структура на поверхности

винта (рис. 2.9а, 2.9б) отличается от микроструктуры в центральных областях и методами оптической микроскопии идентифицировать ее сложно.

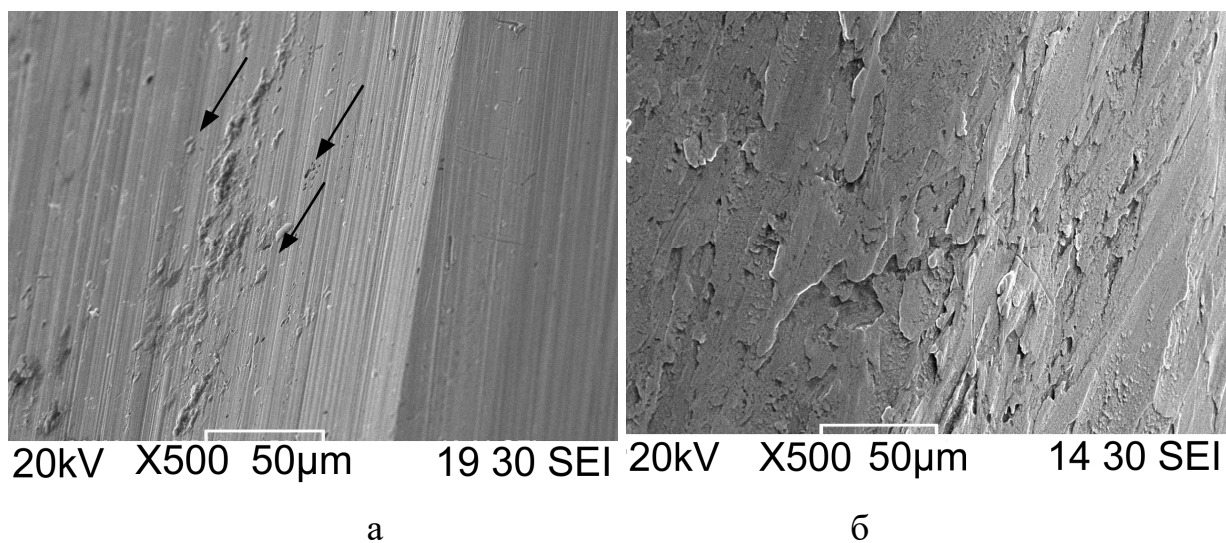


Рис. 2.7. Поверхность винта без покрытия (а) и с покрытием (б)

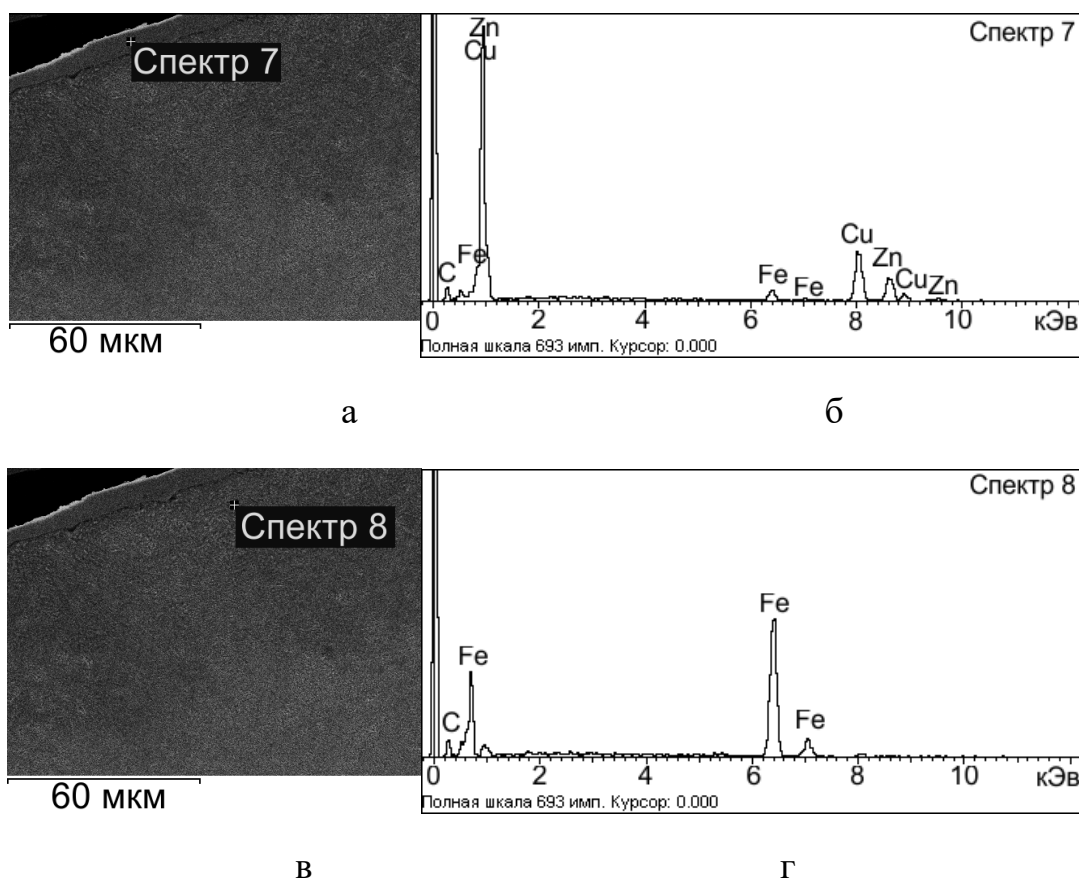


Рис. 2.8. Анализируемые участки микроструктуры винта (а, в) и микрорентгеновские спектры с них (б, г)

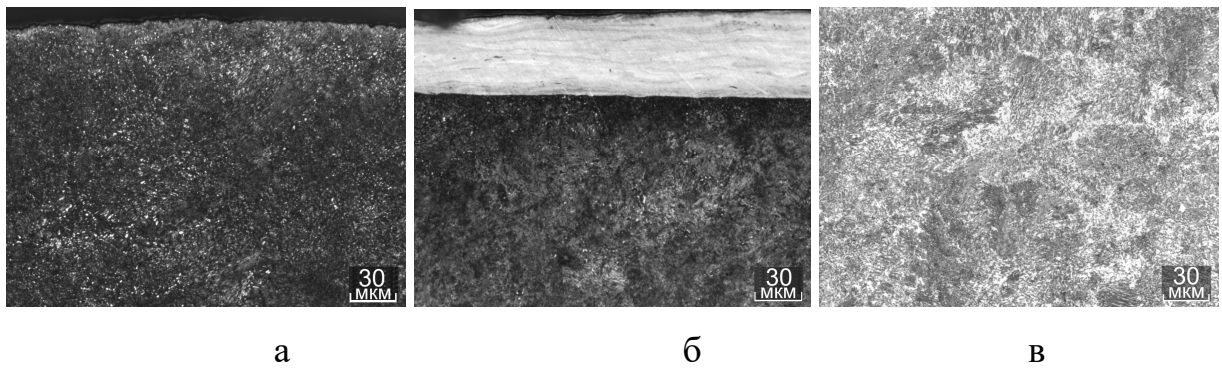


Рис. 2.9. Микроструктура поверхности винта без покрытия (а) и с латунным покрытием (б), в центральной области винта (в)

Электронномикроскопическое исследование показало, что микроструктура поверхностных слоев винта как без покрытия (рис. 2.10, а), так и под нанесенным покрытием (рис. 2.10, б) состоит из мартенсита и карбидных частиц. Очевидно, винт подвергался поверхностной закалке.

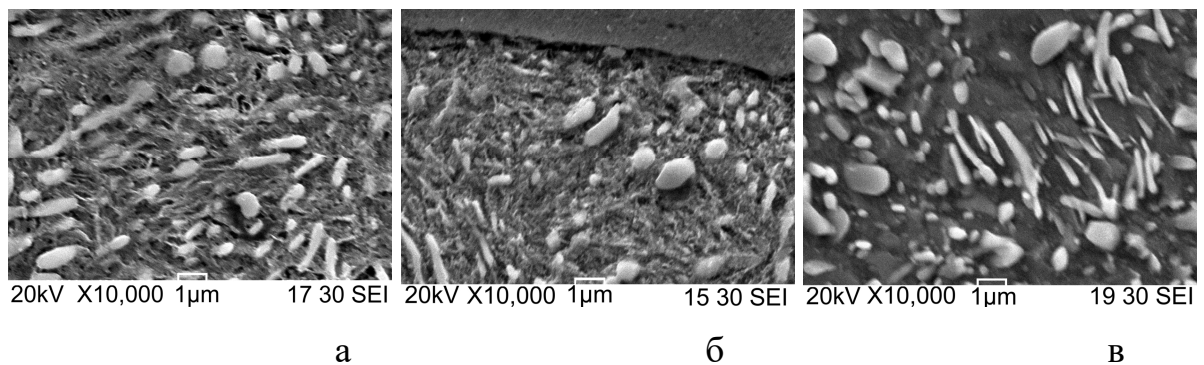


Рис. 2.10. Микроструктура поверхности винта без покрытия (а) и с латунным покрытием (б), в центральной области винта (в)

Из-за большой скорости нагрева и отсутствия выдержки диффузионные процессы оказываются не завершенными, и углерод распределен неоднородно в микрообъемах аустенита. Кроме того, микроструктуре предварительно отожженного винта имелись достаточно крупные частицы цементита до 1 мкм и более (рис. 2.10, в), которые не успевают полностью раствориться при условиях нагрева ТВЧ. В микрообъемах аустенита с разной концентрацией углерода образуются очень мелкие кристаллы мартенсита, а также могут выделяться дисперсные карбиды при охлаждении. Видимых отличий в микроструктуре на поверхности винта без покрытия и с нанесенным покрытием не наблюдается.

Микротвердость поверхностных слоев винта без покрытия, сформированных вследствие поверхностной закалки, составляет 5940 МПа. Микротвердость латунного покрытия составляет 2820 МПа, а стальной основы – 6664 МПа. После нанесения покрытия методом ФП произошло упрочнение стальной основы винта на 720 МПа (~12%) вследствие механического наклепа, который вызван ударно-фрикционным воздействием ВПЩ о поверхность винта при нанесении покрытия. Кроме того, произошло упрочнение латуни при нанесении ее щеткой на винт. Микротвердость покрытия - 1550 МПа, что более чем в два раза превышает исходную микротвердость латуни Л-63.

Современные методики в области анализа шероховатости поверхности дают широкие возможности для установления взаимосвязи качества обработанного материала с технологическими параметрами. Традиционный способ оценки шероховатости поверхности с помощью параметров Ra и Rz не дает полного представления о состоянии микротопографии поверхности. Использование параметров 3D микротопографии определяемые по стандарту ГОСТ ИСО 25178-2 позволяет установить более точно связь с технологическими характеристиками.

Измерение микротопографии поверхности резьбовой части ходового винта осуществлялись на оптическом профилометре Contour GT K1 (Bruker, Германия), который предназначен для измерения рельефа поверхности образцов на основе явления интерференции, коэффициент отражения которых составляет от 1 до 100 %. Оптический профилометр обеспечивает разрешение по вертикали 1 Å. Общий диапазон измерений по вертикали от 0.1 нм до 10 мм. Для измерения на оптическом профилометре Contour GT K1 использовался способ вертикальной сканирующей интерферометрии (VSI). В качестве основного использовался объектив 5x (≈200 крат) с линзой 1x, площадь одного кадра 961x1008 мкм. Площадь оценки 1x1 мм. Измерения и анализ поверхности проводился по методике ГОСТ ИСО 25178 фильтрация для выделения низкочастотной и высокочастотной составляющей микротопографии не производилась. Результаты исследования представлены в таблице 2.2 и на рис. 2.11.

## Значения параметров шероховатости по стандарту ГОСТ ИСО 25178-2

	Sa	Sq	Sku	Ssk	Sp	Sv	Sz	Sdq	Sdr	Sds	Ssc	Sal	Str	Vvc
	мкм	мкм			мкм	мкм	мкм	град	%	1/мм <sup>2</sup>	1/мкм	мкм		$\frac{\text{мкм}^3}{\text{мкм}^2}$
без покрытия	0,42	0,54	5,18	-0,08	5,20	-4,72	9,9	29,3	14,0	5375	0,86	18,6	0,09	0,59
с покрытием	0,92	1,19	4,19	0,19	6,91	-6,07	13,0	35,8	22,6	4160	1,10	36,9	0,27	1,40
Δ, %	55	55	-24	141	25	22	24	18	38	-29	22	50	68	58
$\Delta = \frac{(\text{Параметр после покрытия} - \text{Параметр до покрытия})}{\text{Параметр после покрытия}} * 100\%$														

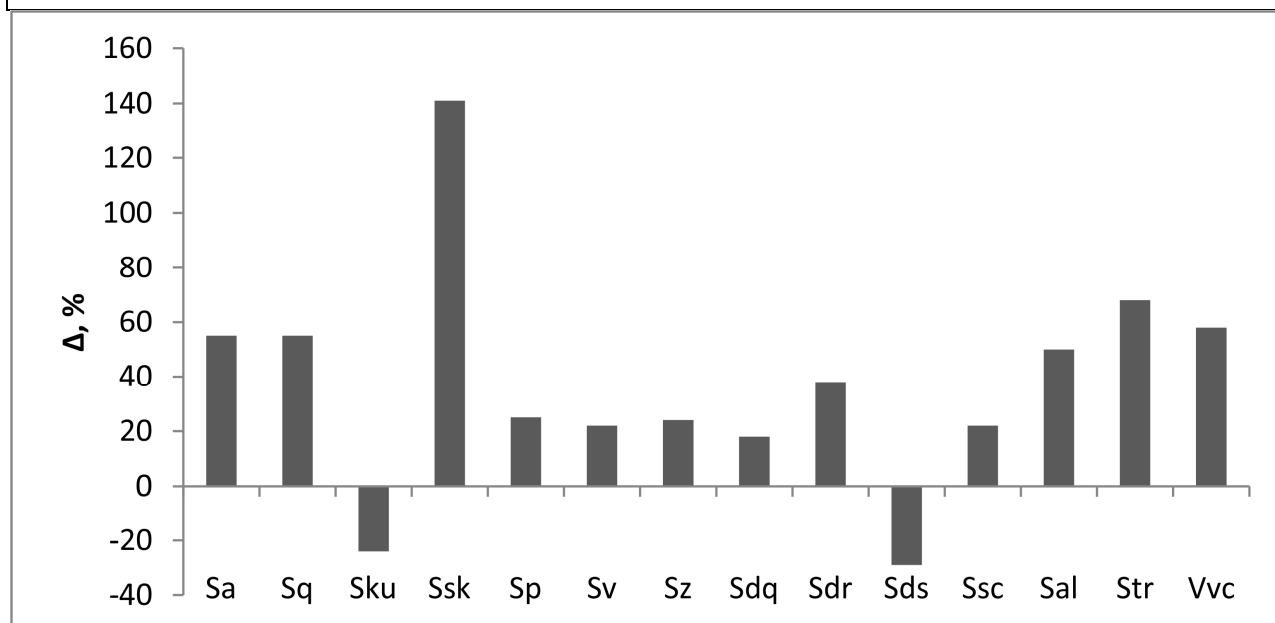


Рис. 2.11. Результаты исследования микротопографии поверхности

Определялись по стандарту ГОСТ ИСО 25178-2 следующие параметры микротопографии:

- Sa, мкм - среднее арифметическое отклонение ординат поверхности;
- Sq, мкм - среднее квадратическое отклонение ординат поверхности;
- Sz, мкм – сумма наибольшей высоты пиков и наибольшей глубины впадины;
- Sdq, deg – средний угол наклона неровностей поверхности в градусах;
- Sdr, % - процент приращения площади поверхности, обусловленный шероховатостью по сравнению с площадью идеальной плоскости;

-  $S_{ds}$ ,  $1/\text{мм}^2$  – количество пиков на единицу площади (данный параметр не входит в стандарт);

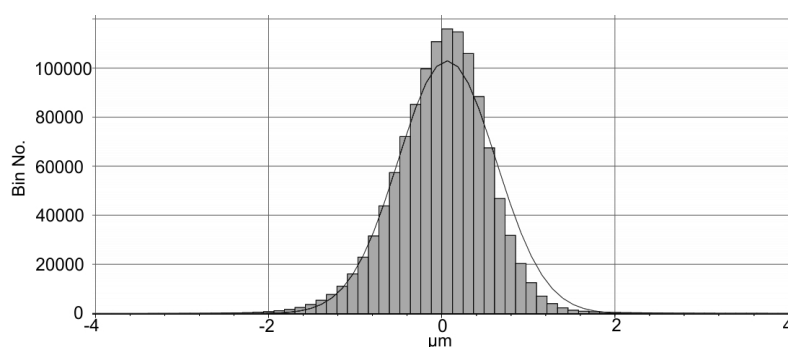
-  $S_{sc}$ ,  $1/\text{мкм}$  – величина обратная радиусу кривизны неровностей;

-  $S_{al}$ ,  $\text{мкм}$  - длина автокорреляции;

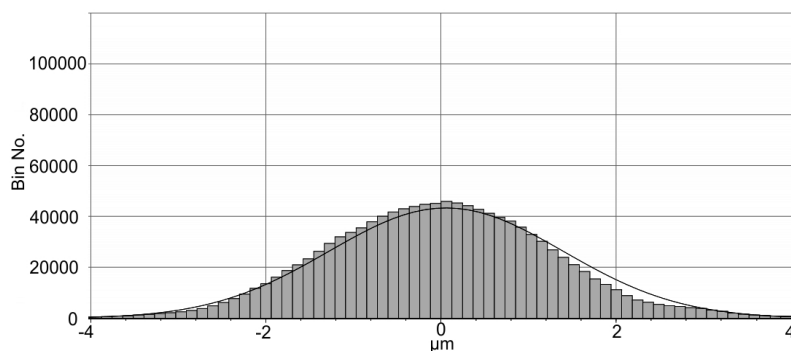
-  $S_{tr}$  – соотношение геометрических размеров текстуры или коэффициент анизотропии;

-  $V_{vc}(p,q)$ ,  $\text{мм}^3/\text{мм}^2$  - объем пустот сердцевины шероховатого слоя.

На рис. 2.22 представлено распределение координат микротопографии поверхности, а на рис. 2.23 профиль поверхности.

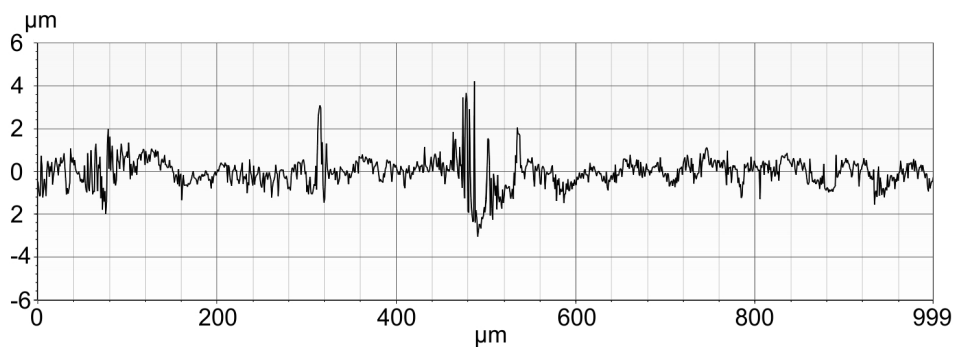


а



б

Рис. 2.22. Распределение ординат микротопографии поверхности: а – без покрытия, б – с покрытием



а

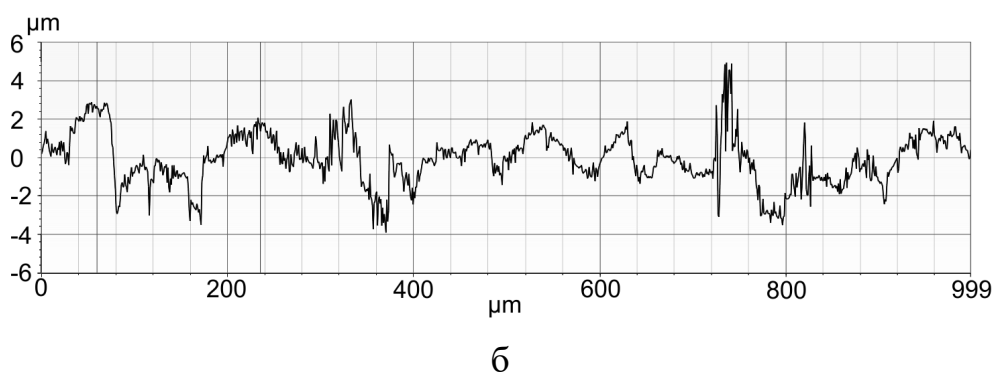


Рисунок 2.23. Профиль поверхности: а - без покрытия; б – с покрытием  
 На рис. 2.24 представлена микрофотография поверхности.

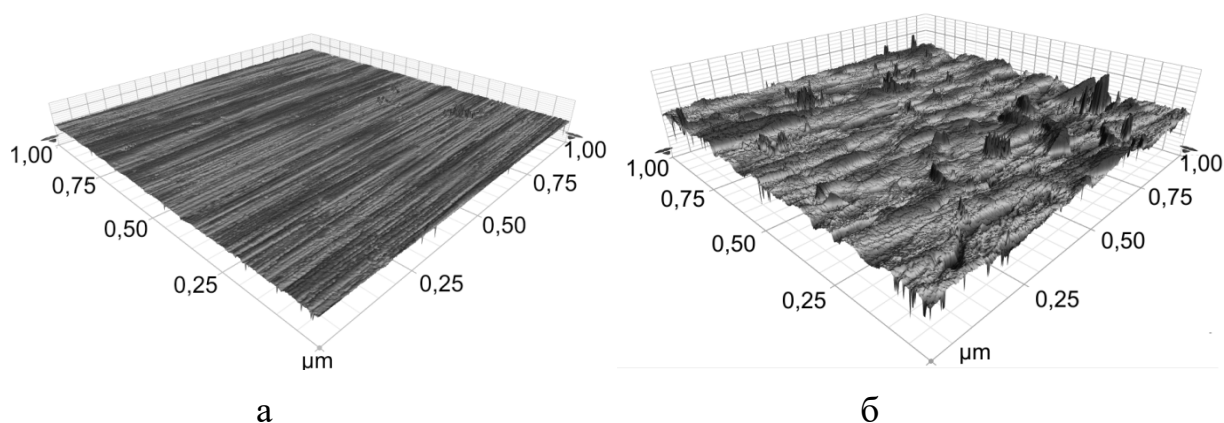


Рисунок 2.24. Микрофотография: а - до нанесения покрытия; б - после нанесения покрытия

Изучение результатов микрофотографии поверхности до и после обработки ФП показывает, что при нанесении покрытия ФП увеличиваются параметры  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$ ,  $S_dq$ ,  $S_{dr}$ ,  $S_{ds}$ ,  $V_{vc}$ , а параметр  $S_{ku}$  уменьшается. Это свидетельствует, что влияние латунного покрытия на конечную шероховатость минимально.

Основной вклад в формирование текстуры поверхности вносит механическая обработка. Поверхность после обработки становится более грубой (увеличиваются параметры  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$ ), текстура поверхности становится более изотропной (увеличивается  $S_{tr}$ ), пики становятся менее пологими ( $S_{dq}$  растёт,  $S_{sc}$  растёт), их количество уменьшается ( $S_{ds}$  уменьшается,  $S_{al}$  увеличивается), текстура становится более развитой и «маслоемкой» (параметры  $S_{dr}$ ,  $V_{vc}$  увеличиваются).



## *Выводы*

Проведено исследование структуры и микротопографии резьбовой поверхности ходового винта, шарико-винтовой передачи и латунного покрытия, нанесенного на резьбу с полукруглым профилем методом ФП.

После нанесения покрытия методом ФП произошло упрочнение стальной основы винта на 720 МПа (~12%) вследствие механического наклепа, который вызван ударно-фрикционным воздействием ВПЩ о поверхность винта при нанесении покрытия. Кроме того, произошло упрочнение латуни при нанесении ее щеткой на винт. Микротвердость покрытия - 1550 МПа, что более чем в два раза превышает исходную микротвердость латуни Л-63.

Анализ результатов микротопографии поверхности до и после обработки ФП показывает, что влияние латунного покрытия на конечную шероховатость минимально. Поверхность после обработки становится более грубой, пики становятся менее пологими, их количество уменьшается. Текстура становится более развитой и «маслоемкой».

2.2.1.2. Изменение микрорельефа при полировании поверхностей, полученных методом фрикционного плакирования

### *Технология нанесения покрытия*

Нанесение покрытий осуществлялось электрофрикционным плакированием (ЭФП). При ЭФП покрытие на поверхности детали формируется за счет переноса ворсом вращающейся металлической щетки частичек материала покрытия, при этом для интенсификации процесса дополнительно подается электрический ток [2.25, 2.26-30]. Технология отличается простотой в исполнении, несложностью используемых технических средств, малой энергоемкостью, высокими эксплуатационными характеристиками сформированных покрытий. На рис. 2.25 приведен процесс нанесения покрытия по технологии ЭФП.



а

б

Рис. 2.25. Пример нанесения покрытия на роликовые образцы методом ЭФП:  
а – подключение установки источника токовых импульсов; б – процесс нанесе-  
ния покрытия

#### *Материал и способ нанесения покрытия*

Материал покрытия получен спеканием смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазнографитной шихты УДАГ (не более 1 мас. %). Нанесение покрытия осуществлялось вращающейся металлической щеткой с гофрированным ворсом из стали нержавеющей стали 03X17H14M2 (производство OSBORN). Диаметр и ширина щетки составляли соответственно 200 и 30 мм, линейная скорость вращения 30 м/с, диаметр и вылет ворса – 0,2 и 40 мм, число проходов щетки по поверхности образцов - 6. Покрытие наносилось на образцы размером 10×6×2 мм из стали 45.

Среднее значение толщины сформированного слоя покрытия, измеренного с помощью прибора МТЦ – 3, составило 10...12 мкм для покрытий, сформированных щёткой с ворсом из нержавеющей стали. Среднее значение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  покрытий, измеренных с помощью профилографа-профилометра (завод «Калибр», г. Москва) составило 0,8...1,0 мкм. Рентгеноструктурный анализ исследуемых образцов выполняли на дифрактометре ДРОН 3.0 в монохроматизированном  $CoK_{\alpha}$  излучении при ускоряющем напряжении 30 кВ и анодном токе 15 мА. С целью исследования фазового состава тонких поверхностных слоев был применен метод скользящего пучка ( $\psi=6^{\circ}$ ). Для расшифровки фазового состава использовалась картотека стандартных

спектров PDF. Обработку данных рентгеноструктурного анализа осуществляли с помощью автоматизированного программного комплекса «DiffracPlus EVA». Состав покрытия представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Химический состав покрытий, сформированных на поверхностях образцов из стали 45 методом ЭФП

Образец	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Mo	Fe
Покры- тие	0,187	0,681	0,074	0,014	2,697	0,660	1,739	0,195		0,015	Основа
Основа	0,101	0,476	0,053	0,002	0,123	0,552	0,181	0,175		0,010	Основа

#### *Полировка покрытий*

Полировку хромовых покрытий, сформированных методом ПГИ, осуществлялась согласно рекомендациям, приведенными в работе [2.31]. Тонкую зачистку поверхности выполняли тонкошерстным войлочным кругом Т – А - 1 (РСТ РСФСР 756—89) диаметром 200 мм, шириной 30 мм с использованием алмазной пасты СА-АСМ 2/1 (ГОСТ 25593-83). В процессе полировки примерно 1/4 часть рабочей поверхности войлочного круга оставалась свободной от полировальной смеси.

В качестве привода вращения круга использовали технологический модуль ПГИ, закрепленный на токарном станке 16К20. На шпинделе модуля вместо цилиндрической щетки с проволочным ворсом монтировался войлочный круг. Частота вращения круга при выполнении полировки составляла 2840 об/мин. Для очистки деталей после полировки использовался растворитель перхлорэтилен.

#### *Исследование режимов полирования*

В качестве варьируемых факторов были взяты технологические параметры процесса полирования, влияющие на шероховатость и толщину сформированного плакированного слоя: число проходов  $n$  полировального круга по обраба-

тываемой поверхности ( $x_1$ ); натяг  $N$  полировального круга по отношению к обрабатываемой поверхности ( $x_2$ ).

Для получения модели процесса использовался некопозиционный ротатабельный план второго порядка для двух факторов (рис. 2.26). Уровни и значения варьируемых факторов представлены в таблице 2.4.

Параметры оптимизации – параметр  $R_a$  шероховатости и толщина  $h$  плакированного слоя после полирования.

Толщину покрытия измеряли на цилиндрических образцах с помощью пассаметра с точностью 1 мкм. На каждом образце измерения толщины покрытия производили 6...8 раз и вычисляли средние значения.

Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  оценивался с помощью профилометра модели 253 производства завода «Калибр».

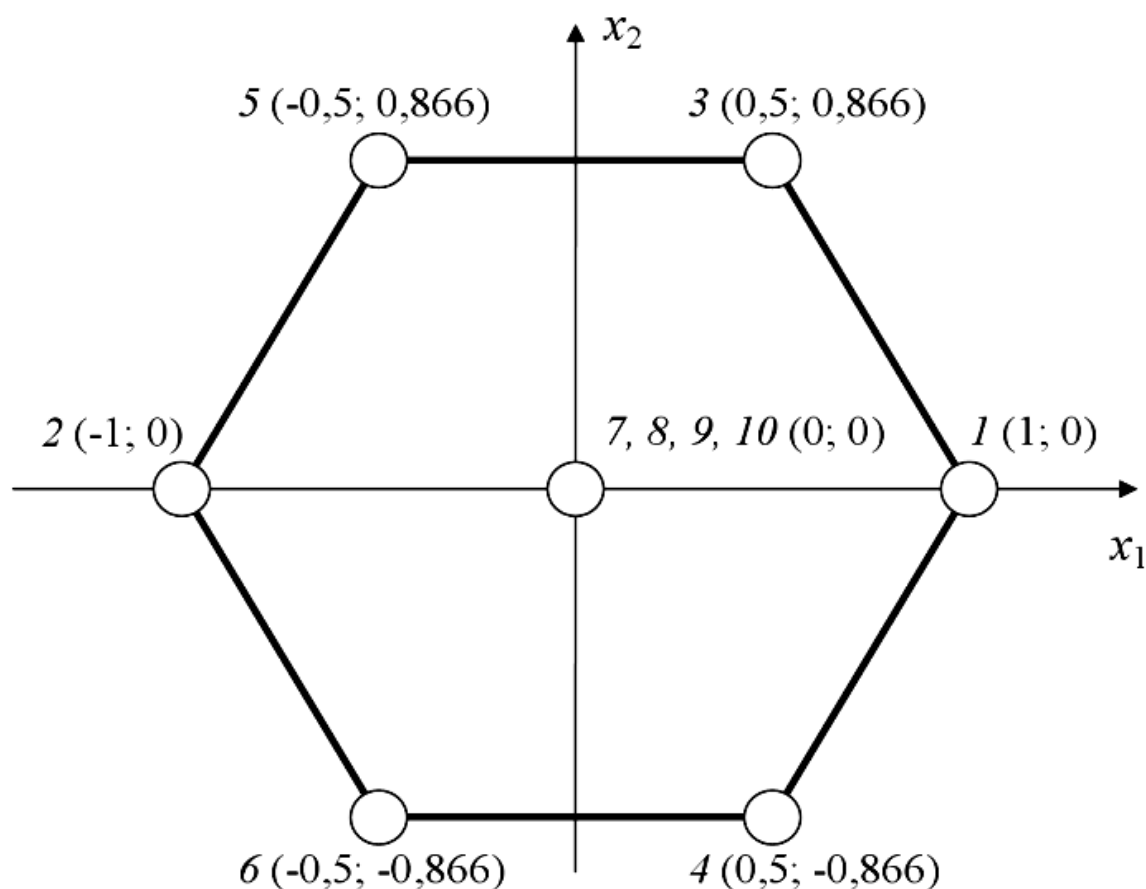


Рис. 2.26. Некопозиционный ротатабельный план второго порядка для двух факторов: номер опыта (уровень)

Таблица 2.4.

## Уровни и значения технологических факторов

Факторы	Обозначение	Уровни факторов						
		-1	-0,866	-0,5	0	+0,5	+0,866	+1
		Соответствующие уровням значения факторов						
Число проходов $n$	$x_1$	3	–	4	5	6	–	7
Натяг $N$ , мм	$x_2$	–	0,5	–	1,0	–	1,5	–

Полирование плакированного хромового покрытия на экспериментальных образцах осуществляли войлочным кругом диаметром 200 мм, шириной 30 мм, с использованием пасты алмазной СА-АСМ 2/1, по технологическим режимам полирования, соответствующим матрице планирования эксперимента, после чего определяли толщину покрытия и его шероховатость, как средние из 6-8 измерений.

*Результаты исследований*

В таблице 2.5 приведены результаты замеров шероховатости и толщины покрытия.

Таблица 2.5.

## Режимы полирования и результаты замеров шероховатости и толщины покрытия

Номер опыта	$n$	$N$ , мм	$R_a$ , мкм	$h$ , мкм	Номер опыта	$n$	$N$ , мм	$R_a$ , мкм	$h$ , мкм
1	7	1	0,08	2	6	4	0,5	0,3	8,5
2	3	1	0,4	6	7	5	1,0	0,18	3,5
3	6	1,5	0,14	0	8	5	1,0	0,20	4
4	6	0,5	0,17	8	9	5	1,0	0,16	3
5	4	1,5	0,24	3	10	5	1,0	0,18	3,5

## Результаты

После статистической обработки результатов опытов в соответствии с формулами и методиками, приведенными в [2.32], получили уравнения регрессии следующего вида:

для шероховатости  $R_a$ :

$$y_R = 0,18 - 0,145x_1 - 0,026x_2 + 0,06x_1^2 + 0,023x_2^2, \quad (2.26)$$

для толщины  $h$ :

$$y_h = 3,5 - 1,917x_1 - 3,897x_2 - 1,443x_1x_2 + 0,5x_1^2 + 1,667x_2^2. \quad (2.27)$$

Проверка полученных моделей по  $F$ -критерию (критерию Фишера) подтвердила их адекватность при 5 %-ном уровне значимости.

Полученные зависимости (2.26) и (2.27) позволяют управлять технологическими режимами процесса полирования, входящими в область эксперимента, с целью получения требуемых эксплуатационных характеристик лакированного покрытия. На рис. 2.27 приведены поверхности, построенные с использованием полученных уравнений в безразмерных величинах.

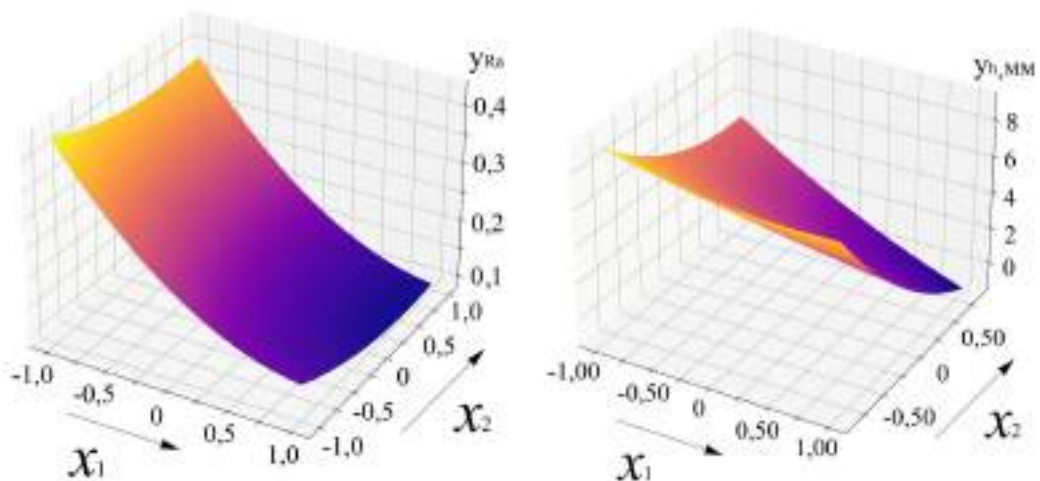


Рис. 2.27. Расчетные зависимости:

- шероховатости поверхности лакированного покрытия от факторов  $x_1$  и  $x_2$ ;
- толщины лакированного покрытия от факторов  $x_1$  и  $x_2$

Анализ регрессионного уравнения (2.26) и поверхности, приведенной на рисунке 3а, показывает, что на величину шероховатости поверхности покрытия после полирования определяющее влияние оказывает число проходов ( $x_1$ ). При этом данное влияние имеет обратную зависимость, ослабляемую положительным коэффициентом при второй степени фактора  $x_1$ . Влияние натяга ( $x_2$ ) на порядок меньше. Таким образом, для уменьшения величины шероховатости покрытия число проходов ( $x_1$ ) следует устанавливать на верхнем уровне (7 проходов).

При рассмотрении регрессионного уравнения (2.27) и рис. 2.27б обнаруживается противоположная картина: наибольшее влияние на толщину покрытия после полирования оказывает натяг ( $x_2$ ). При этом данное влияние проявляется как индивидуально, так и в зависимости с фактором  $x_1$  – число проходов. Как и в случае с шероховатостью поверхности, это влияние имеет обратную зависимость, однако положительный коэффициент при второй степени фактора  $x_2$  значительно ослабляет ее. Кроме того, влияние фактора  $x_1$  на толщину остаточного слоя хоть и уступает по значимости фактору  $x_2$ , но является сопоставимым с ним. Все это позволяет заключить, что исследуемые факторы  $x_1$  и  $x_2$ , как индивидуально, так и во взаимодействии, оказывают на толщину плакированного покрытия после полирования более сложное влияние, чем на его шероховатость после полирования.

Для определения оптимальных технологических режимов полирования, позволяющих обеспечить требуемый класс шероховатости поверхности при сохранении достаточной толщины остаточного плакированного слоя, проанализируем полученные уравнения (2.26) и (2.27), перейдя от кодированных обозначений факторов ( $x_1$  и  $x_2$ ) к соответствующим натуральным обозначениям ( $n$ ,  $N$ ) и их величинам. Для наглядности построим несколько графических диаграмм, используя полученные уравнения (2.26), (2.27) и изменяя значения натяга  $N$  и числа проходов  $n$  в пределах установленных интервалов варьирования (рис. 2.28 и 2.29).

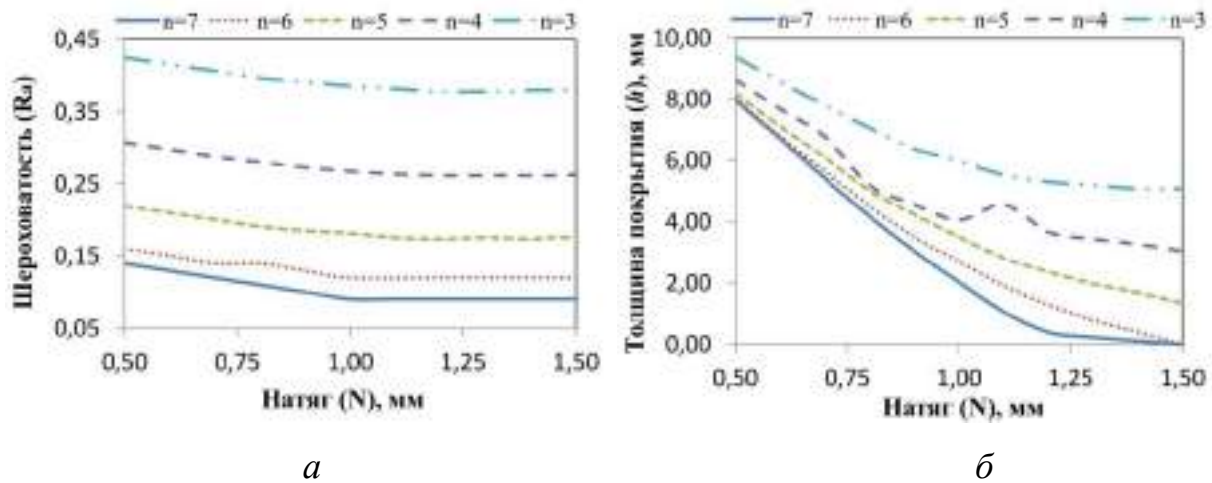


Рис. 2.28. Зависимость шероховатости  $R_a$  (а) и толщины  $h$  (б) плакированного покрытия после полирования от натяга  $N$  полировального круга при числе проходов  $n = 3, 4, 5, 6, 7$  (сверху вниз)

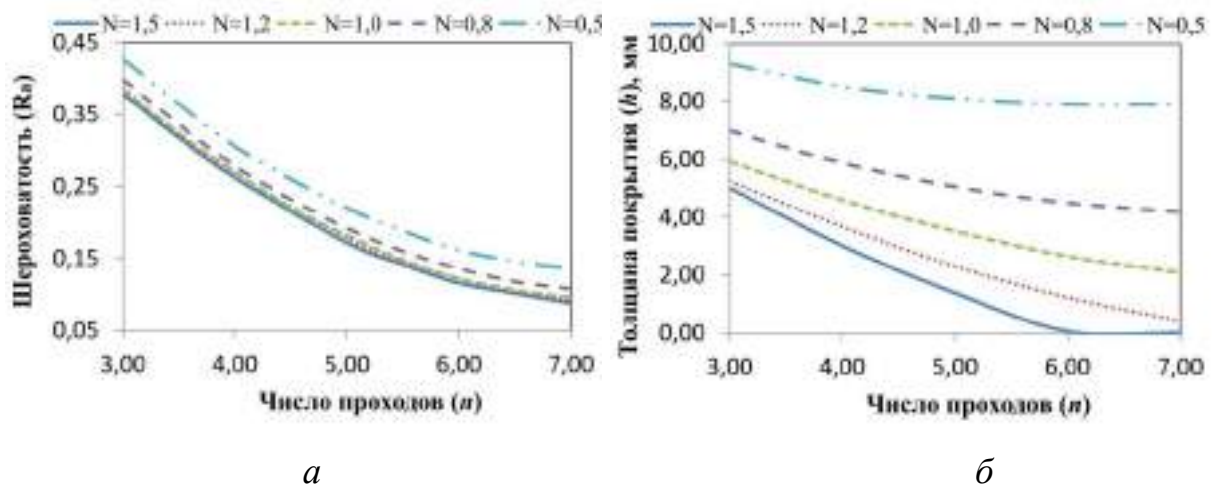


Рис. 2.29. Зависимость шероховатости  $R_a$  (а) и толщины  $h$  (б) плакированного покрытия после полирования от числа проходов  $n$  полировального круга при натяге  $N = 0,5$  мм;  $0,8$  мм;  $1,0$  мм;  $1,2$  мм;  $1,5$  мм (сверху вниз)

Графические диаграммы позволяют выбрать область технологических режимов полирования, обеспечивающих требуемые в каждом конкретном случае величины шероховатости и толщины покрытия.

Анализ диаграмм показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов увеличение как натяга  $N$ , так и числа проходов  $n$  приводит к уменьшению параметра шероховатости  $R_a$  и толщины покрытия  $h$ , однако с различной скоростью.



Так, при постоянном числе проходов увеличение натяга от 0,5 мм до 1,5 мм приводит к снижению шероховатости, но незначительному (рис. 4а). Причем, чем больше количество проходов, тем меньше разница в снижении шероховатости. В случае с толщиной, наоборот, чем больше количество проходов, тем больше разница в уменьшении толщины (рис. 4б).

При постоянном натяге с увеличением числа проходов от 3-х до 7-ми и шероховатость, и толщина уменьшаются, однако уменьшение толщины тем значительнее, чем больше количество проходов (рис. 5аб).

Определим оптимальные режимы полирования штоков гидроцилиндров, подвергнутых хромированию методом деформационного плакирования гибким инструментом. Параметр  $R_a$  шероховатости рабочих поверхностей штоков должен составлять 0,16...0,32 мкм. Из рисунков 4а и 5а следует, что такое значение  $R_a$  достигается при числе проходов, равном 4 и 5, и при любом значении натяга (в пределах установленного нами интервала варьирования  $N$ , равного 0,5...1,5 мм). В этом случае толщина покрытия может лежать в пределах от 1,3 мкм до 8,6 мкм (рис. 4б и 5б). Однако следует принять во внимание, что для обеспечения достаточной коррозионной стойкости покрытий их толщина должна быть не менее 5 мкм. Этому условию удовлетворяют значения натяга, попадающие в диапазон 0,5...0,8 мм. Таким образом, для соответствия требованиям, предъявляемым к штокам гидроцилиндров, полирование рабочей поверхности штоков следует производить при натяге войлочного круга к поверхности, равном 0,5...0,8 мм, в течение времени, соответствующего 4–5 проходам войлочного круга.

#### *Экспериментальная проверка режимов полирования*

Экспериментальную проверку установленных технологических режимов полирования проводили с применением пластин из стали 45 (HRC 43...45), размером 100×30×5 мм. Толщина слоя хромового покрытия, сформированного методом ЭФП на поверхности пластин, составляла 10...12 мкм. Для проведения исследований использовался плоскошлифовальный станок мод. 450 (ОАО

Станкозавод "Красный борец", г. Орша) с закрепленным на шпинделе тонкошерстным войлочным кругом Т-А-1 (РСТ РСФСР 756—89) размером 200×30×32. Примерно 2/3 рабочей поверхности круга смазывали алмазной пастой СА-АСМ 2/1 (ГОСТ 25593-83).

Полирование пластин осуществлялось при следующих режимах: частота вращения войлочного круга –  $2800 \text{ мин}^{-1}$ , натяг - 0,6 мм, число проходов – 4. До полирования среднее значение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  хромового покрытия составляло 0,92 мкм, после полирования – 0,22 мкм, при толщине слоя - 5 мкм. Об улучшении шероховатости свидетельствовал и визуальный осмотр (рисунок 2.30).

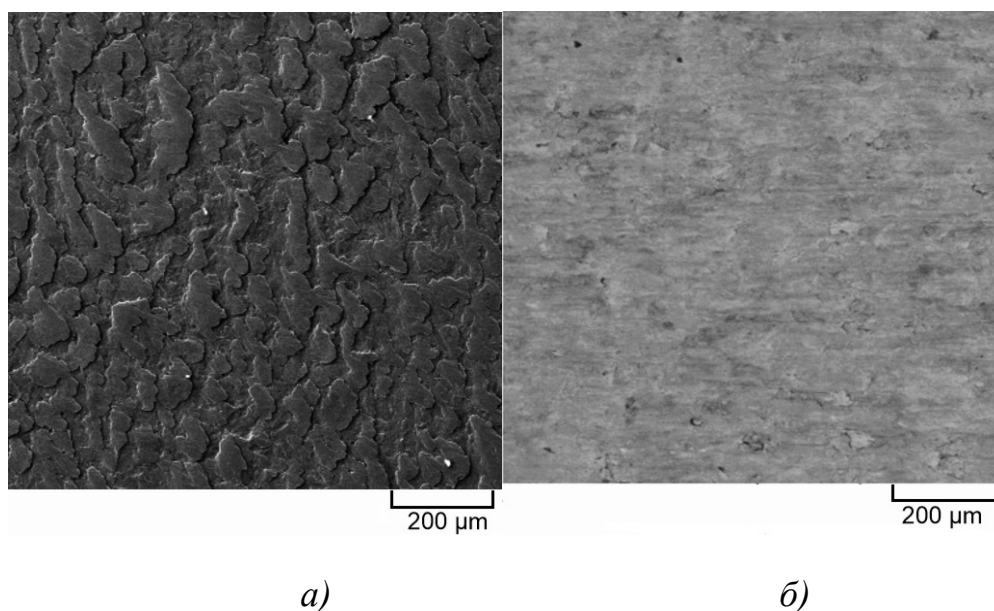


Рисунок 2.30. Фото поверхности покрытия на основе хрома, сформированного методом ПГИ: *а)* – до полировки; *б)* – после полировки

### *Выводы*

В результате экспериментально-статистического моделирования получены зависимости, устанавливающие влияние режимов полирования (число проходов полировального круга, величина натяга круга) на шероховатость и толщину плакированного хромового покрытия.

Анализ полученных зависимостей показывает, что в пределах выбранных интервалов варьирования факторов увеличение натяга полировального круга и

числа проходов круга приводит к уменьшению как параметра шероховатости, так и толщины плакированного покрытия, однако с разной степенью интенсивности. На величину шероховатости поверхности плакированного слоя после полирования определяющее влияние оказывает число проходов полировального круга. Влияние режимов полирования на толщину плакированного покрытия носит более сложный характер, так как проявляется как в индивидуальном сопоставимом влиянии обоих факторов, так и в их взаимодействии.

### ***2.2.2. Процесс формирования микрорельефа контактирующих поверхностей при ультразвуковой обработке***

Проведены экспериментальные исследования, направленные на поиск рациональных режимов поверхностного пластического деформирования с наложением ультразвуковых колебаний. Эксперименты проводились на токарно-винторезном станке с использованием установки БУФО-0,63/22, в ходе которых выглаживалась цилиндрическая поверхность дисков из стали 50Г с диаметром 110 мм. По результатам экспериментов определены рациональные режимы обработки: начальная глубина внедрения индентора, угловая скорости вращения заготовки и линейной скорости точки контакта заготовки с индентором, при которых обеспечивается высокое качество обработанной поверхности. Также в ходе исследований два поверхностно закаленных образца обработаны двумя режимами ультразвукового модифицирования (умеренным и интенсивным). Умеренное ультразвуковое модифицирование структуры поверхностного слоя привело к увеличению значений микротвердости на поверхности с 4450 до 5930 МПа. Интенсивная ультразвуковая обработка привела к появлению сколов на поверхности образца и к повышенным значениям микротвердости – на уровне 7200 МПа.

Применение поверхностной упрочняющей обработки с наложением ультразвуковых колебаний (УЗК) позволяет получать нанокристаллическую структуру с размером зерна 5...10 нм на глубину 15...20 мкм от поверхности обрабатываемой детали, а твердость поверхностных слоев возрастает с

44...46 HRC до 54...56 HRC [2.33,2.34]. При этом на поверхности детали возникают остаточные сжимающие напряжения.

С целью создания математической модели формирования параметров шероховатости проведены экспериментальные исследования выглаживания цилиндрической поверхности дисковых образцов.

Задачи экспериментального исследования.

1. Обработать диски из стали марки 50Г на установке БУФО-0,63/22 с варьированием начальной глубиной внедрения индентора в материал заготовки и скорости вращения заготовки.

2. Исследовать микротопографию поверхностей, обработанных при различных режимах БУФО.

3. Провести металлографические исследования двух образцов из стали марки Ст5сп предварительно подвергнутых поверхностной закалке и разным режимам БУФО.

Материалы и методики экспериментов

Обработка поверхностей осуществлялась с использованием установки БУФО-0,63/22, которая разработана специалистами ООО «Северо-Западный центр ультразвуковых технологий» (г. С.-Петербург). Основные характеристики ультразвуковой установки: мощность - 0,5 кВт; частота колебаний индентора - 20÷22 кГц; амплитуда колебаний – 10÷40 мкм; масса генератора – 7,5 кг, масса акустической головки – 4 кг.

Используя установку БУФО-0,63/22, проведена серия экспериментов, в ходе которых на токарно-винторезном станке модели 1К62, обрабатывались диски из стали марки 50Г с наружным диаметром  $D = 110$  мм и шириной  $b = 25$  мм. Материал индентера - сталь ШХ15 (твердость 64 HRC) [2.19-2.24]. В ходе экспериментов варьировались следующие режимы обработки: начальная глубина внедрения индентора в материал заготовки  $P = 0,1 \div 0,3$  мм (из-

мерялась по делениям лимба токарного станка) и скорость вращения заготовки  $n = 240 \div 480$  об/мин.

Исследования микротопографии поверхностей, обработанных при различных режимах БУФО, осуществлялись с использованием профилометра Mahr S2 (Германия) и 3D-интерферометра Bruker GT K1 (USA) в научно-исследовательском центре «Микротопография» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

При исследовании микротопографии поверхности на профилометре Mahr S2 все измерения осуществляли по 5 трассам на каждом образце при выделении профилей шероховатости стандартными фильтрами Гаусса с верхней и нижней границами  $\lambda_c = 2,5$  мм и  $\lambda_s = 0,008$  мм и профилей волнистости с верхней и нижней границами  $\lambda_c = 25$  мм и  $\lambda_s = 0,08$  мм.

В ходе экспериментов измерялись следующие параметры:  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости и  $Pc$  – среднее число вершин профиля на 1 см длины поверхности.

Исследовалась микроструктура двух образцов из среднеуглеродистой стали марки Ст5сп. Образцы 1 и 2 предварительно были подвержены газопламенной поверхностной закалке. После образцы были подвержены ультразвуковой обработке: образец 1 (умеренный режим: линейная скорость точки контакта заготовки с индентором  $V = 1,7$  м/с, начальная глубина внедрения индентора:  $P = 0,1$  мм), образец 2 (интенсивный режим: линейная скорость точки контакта заготовки с индентором  $V = 2,5$  м/с, начальная глубина внедрения индентора:  $P = 0,2$  мм).

Микроструктура исследовалась методами оптической и электронной микроскопии. Приготовление шлифов для оптического металлографического анализа производили по стандартным методикам. Микроструктуру выявляли травлением в реактивах Марбле, а также, 5 %-ном растворе азотной кислоты в спирте. Структуру исследовали на микроскопе Meiji IM7000 при увеличениях до 1000 крат. Количественную оценку микроструктуры производили с

помощью автоматического анализатора изображений «Thixomet PRO» со встроенным набором стандартных методик. Микротвердость определяли на приборе «Micromet» (Buehler, Бельгия).

### *Результаты исследования*

Образцы микротопографий поверхностей представлены на рис. 2.39.

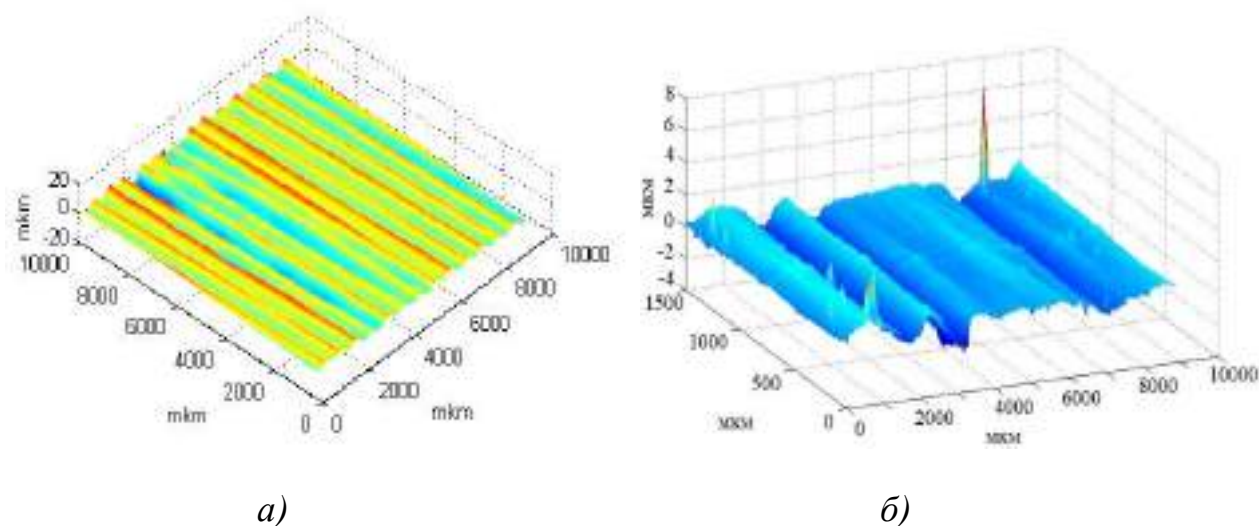
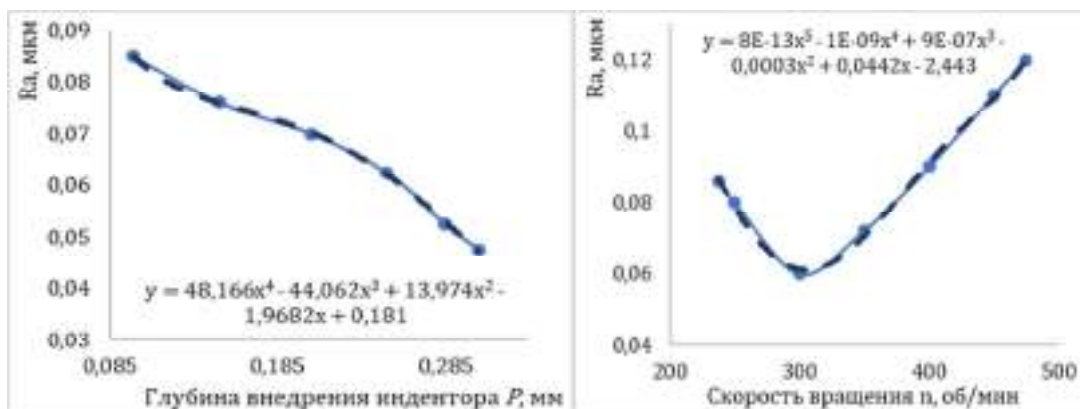


Рис. 2.39. Профиль поверхности: *a* – исходный; *б* - после БУФО

Основные результаты выполненных исследований представлены на рисунках 2.30-2.7. В частности, на рисунке 2.4а представлен график зависимости среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  от начальной глубины внедрения индентора  $P$  при скорости вращения заготовки  $n=240$  об/мин. На рисунке 2.4б представлен график зависимости среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  от скорости  $n$  вращения заготовки при начальной глубине внедрения индентора  $P=0,1$  мм.

С целью обобщения вышеприведенных результатов и возможности их использования при БУФО плоских поверхностей на строгальных или фрезерных станках вводилась линейная скорость  $V$  точки контакта заготовки с индентором.



а

б

Рис. 2.30. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$ :  
 а – от величины начальной глубины  $P$  внедрения индентора при  $n = 240$  об/мин;  
 б – от скорости  $n$  вращения заготовки при начальной глубине внедрения индентора  $P = 0,1$  мм

По результатам выполненных расчетов построен график зависимости среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  от линейной скорости  $V$  точки контакта заготовки с индентором при начальной глубине внедрения индентора  $P = 0,1$  мм, который представлен на рисунке 2.5. На рисунке 2.6а представлен график зависимости среднего числа вершин профиля на 1 см длины  $Pc$  от начальной глубины  $P$  внедрения индентора при скорости вращения заготовки  $n = 240$  об/мин. На рисунке 2.6б показан график зависимости среднего числа вершин профиля на 1 см длины  $Pc$  от скорости  $n$  вращения заготовки при начальной глубине внедрения индентора  $P = 0,1$  мм.

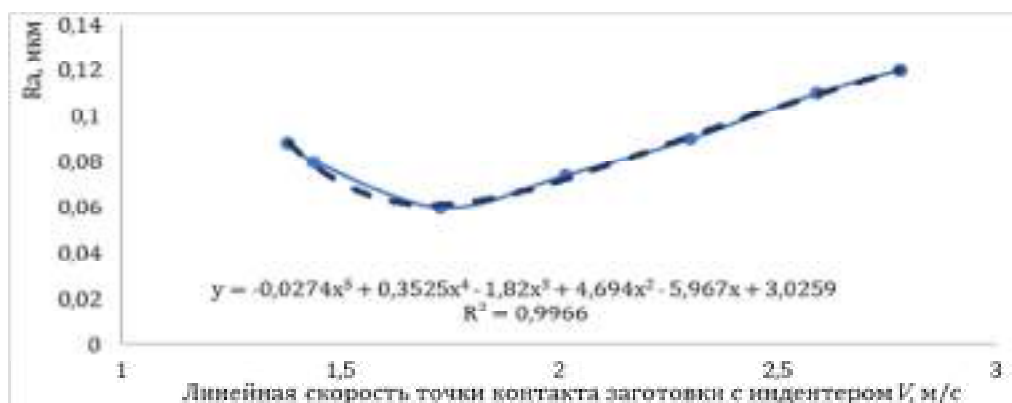
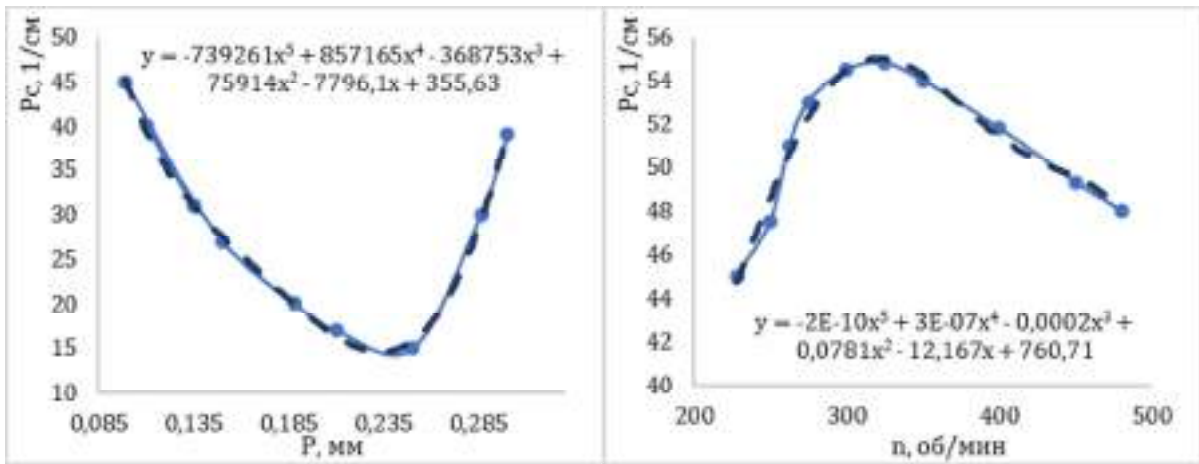


Рис. 2.31. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  от линейной скорости  $V$  точки контакта заготовки с индентором при начальной глубине внедрения индентора  $P = 0,1$  мм



*a*

*б*

Рис. 2.32. Зависимость среднего числа вершин профиля на 1 см длины  $P_c$ :  
*a* - от начальной глубины  $P$  внедрения индентора при  $n = 240$  об/мин; *б* - от скорости  $n$  вращения заготовки при начальной глубине внедрения индентора  $P=0,1$ мм

На рисунке 2.33 показан график зависимости среднего числа вершин профиля на 1 см длины  $P_c$  от линейной скорости  $V$  точки контакта заготовки с индентором при начальной глубине внедрения индентора  $P=0,1$ мм.

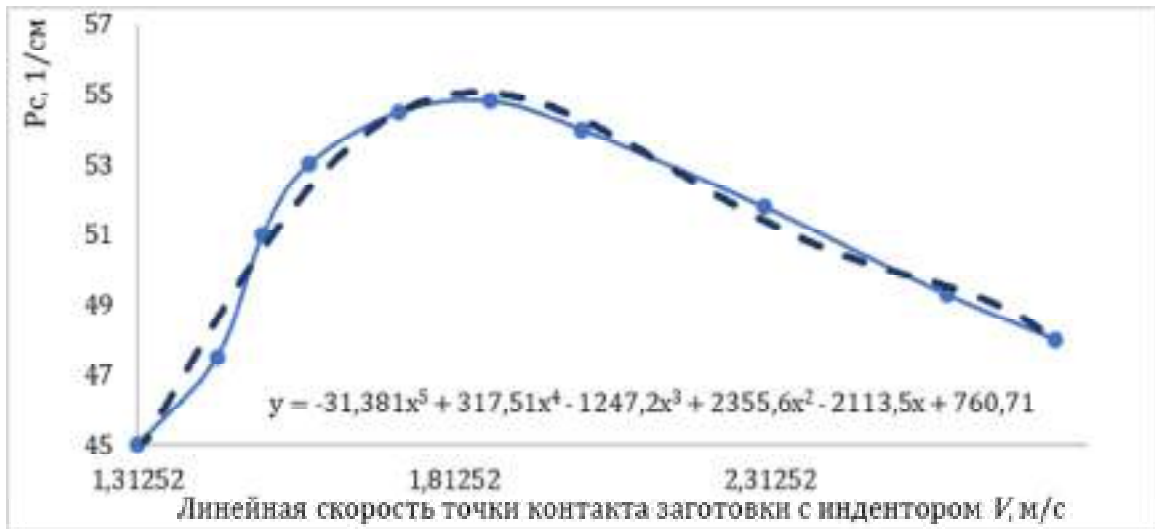


Рис. 2.33. Зависимость среднего числа вершин профиля на 1 см длины  $P_c$  от линейной скорости  $V$  точки контакта заготовки с индентором при начальной глубине внедрения индентора  $P=0,1$ мм

*Образец 1, подверженный умеренному режиму БУФО*

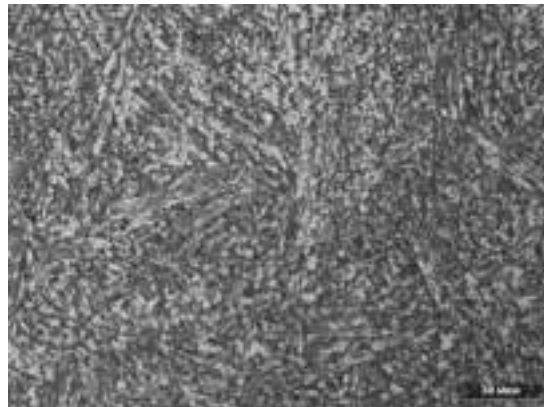
Градиентная структура образца 1 изображена на рис. 2.34.



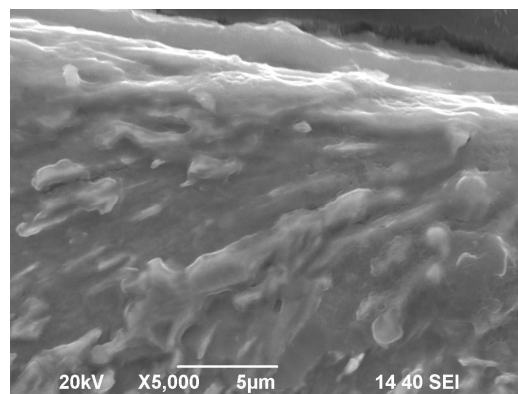


Рис. 2.34. Панорамное изображение образца,  $\times 20$

Микроструктуры поверхностного закаленного слоя до ультразвуковой обработки и после приведены на рисунке 2.35. На рисунке 2.36 приведены рентгенограммы поверхности до (*a*) и после (*б*) ультразвукового воздействия.



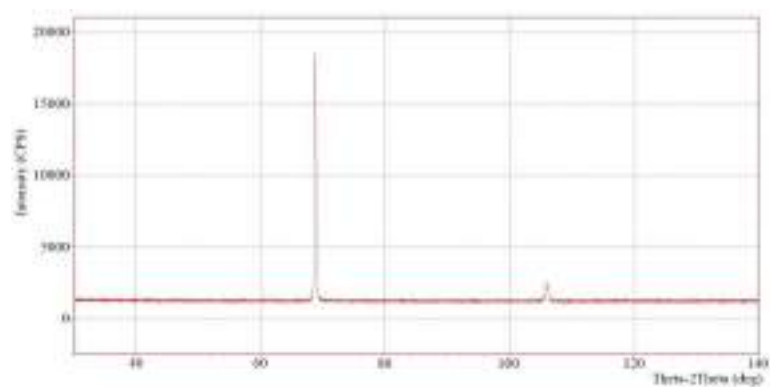
*a*



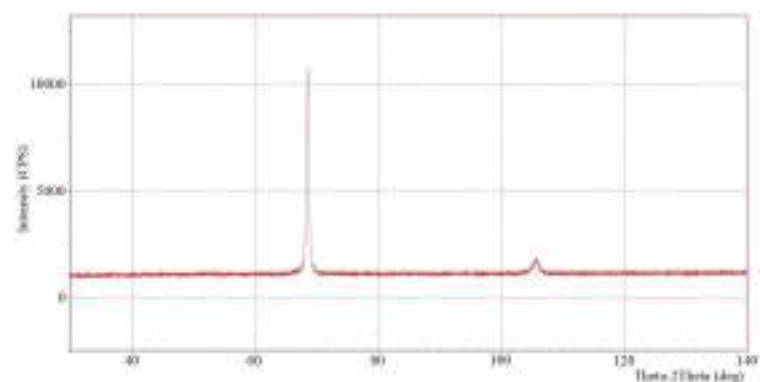
*б*

Рис. 2.35. Микроструктура поверхностного закаленного слоя:

*a* – до БУФО; *б* – после БУФО



*a*



*б*

Рисунок 2.36. Рентгенограммы поверхности до (а) и после (б) ультразвукового воздействия

*Образец 2, подверженный интенсивному режиму БУФО*

Структура поверхностного слоя после ультразвукового воздействия изображена на рисунке 2.37.

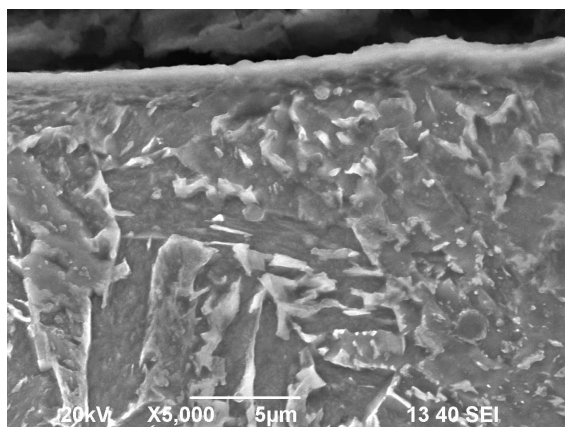
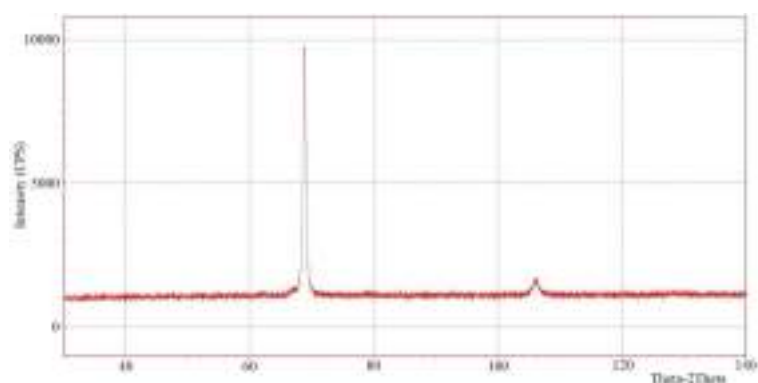
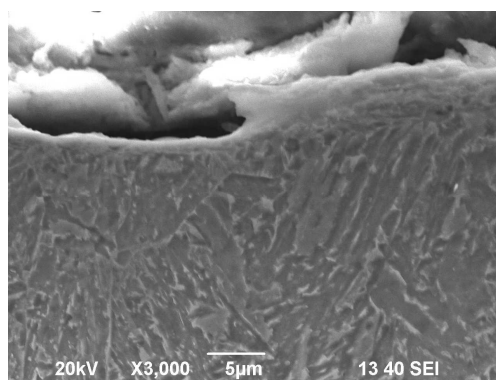


Рис. 2.37. Структура поверхностного слоя после ультразвукового воздействия

На рисунке 2.38 приведены результаты рентгеноструктурного анализа образца 2 (рис. 2.38а) и изображение скола на поверхностно наклепанном слое (рис. 2.38б).



*a*



*б*

Рис. 2.38. Результаты рентгеноструктурного анализа образца 2 (*a*) и изображение откалывания поверхностно наклепанного слоя (*б*)

### *Результаты*

Микротопография. При увеличении начальной глубины внедрения индентора среднеарифметическое отклонения профиля  $Ra$  уменьшается и поверхность становится более гладкой. Однако при этом возрастают силы, действующие на индентор, и затраты энергии на вращение заготовки. Рациональной величиной начальной глубины внедрения индентора следует считать  $P=0,1 \div 0,15$  мм.

При скорости  $n$  вращения заготовки в пределах  $280 \div 320$  об/мин, что соответствует линейной скорости точки контакта заготовки с индентором  $V$

$=1,61 \div 1,84$  м/с, средне арифметическое отклонения  $Ra$  принимает значение, близкое к минимальному, а среднее число вершин профиля на 1 см длины  $Rc$  становится максимальным, что свидетельствует о высоком качестве обработанной поверхности.

#### *Металлографические и рентгеноструктурные исследования*

Образец 1. Сталь среднеуглеродистая с содержанием углерода 0,2-0,4. Образец имеет градиентную структуру, изображенную на рисунке 6.

Верхние слои металла имеют характерное строение поверхностно-закаленных сталей. Закаленный слой имеет толщину около 1 мм и состоит из низкоотпущенного мартенсита с твердостью 4550 МПа и остаточного аустенита (рис. 2.7а). Этот слой содержит металлическую основу на базе пересыщенного  $\alpha$ - твердого раствора, о чем свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа, с незначительным количеством карбида типа  $Me_{23}C_6$ .

В результате ультразвуковой обработки по данным растровой электронной микроскопии и дюрOMETрического анализа на поверхности стали формируется модифицированный слой глубиной около 2...3 мкм. При этом наблюдается изменение фазового состава стали, которое заключается в полном исчезновении микроскопически различимых карбидных пластин. Очевидно, что карбидные частицы при интенсивной пластической деформации претерпевают разбиение и некоторое растворение в металлической основе. Растворение карбида типа  $Cr_{23}C_6$  и увеличение параметра кристаллической решетки  $\alpha$ -Fe за счет перехода в решетку матричной  $\alpha$ -фазы атомов углерода и легирующих элементов подтверждаются также данными рентгеноструктурного анализа. Кроме того, уширение рентгеновских дифракционных линий от  $\alpha$ -Fe указывает на увеличение плотности дислокаций и фрагментацию микроструктуры. Это подтверждают и результаты измерения микротвердости. Ультразвуковое модифицирование структуры поверхностного слоя стали приводит к увеличению значений микротвердости на поверхности с 4450 до 5930 МПа.

Образец 2. В результате ультразвукового воздействия формируется поверхностный слой с измененной структурой. На поверхности, на глубине 3-5 мкм, наблюдается полное исчезновение карбидных частиц. Это подтверждается как данными электронномикроскопического исследования, так и рентгеноструктурного анализа. Уменьшение линии (111) с межплоскостным расстоянием 2,4163 Å, принадлежащей карбиду типа  $Me_{23}C_6$ .

Сильное механическое воздействие приводит к механическому старению металла поверхностного слоя, что может негативно сказываться на эксплуатационных свойствах таких изделий. Обнаружено что на отдельных участках по периметру ультразвуковой обработки произошло откалывание поверхностно наклепанного слоя и его вырывание.

Результаты измерения микротвердости показали, что данный режим обработки приводит к формированию слоя с повышенными значениями. На уровне 7200 МПа, что практически в два раза выше уровня микротвердости не обработанных участков. Очевидно, что это и является одной из основных причин образования сколов.

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований на токарно-винторезном станке с использованием установки БУФО-0,63/22 определены рациональные величины начальной глубины внедрения индентора:  $P=0,1 \div 0,15$  мм. Рациональными скоростями  $n$  вращения заготовки является диапазон 280÷320 об/мин (линейная скорость точки контакта заготовки с индентором  $V=1,61 \div 1,84$  м/с). При данных скоростях обработки обеспечивается высокое качество поверхности: средне арифметическое отклонение  $Ra$  принимает значение, близкое к минимальному, а среднее число вершин профиля на 1 см длины  $Pc$  – максимальное.

Умеренное ультразвуковое модифицирование структуры поверхностного слоя привело к увеличению значений микротвердости на поверхности образца 1 с 4450 до 5930 МПа. Интенсивная ультразвуковая обработка привела к появлению сколов на поверхности образца 2. Основной причиной образо-

вания сколов является повышенное значение микротвердости – на уровне 7200 МПа.

### ***2.2.3. Процесс формирования микрорельефа контактирующих поверхностей при обработке выглаживанием с применением смазочного материала***

Моделирование процессов выглаживания с применением смазочного материала проводились на модернизированной машине трения СМЦ-2 [2.19, 2.35]. Машина СМЦ-2 состоит из механической части и электронного блока управления и контроля. Основными узлами механической части являются электродвигатель, ременная передача, редуктор, муфта, откидная каретка, зубчатая передача, механизм нагружения, индуктивный датчик момента трения. В блок управления и контроля входят кнопки «ПУСК» и «СТОП», электрический счетчик числа циклов и цифровой блок, регистрирующий изменение момента трения в процессе испытаний.

Специалистами ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» проведена модернизация машины трения СМЦ-2 (рис. 2.39). Техническая модернизация заключалась в отказе от использования контрольно-измерительных приборов старой конструкции, переход на полупроводниковые схемы управления сигналами, использование контроллеров для управления и слежения за несколькими исследуемыми параметрами одновременно. Также модернизация машины трения коснулась и силовой части. Были установлены частотный преобразователь тока электродвигателя, на каждую из его трех фаз электродвигателя смонтирована двухканальная система регистрации энергосиловых параметров (напряжение и ток), с целью определения изменения загрузки главного привода в процессе проведения эксперимента.



Рис. 2.39. Комплекс оборудования для испытания материалов на трение и износ:

1 - машина трения СМЦ-2; 2 - блок обработки и преобразования информации;  
3 - шкаф коммутации

После проведенной модернизации повысилась точность измерения исследуемых параметров:

- для момента трения погрешность измерения составляет  $+0,015 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;
- для определения силы тока погрешность измерения находится в пределах  $+0,5\%$ ;
- для определения температуры с помощью термопар и бесконтактных пирометров погрешность  $\pm 1\text{C}^0$ ;

Количество регистрируемых входящих сигналов в единицу времени по каждому из исследуемых параметров составляет: 8 изм./сек.

Параметры микротопографии поверхности роликов измеряли с использованием стандартной программы исключения формы поверхности (используемое оборудование представлено в п. 2.2.1.1). Параметры микротопографии фиксировали как без использования фильтров выделения SL-поверхности, так и с использованием стандартных фильтров с длинноволновой границей  $\lambda_c = 0,8$

мм и соответствующей ей коротковолновой границей  $\lambda_s = 25$  мкм. Данный режим измерения соответствует стандарту ISO 25178. Оптический профилометр обеспечивает разрешение по вертикали 1 Å. Общий диапазон измерений по вертикали от 0.1 нм до 10 мм.

На рис. 2.40-2.42 [2.35-2.39] представлены фрагменты карт поверхности образцов в одинаковом масштабе и гистограммы распределения ординат этих поверхностей после различных технологических операций по обработке поверхности образца.

Исследовались параметры микротопографии согласно ГОСТ ИСО 25178-2. Характеристиками гистограмм являются амплитудные параметры Sa, Sq, Sku, Ssk (таблица 2.6). Изрезанность поверхности характеризуют частотные параметры Sdq, Sdr, Sds, Sal (таблица 2.6).

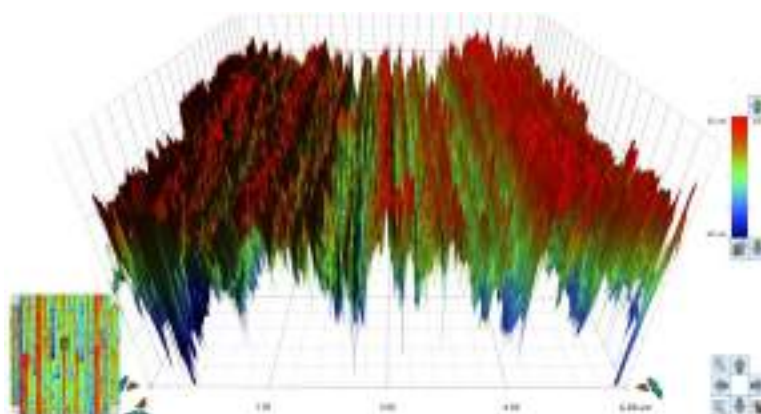


Рис. 2.40. Карта поверхности ролика после токарной обработки



Рис. 2.41. Гистограмма распределения ординат поверхности ролика после токарной обработки



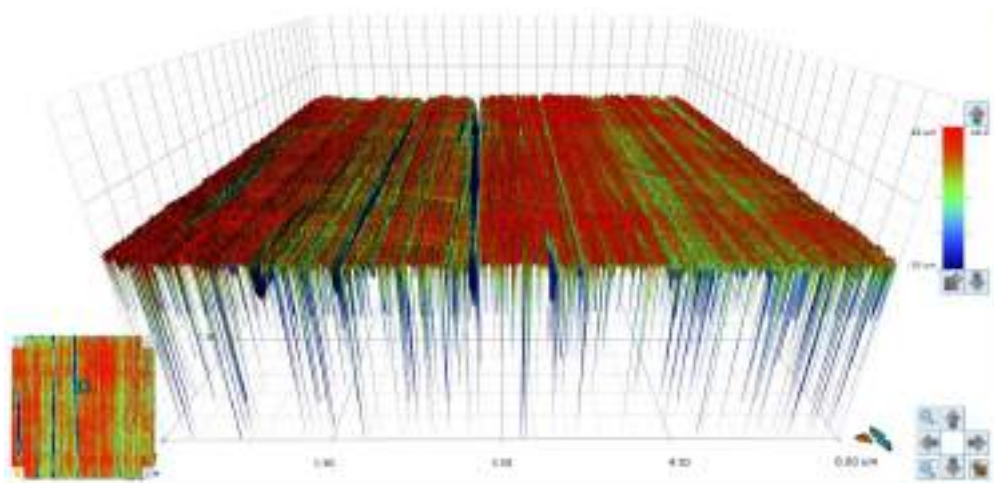


Рис. 2.42. Карта поверхности ролика после шлифования

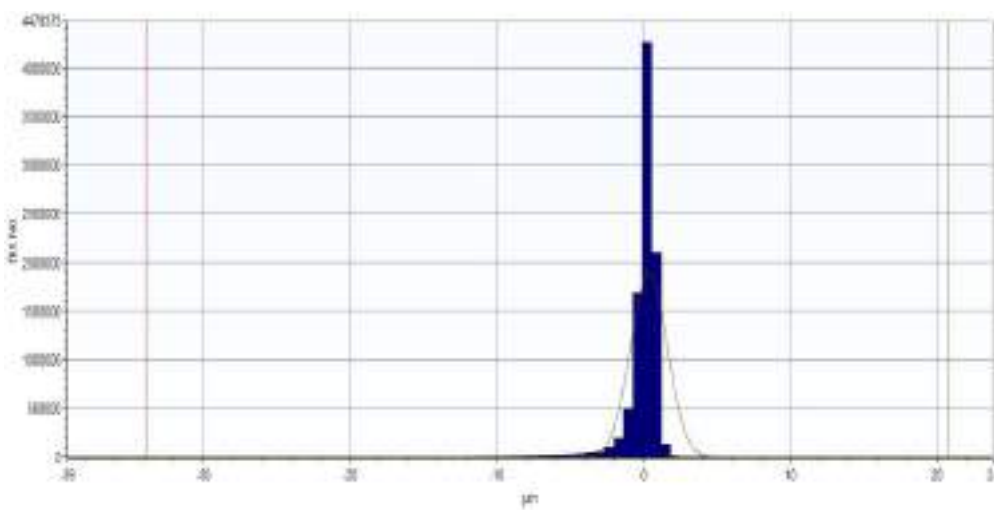


Рисунок 2.43. Гистограмма распределения ординат поверхности ролика после шлифования

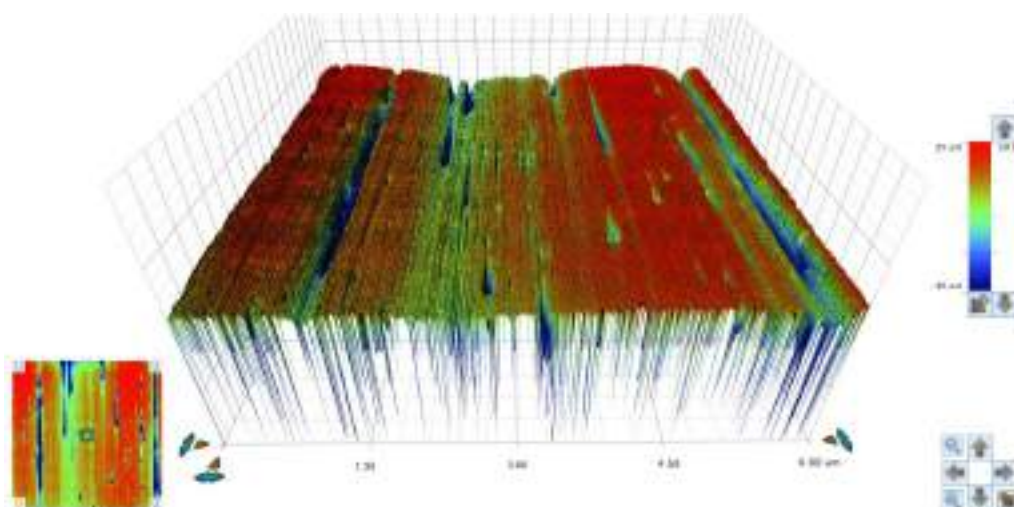


Рисунок 2.44. Карта поверхности ролика после обработки выглаживанием с применением смазочного материала

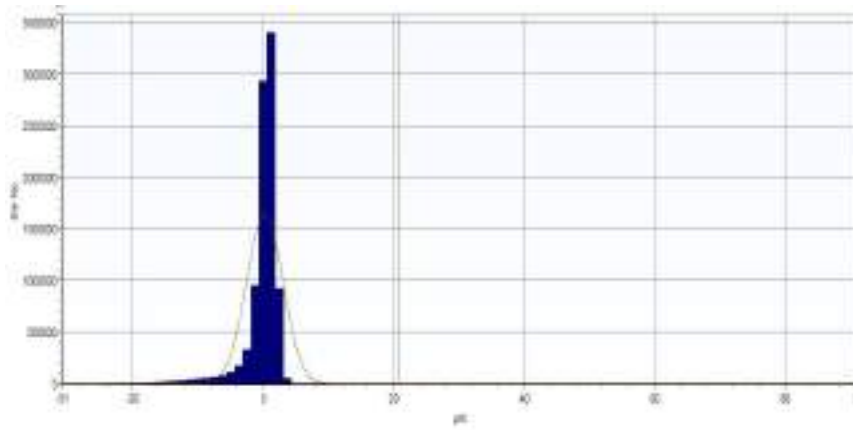


Рисунок 2.45. Гистограмма распределения ординат поверхности ролика после обработки выглаживанием с применением смазочного материала

Таблица 2.6

Характеристики микротопографии поверхностей до и после исследований

	Sa	Sku	Sp	Sq	Sv	Sz	Sdq	Vvc	Sds
	мкм		мкм	мкм	мкм	мкм	град	мкм <sup>3</sup> / мкм <sup>2</sup>	1/мм <sup>2</sup>
1	4,04	3,58	28,1	5,17	-26,9	55,0	65,8	6,04	3899
2	2,38	5,03	18,9	3,12	-20,4	39,4	46,5	3,48	3039
3	1,70	5,77	23,5	2,25	-10,1	33,60	38,50	2,68	3014
4	2,40	4,75	34,0	3,09	-18,9	52,90	28,80	3,08	2843

В результате исследований параметров полученных поверхностей после обработки выглаживанием с применением смазочного материала разработана следующая формула по определению необходимого количества смазочного материала.

$$Q = Ln \left[ \left( \left( \frac{\beta}{180 \cdot \pi} + \left( 90 - \frac{b_{\text{в}}}{D} \right) \right) h_{\text{в}}^{\beta} \frac{R_{\alpha}}{R_{\alpha}^0} \right) + (l_k h_{\text{сп}}) + \left( \frac{3\eta_0 \theta (v_0 + v_p)}{\varphi [1 - e^{-\theta \cdot v_p^2}]} + k_{\text{ин}} \Sigma R_{\alpha} \right) \left( \frac{v_0 + v_p}{v_p + v_{\text{сп}}} \right) \right] - \left( Q_{\alpha} - \left( \frac{h_{\alpha} - h_{\alpha}^{-}}{h_{\alpha}} \right) Q_{\alpha} \right) \quad (2.28)$$

где  $L$  – ширина ролика, мм;  $\beta$  – угол нанесения СМ к горизонтальной оси (град);  $h_{\text{в}}$ , – длина зоны взаимного контакта, мм;  $D$  – диаметр ролика мм.;  $h_{\text{в}}^{\beta}$  – толщина СМ базовая  $h_{\text{в}}^{\beta} = 0,4 \text{ мкм}$ ;  $R_{\alpha}$ ,  $R_{\alpha}^0$  – экспериментальное и базовое зна-

чения параметров шероховатости поверхности ролика соответственно,  $R_a^0 = 1,5 \text{ мкм}$ ;  $n$  – количество оборотов ролика в мин;  $l_k$  – ширина площадки фрикционного контакта;  $h_{ср}$  – средняя толщина, мкм.;  $\eta_0$  – динамическая вязкость СМ,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $\theta$  – пьезокоэффициент вязкости,  $\text{Па}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\varphi$  – угол захвата СМ, рад.;  $\sigma_{\text{т}}^*$  – вынужденный предел текучести,  $\sigma_{\text{т}}^* = 1,15\sigma_{\text{т}}$ , МПа;  $k_{\text{ш}}$  – коэффициент, характеризующий интенсивность захвата СМ неровностями поверхности,  $k_{\text{ш}} = 0,09 - 0,015$ ;  $\Sigma R_z$  – суммарная шероховатость, мкм;  $v_{\text{в}}, v_{\text{н}}, v_{\text{ср}}$  – угловая скорость верхнего, нижнего валков и среднее их значение,  $\text{с}^{-1}$ ;  $Q_a$  – расход смазочного материала на зону адгезии, мл/мин;  $h_1^-$  – потерянная толщина СМ, мкм;  $h_a$  – толщина СМ на выходе из фрикционного контакта, мкм

$$h_{\text{ср}} = \frac{h_0 + h_1}{2}, \quad (2.29)$$

$$h_0 = \frac{3\eta_0\theta(v_{\text{в}} + v_{\text{н}})}{\varphi[1 - e^{-\theta\sigma_{\text{т}}^*}]} + k_{\text{ш}}\Sigma R_z, \quad (2.30)$$

$$h_1 = h_0 \frac{(v_{\text{в}} + v_{\text{н}})}{(v_{\text{н}} + v_{\text{ср}})}, \quad (2.31)$$

где  $\eta_0$  – динамическая вязкость СМ,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $\theta$  – пьезокоэффициент вязкости,  $\text{Па}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\varphi$  – угол захвата СМ, рад.;  $\sigma_{\text{т}}^*$  – вынужденный предел текучести,  $\sigma_{\text{т}}^* = 1,15\sigma_{\text{т}}$ , МПа;  $k_{\text{ш}}$  – коэффициент, характеризующий интенсивность захвата СМ неровностями поверхности,  $k_{\text{ш}} = 0,09 - 0,015$ ;  $\Sigma R_z$  – суммарная шероховатость, мкм.  $h_1$  – толщина СМ на выходе из контакта, мм;  $v_{\text{в}}, v_{\text{н}}, v_{\text{ср}}$  – угловая скорость верхнего, нижнего валков и среднее их значение,  $\text{с}^{-1}$ .

### 2.3. Разработка оборудования и технологии нанесения покрытий, формирования и управления регламентированного параметра шероховатости контактирующих поверхностей тяжело нагруженных узлов трения с улучшенными фрикционными условиями функционирования

Технология брашинг основана на механотермическом воздействии специального инструмента с гибкими элементами (обычно металлическая проволооч-

ная щетка) на обрабатываемую поверхность. Идея метода была запатентована в 1937 году А.А. Абиндером.

Исследование возможностей практической реализации технологии брашинг, математическое моделирование, создание промышленных конструкций лакирующих установок и поиск рациональных режимов обработки были начаты только в 80-х годах 20 века. Большую роль в этом сыграли исследования, выполненные в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова [2.25-2.27]. Механическое лакирование вращающейся металлической щеткой исследуют и в Тольяттинском государственном университете под руководством Драчева О.И., а также в Московском институте стали и сплавов (работы Тулупова С.А., Смирнова О.М).

Технология брашинг является универсальным методом повышения служебных свойств деталей машин, позволяющий не только упрочнить поверхностный слой изделия, но и сформировать “защитное” покрытие. В отличие от напыления, наплавки, диффузионного насыщения, модифицирования, легирования в данном методе не требуется дополнительная подготовка поверхности.

### ***2.3.1 Оборудование нанесения покрытий методом фрикционного лакирования***

В Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова разрабатывается оборудование для нанесения покрытий методом фрикционного лакирования (брашинг) различного исполнения (рис. 2.46-2.49) [2.29, 2.30, 2.40-43].

Таким образом, разработаны и изготовлены устройства, позволяющие осуществлять формирование покрытий на сверлильном, токарном, плоско- и продольно-шлифовальном станках.



Рис. 2.46. Оборудование для фрикционного плакирования мобильного исполнения



Рис. 2.47. Оборудование для фрикционного плакирования длинномерных изделий



а

б



в

Рис. 2.48 – Нанесение покрытия методом электрофрикционного плакирования:  
а – подключение установки источника токовых импульсов; б – процесс нанесения покрытия; в – установка лабораторного исполнения



Рис. 2.49 – Оснастка для нанесения покрытий на внутреннюю часть полых цилиндрических изделий

### 2.3.2 Технология нанесения покрытий методом фрикционного плакирования

Важным аспектом качественного нанесения покрытий методом плакирования гибким инструментом являются технологические режимы обработки: натяг, число проходов, скорость вращения проволочной щетки и др. в зависимости от вида исполнения оборудования.

*Определение энергосиловых параметров процесса при нанесении покрытий методом брашинг*

В основу расчёта геометрических, кинематических, силовых и энергетических параметров процесса обработки поверхностей изделия щётками положена гипотеза Винклера-Циммермана с применением основных законов механики.

Геометрические параметры пятна контакта рассмотрим отдельно для процесса обработки плоских деталей.

Длину пятна Kontakта определим как сумму длин набегающего ( $v_H$ ) и сбегающего ( $v_K$ ) участков,  $l = v_H + v_K$  определяя значение соответствующих им центральных углов  $\varphi_H$  и  $\varphi_K$ .

$$h_{II} = (R + l) \sin \varphi_{II}; \varphi_H = \arccos \frac{R+l-N}{R+l}; h_K = R \cdot \sin \varphi_K;$$

$$\varphi_K = \arccos \frac{R-N}{R}, \quad (2.32)$$

где  $R$  – радиус обоймы;  $l$  – длина ворса;  $N$  – натяг.

Ширина пятна контакта может быть найдена приблизительно, учитывая, что угол отклонения ворса  $\beta_0$  равен половине своего значения при отклонении ворса на полную длину  $l$ .

Плоский контакт:

$$\beta_0 = \frac{1}{2} \arccos \frac{l-N}{l}; h = h_{us} + 2(l-N) \operatorname{tg} \beta_0, \quad (2.33)$$

где  $h_{us}$  – ширина ворса щетки в свободном состоянии.

Проведенные расчеты по формулам (2.32)÷(2.33) показали, что длина набегающего ( $\mathbf{v}_H$ ) и сбегающего ( $\mathbf{v}_K$ ) участков отличаются друг от друга не более чем на 2-5% в зависимости от условий обработки. Поэтому с целью упрощения дальнейших выкладок принимаем, что длина зоны контакта  $l \approx 2h_H \approx 2h$ . Это приведет к некоторому увеличению значений энергосиловых параметров.

Для определения кинематических и энергосиловых характеристик рассмотрим деформацию упругих ворсинок, вычитая из неё часть, обусловленную геометрией взаимодействующих тел, их формой и размерами в предположении отсутствия трения на контакте, когда нет тангенциальных смещений на контакте и деформацию.

Для того чтобы конец ворсинки при движении двигался без тангенциального смещения при вращении с угловой скоростью  $\omega$ , необходимо, чтобы скорость этой точки была равна:

$$V_{\text{Б.Т.С.}} = \frac{\omega R_0 K}{\cos \beta} \quad (2.34)$$

где  $V_{\text{Б.Т.С.}}$  – скорость торца стержня тангенциального смещения.

К определению энергосиловых параметров.

Преобразуя это выражение, для плоского контакта:

$$V_{\text{Б.Т.С.}} = \omega \frac{x^2 + R_0^2}{R_0}, \quad (2.35)$$

где  $R_0 = R + l - N$ ;  $x$  – координата рассматриваемой точки на плоском контакте.

Полная скорость движения конца упругого стержня, если она претерпевает в зоне контакта изменяющееся тангенциальное смещение, будет равна

$$V = V_{\text{Б.Т.С.}} + \frac{du}{dt} = V_{\text{Б.Т.С.}} + V \frac{dn}{dx} \text{ – для плоского контакта,} \quad (2.36)$$

где  $u$  – тангенциальное перемещение конца стержня, функции координаты точки.

Перенимая распределение нормальных давлений при статическом прижатии щетки к детали параболическому закону:

$$g_{\text{п.ст}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{Q}{b^3} (b^2 - x^2) \text{ – для плоского контакта} \quad (2.37)$$

где  $Q$  – погонная сила прижатие щетки к инструменту, считают справедливой гипотезу Винклера о линейной зависимости тангенциальных смещений  $u$  и удельных касательных сил  $g_t/g_n = \lambda u$ , где  $\lambda$  – коэффициент тангенциальной жёсткости и принимая законы связи удельных касательных и нормальных сил в виде  $g_t = f \cdot g_{\text{п.ст}}$ , где  $f$  – коэффициент трения скольжения щётки по инструменту, получим выражение для производных уравнений (2.38)

$$\frac{du}{dx} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{b \cdot x \cdot f}{b^3 \lambda}. \quad (2.38)$$

Подставляя их в (2.35) и учитывая (2.36) получим уравнение для скорости скольжения в любой точке линии контакта.

$$V = \omega \frac{x^2 + R_0^2}{R_0^2} \cdot \frac{2b^3 \cdot \lambda}{2b^3 + 3Qxf} \pm V_g, \quad (2.39)$$

где  $V_g$  – скорость движения поверхности детали.

Для нахождения действительного распределения удельных нормальных и касательных сил по длине контакта воспользуемся вторым законом сохранения массы для упрощённой модели тела, состоящего из ряда упругих стержней, каким собственно является металлическая щётка, считая, что при движении упру-



гих стержней без тангенциального смещения нормальное давление распределены по статическому закону:

$$g_n \cdot V = g_{\text{п.ст}} \cdot V_{\text{В.Т.С}} \quad (2.40)$$

Решая относительно  $g_n$ , получим для плоского контакта:

$$g_n = \frac{3}{4} \cdot \frac{Q}{b^3} (b^2 - R^2 \sin^2 \gamma) \left(1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{Q \cdot f R 2 \gamma}{b^3 \lambda}\right) \quad (2.41)$$

Мощность расходуется на трение в контакте щётки с обрабатываемой деталью, определим по формуле:

Для плоского контакта:

$$N_{\text{ТР}} = \int^b g_n \cdot h \cdot f \cdot V_{\text{дх}} \quad (2.42)$$

Или, преобразуя и интегрируя, для плоского контакта:

$$N_{\text{ТР}} = Q h f \left(R_0 + \frac{b^2}{5R_0}\right) \omega. \quad (2.43)$$

Вращающий момент определим по формуле:

$$N_{\text{ВР}} = N_{\text{ТР}} = /\omega. \quad (2.44)$$

Неизвестный коэффициент тангенциальной жёсткости  $\lambda$ , входящий в уравнения (2.39), (2.40) можно определить, приравняв выражение вращающего момента, найденного из уравнения мощности баланса и уравнения равновесия сил.

Для плоского контакта, как показано, он равен

$$\lambda = 1,5 \frac{Q \cdot R_0}{b^3}. \quad (2.45)$$

Входящую в выражения (2.39), (2.41) вагонную силу прижатия и щётки детали определяли из уравнения  $Q = 2,862N^2 - 2,34N + 0,868$ , полученного статической обработкой большого числа экспериментальных данных для щёток, изготовленных из стальной канатной проволоки.

С целью определения технологических режимов, обеспечивающих получение сплошных покрытий из металлов различной твердости, с использованием методов планирования эксперимента был спланирован и реализован полный факторный эксперимент  $2^3$ . По одному и тому же плану наносились алюминиевые и медные покрытия, отличающиеся между собой по твердости в 2-3 раза. В качестве факторов эксперимента были приняты: величина натяга ворса щетки  $\Delta$  в зоне контакта с покрываемой поверхностью (зависит от усилия прижатия щетки); число проходов щетки по поверхности образца  $N$  (этот параметр характеризует величину времени обработки поверхности); твердость обрабатываемой (покрываемой) поверхности.

В качестве образцов использовали образцы на холоднокатаной стали 50 (ширина 20 мм, толщиной 3 мм, длина 100 мм). Нанесение покрытия на образцы проводили на экспериментальной установке при скорости вращения щетки  $n = 1600$  об/мин, что при диаметре щетки по краю ворса  $D = 250$  мм составляет линейную скорость скольжения ворса  $V=24$  м/с. Скорость перемещения стола станка принимали равной 20 мм/сек.

Уровни факторов  $X_i$ , интервалы их варьирования и кодовые обозначения  $X_i$  приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

Уровни факторов и интервалы и варьирования

Уровни	Факторы	Натяг $\Delta$ , мм		Число проходов $N$		Твердость пов.	
		$X_1$	$x_1$	$X_2$	$x_2$	$X_3$	$x_3$
Верхний		1,2	+1	8	+1	закл.	+1
Нулевой		0,9	0	6	0	-	-
Нижний		0,6	-1	4	-1	отож.	-1
Интервал варьирования		0,3	-	2	-	-	-

Твёрдость поверхности является качественным фактором: за верхний уровень принята твердость закаленной поверхности (образцы подвергались закалке).

ки с низким отпуском на твёрдость 45-50 HRC). За нижний уровень принято твёрдость холоднокатаного металла после проковки (8-15 HRC).

Для определения дисперсии опыта производили трехкратное дублирование каждого опыта. Расширенная матрица плана и результаты опытов приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Расширенная матрица плана  $2^3$

N	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	Толщина покрытия, мкм	
									Al	Cu
1	+	+	+	+	+	+	+	+	17,6	1,4
									12,5	0,6
									16,2	0,1
2	+	-	+	+	-	-	+	-	10,5	5,9
									16,5	4,7
									16,2	4,8
3	+	+	-	+	-	+	-	-	13,8	0,1
									11,0	4,8
									8,0	0,3
4	+	-	-	+	+	-	-	+	3,6	3,2
									9,5	3,8
									16,2	5,2
5	+	+	+	-	+	-	-	-	0,8	0,2
									3,7	0,7
									5,3	1,7

Продолжение таблицы 2.8

N	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	Толщина покрытия, мкм	
									Al	Cu
6	+	-	+	-	-	+	-	+	9,8	3,5
									4,0	4,7
									6,3	4,1
7	+	+	-	-	-	-	+	+	0,1	0,1
									2,1	2,9
									0,8	1,8
8	+	+	-	-	-	-	+	+	1,8	4,3
									2,0	4,1
									3,0	4,7

Измерение толщины покрытия осуществлялась на микрошлифах поперечного сечения образцов на микроскопе МИК-8. Делали замеры в 10 равностоящих точках и определялось среднее значение.

Проверка однородности ряда дисперсий, проверка значимости коэффициентов и адекватности уравнений и регрессии проводились по известной методике [2.32].

В результате расчетов были получены следующие адекватные модели при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

$$y_{Al} = 7,60 + 2,14x_1 + 4,49x_2 \quad (2.46)$$

$$y_{Cu} = 2,82 + 1,60x_1 \quad (2.47)$$

Полученные уравнения (2.46) и (2.47) позволяет выявить ряд закономерностей:

- более мягкое алюминиевое покрытие получается толще медного и процесс его нанесения идет более интенсивно. При увеличении времени обработки поверхности 2 раза ( $N = 4 - 8$ ) толщина покрытия возрастает 3-4 раза. При этом влияние времени обработки в исследуемом интервале на образование покрытия более чем в два раза сильнее, чем увеличение натяга ворса щётки. Если учесть, что с увеличением натяга ухудшаются условия работы ворса и качество обрабатываемой поверхности, то для увеличения толщины покрытия наиболее рациональным следует признать способ увеличения времени обработки поверхности. В данном случае мы рассматриваем не время в общепринятом смысле в секундах или минутах, а количество ворсинок щетки, обрабатывающих каждую точку поверхности. Это количество можно увеличить либо за счёт числа проходов образца, либо за счёт увеличения скорости вращения щётки;

- твёрдость покрываемой поверхности не влияет на толщину алюминиевого покрытия, что объясняется тем, что уже после первых проходов образца на его поверхности образуется сплошное покрытие и при дальнейшей обработке (т.е. при  $N = 4 - 8$  нанесение покрытия осуществляется по покрытой алюминием поверхности);

- на формирование медных покрытий значимо влияет только лишь твёрдость покрываемой поверхности. Связано это с низкой интенсивностью увеличения толщины покрытия из-за повышенной его твердости, в связи с чем даже после 8 проходов медное покрытие не является сплошным, как на закаленных,

так и на незакаленных образцах, и поэтому непокрытые участки поверхности оказывают влияние на процесс обработки поверхностного слоя.

Как следует из уравнений (2.46) и (2.47) закаленная поверхность и высокая твердость материала покрытия способствует созданию условий неблагоприятных для нанесения покрытий. Так как рабочий инструмент прокатного оборудования имеет закалённую поверхность высокой твердости (55-60 HRC), а для использования в качестве покрытия наиболее целесообразны твёрдые тугоплавкие металлы, такие как титан, хром, молибден, то процесс покрытия этими металлами поверхностей инструмента будет затруднен, вследствие чего требуется разработка более сложных многоэтапных режимов обработки поверхности.

С этой целью была исследована возможность нанесения титановых покрытий на закаленную поверхность в два этапа. На каждом этапе варьирования величину натяга ворса, времени обработки и линейной скорости ворса относительно поверхности. С учетом твердости титана количество проходов образца приняли больше, чем в предыдущем эксперименте. Для опытов использовали закаленные Образцы из стали 50 аналогичные тем, которые использовались для покрытия медью и алюминием. Факторы эксперимента с уровнями их варьирования  $X_i$  значением  $X_i$  предоставлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9

Уровни факторов и интервалы их варьирования

Факторы	Натяг, мм				Число проходов				Лин. скорость, м/с			
	1 этап		2 этап		1 этап		2 этап		1 этап		2 этап	
	$X_1$	$x_1$	$X_3$	$x_3$	$X_5$	$x_5$	$X_6$	$x_6$	$X_2$	$x_2$	$X_4$	$x_4$
Верхний уровень	1,5	+1	1,5	+1	20	+1	20	+1	20	+1	20	+1
Нулевой уровень	1,0	0	1,0	0	15	0	15	0	15	0	15	0
Нижний уровень	0,5	-1	0,5	-1	10	-1	10	-1	10	-1	10	-1
Интервал варьирования	0,5		0,5		5		5		5		5	

Для сокращения числа листов вместо плана полного факторного эксперимента  $2^6$  была использована его дробная реплика  $2^{6-2}$  с обобщающим определяющим контрастом.

$$1 \equiv x_1 x_2 x_3 x_5 \equiv x_2 x_3 x_4 x_6 \equiv x_3 x_4 x_5 x_6. \quad (2.48)$$

Определяющий контраст был выбран таким для обеспечения возможности независимой оценки линейных эффектов факторов и парных взаимодействий первых четырёх факторов  $x_1, x_2, x_3, x_4$ . Система смещение эффектов будет следующая (эффекты порядка больше двух опущены)

Определяющий контраст был выбран таким для обеспечения возможности независимой оценки линейных эффектов факторов и парных взаимодействий первых четырёх факторов  $x_1, x_2, x_3, x_4$ . Система смещение эффектов будет следующая (эффекты порядка больше двух опущены):

$$\begin{aligned} h_1 &> \beta_1 \mid \dots; h_2 > \beta_2 \mid \dots; h_3 > \beta_3 \mid \dots; h_4 > \beta_4 \mid \dots; h_5 > \beta_5 \mid \dots \\ h_6 &> \beta_6 \mid \dots; h_{12} > \beta_{12} \mid \beta_{35} \mid \dots; h_{13} > \beta_{13} \mid \beta_{25} \mid \dots \\ h_{14} &> \beta_{14} \mid \dots; h_{23} > \beta_{23} \mid \beta_{15} \mid \beta_{46} \mid \dots; h_{24} > \beta_{24} \mid \beta_{36} \mid \dots \end{aligned} \quad (2.49)$$

Принимаем, что парные взаимодействия факторов  $x_1, x_2, x_3, x_4$  с  $x_5, x_6$ , а также тройные взаимодействия более высоких порядков незначимы. Матрица плана 2, соответствующая выбранному контрасту и с результатами опытов, представлены в таблице 2.10. План эксперимента был выполнен для щёток с разным диаметром ворсинок ( $d=0,25$  мм;  $d=0,47$  мм) с целью изучения влияния этого фактора. Опыты в матрице плана не дублировались, а дисперсия воспроизводимости определялась дублированием одного опыта в центре плана.

Дисперсия опыта  $S_y^2 = 0,04$  при числе степеней свободы  $f = 3$ . По результатам проведённого эксперимента получили следующие адекватные уравнение регрессии:

При  $d=0,25$  мм (уровень доверительной вероятности  $\alpha = 0,01$ ):

$$y = 0,81 + 0,16x_1 + 0,28x_2 + 0,34x_3 + 0,18x_3 + 0,22x_2x_4 \quad (2.50)$$

При  $d=0,47$  мм ( $\alpha = 0,05$ ):

$$y = 0,48 + 0,22x_2 + 0,21x_1x_4 \quad (2.51)$$

Матрица плана  $2^{6-2^x}$ 

	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{34}$	Толщина покр., МКМ	
														d=0,25	d=0,47
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2,20	0
2	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	2,40	1,51
3	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	0,15	0,66
4	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	0,16	0,13
5	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	0,51	0,37
6	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	0,20	0,82
7	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	0,95	0,03
8	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	0,12	0,11
9	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	1,04	1,28
10	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	0,78	0,68
11	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-	+	-	2,0	0,71
12	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	0,41	0,47
13	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	0,82	0,43
14	+		+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,65	0,53
15	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+	0,07	0,54
16	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	0,36	0,08

Анализ уравнение (2.50) и (2.51) показывает, что существенно влияет на возрастание толщины покрытия увеличение натяга на обоих этапах обработки ( $x_1x_3$ ), а также увеличение линейной скорости ворса на первом этапе ( $x_2$ ). Причём, увеличение натяга на втором этапе обработки почти в два раза сильнее влияет на формирование покрытия, чем увеличение натяга на первом этапе.

Эффекты парных взаимодействий  $x_2x_3$  и  $x_2x_4$  анализировать трудно, так как они являются смешанной оценкой несколько парных взаимодействий. В тоже время эффект парного взаимодействия  $x_1x_4$ , входящие в уравнение (2.50), описывающее формирование покрытия при обработке щёткой с диаметром ворса  $d = 0,047 \text{ мм}$ , позволяет дать оценку совместного влияния натяга ворса щетки на первом этапе со скоростью вращения щетки на последующем этапе. Отрицательное значение коэффициента при этом взаимодействии говорит о том, что увеличить толщину покрытия можно двумя путями:

в одном случае работать с минимальным натягом ворса на первом этапе и максимальным на втором; в другом случае работать с максимальным натягом ворса на первом этапе и минимальной скоростью вращения щетки на втором.

Анализ матрицы плана эксперимента показывает, что в первом случае толщина покрытия получается больше. Таким образом, можно выделить следующую совокупность значений факторов, при которой достигается наибольшая толщина титанового покрытия вне зависимости от диаметра ворсинок щетки:  $\Delta_1 = 0,5 \text{ мм}$ ;  $\Delta_2 = 1,5 \text{ мм}$ ;  $V_1 = V_2 = 20 \text{ м/с}$ . Эти значения соответствуют второму опыту матрицы плана. Интересен тот факт, что количество проходов щетки (время обработки) в том опыте минимально (10+10). Принимая во внимание, что факторы  $x_5$  и  $x_6$  статистически не значимы, можно видеть, что увеличение времени обработки щеткой не привело к увеличению толщины покрытия. Особенно это заметно при использовании щетки с увеличенным диаметром ворсинок.

#### *Выводы*

1. На основе экспериментальных данных и зависимостях разработано программное обеспечение, позволяющие определять технологические параметры фрикционного плакирования [2.44, 2.45].

2. При нанесение твердых покрытий на закалённые поверхности для каждого режима обработки, который характеризуется величиной натяга ворса щетки, линейной скоростью сложения ворса по обрабатываемой поверхности и размерами ворсинок, существует определенная оптимальная величина времени нанесения покрытия, превышение которой не только увеличивает, но может и уменьшить толщину уже образовавшегося покрытия.

3. При нанесении покрытий, работать нужно на максимальных скоростях вращения щетки, применяя поэтапно нанесение покрытия с постепенным увеличением натяга ворса щетки в пределах 0,5-2,0 мм.

4. Чем меньше твердость наносимого покрытия и покрываемой поверхности, чем интенсивнее идет процесс формирования покрытия.



## **2.4. Результаты промышленных испытаний усовершенствованных технологии нанесения покрытий, формирования и управления регламентированного параметра шероховатости контактирующих поверхностей тяжело нагруженных узлов трения металлургических механизмов**

### ***2.4.1 Испытание покрытий, нанесенных на резьбовые соединения труб нефтегазового сортамента***

Из большого разнообразия методов формирования покрытий получает распространение сравнительно недорогой и простой в реализации метод плакирования гибким инструментом или технология «Брашинг», где в качестве гибкого инструмента используется вращающаяся металлическая щетка с проволочным ворсом, а покрытие формируется за счет переноса ворсинками щетки микрочастичек из материала-донора на поверхность обрабатываемой детали. Указанный метод хорошо зарекомендовал себя при решении задач, связанных с повышением ресурса деталей металлургического оборудования. В станкостроении положительные результаты получены при его использовании для устранения дефектов в виде натиров, царапин и задиров на трущихся поверхностях деталей станков (клиньев, поперечин, и др.).

Одним из перспективных направлений повышения износостойкости резьбовых соединений труб нефтегазового сортамента является применение защитных многофункциональных покрытий. К многофункциональным покрытиям резьбовых соединений труб предъявляют следующие требования: обеспечение необходимого уровня износостойкости и антизадирных свойств при многократных циклах свинчивания-развинчивания, и высокая коррозионная стойкость резьбовых поверхностей. Данная проблема решается путем применения модифицированных покрытий, сформированных с помощью технологии «Брашинг». Путем проведения испытаний, реализованных в условиях, имитирующих свинчивание-развинчивание в реальных условиях, были разработаны покрытия резьбовых соединений [2.29,2.30, 2.20,2.41,2.46].

Полученные покрытия были испытаны на лабораторной машине свинчивания-развинчивания.

#### *2.4.1.1. Разработка покрытий резьбовых соединений труб нефтегазового сортамента*

##### *Процедура испытаний на стойкость к истиранию*

Испытания проведены по процедуре проведения сравнительных лабораторных испытаний сухих смазочных покрытий на машине для испытаний материалов на трение и износ № 200570-УТВ-3838/20, используемой в АО "ОМК".

Область применения. Цель проведения испытаний – сравнение антифрикционных свойств экспериментальных покрытий, предназначенных для нанесения на резьбовую поверхность труб и муфт. В ходе испытания моделируются процессы свинчивания и развинчивания резьбовых соединений в различных режимах, имитирующих взаимодействие резьбовых поверхностей муфты и ниппеля трубы при эксплуатационных нагрузках.

Общие положения. Испытания проводятся на машине для испытания материалов на трение и износ, находящейся в лаборатории нестандартных механических испытаний ЦИЛ ИТЦ.

Образцы для испытаний – кольца из углеродистой стали. Испытание проводится на паре колец, имитирующих пару ниппель-муфта. На торцевую поверхность каждого испытательного кольца наносится покрытие. Кольца закрепляются на валах машины для испытаний, поверхности колец приводятся в соприкосновение с определенной приложенной нагрузкой и при вращении определяется стойкость покрытий в испытываемой паре. Оценка стойкости производится по изменению массы колец, изменению толщины покрытия, а также визуально по степени нарушения целостности покрытия.

Процесс свинчивания газоплотного резьбового соединения происходит в три этапа (рис. 2.50) А, Б и В.

А. Первоначальный этап может доходить до 10 оборотов муфты относительно ниппеля. На этом этапе происходит контактирование витков резьбы муфты и ниппеля в процессе их свинчивания. Величина момента свинчивания на этом этапе  $M_p$  незначительна и составляет обычно не более 10% от оптимального момента  $M_{opt}$ .

Б. Этап, на котором начинается контактирование рабочих поверхностей радиального уплотнения, продолжается в течение 1,0-1,5 оборотов муфты относительно ниппеля. На этом этапе происходит значительное увеличение контактных давлений и сил трения в радиальном уплотнении, что вызывает увеличение крутящего момента  $M_{ут}$  до 80% от оптимального.

В. Последний этап, на котором происходит контактирование упорного уступа муфты и упорного торца ниппеля, продолжается 0,1-0,2 оборота ниппеля. На этом этапе происходит резкое увеличение сил трения и крутящего момента.

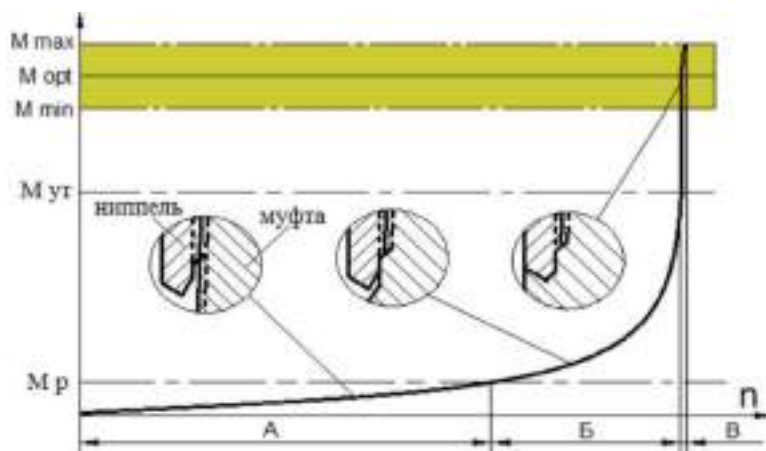


Рис. 2.50 – Процесс свинчивания газоплотного резьбового соединения:

$M_p$  - момент свинчивания резьбы;  $M_{ут}$  - момент свинчивания радиального уплотнения;  $M_{min}$  - минимальный момент свинчивания резьбового соединения;  $M_{opt}$  - оптимальный момент свинчивания резьбового соединения;  $M_{max}$  - максимальный момент свинчивания резьбового соединения; А - свинчивание резьбы; Б - свинчивание радиального уплотнения; В - свинчивание торцевого уплотнения;  $n$  - обороты ниппеля.

При проведении испытаний регулируемые параметры могут быть:

- скорость вращения испытательных колец, об/мин;
- площадь контакта (путем смещения испытательных колец относительно друг друга, изменения ширины испытательных колец), м<sup>2</sup>;
- усилие прижима, Н;
- проскальзывание, %.

Исходными параметрами, характеризующими процесс свинчивания и развинчивания резьбовых соединений и определяющими режимы испытаний при моделировании операций свинчивания и развинчивания, являются:

- максимальное контактное давление – максимальная точечная нагрузка, возникающая в момент свинчивания уплотнительного элемента резьбы, МПа;
- распределенное контактное давление – нагрузка в процессе свинчивания и развинчивания резьбового соединения, МПа;
- путь скольжения – расстояние перемещения резьбовых поверхностей ниппеля и муфты друг относительно друга, м;
- количество свинчиваний, шт.;
- количество развинчиваний, шт.

Варианты проведения испытаний. Кольца, используемые для испытаний, могут иметь различные профили контактной поверхности (рис. 2.51), позволяющие дать сравнительную оценку покрытий в резьбовых соединениях. Также в одном испытании возможно использование колец различной ширины.

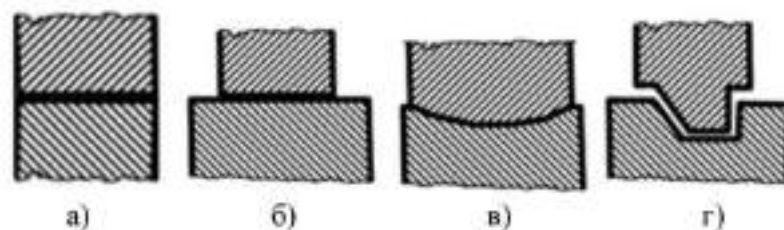


Рисунок 2.51. Примеры вариантов изготовления профилей испытательных колец.

Допускается проведение испытания трением при наличии сухого смазочного покрытия только на одном из испытательных колец, при этом второе кольцо (неподвижное) может быть подвержено механической обработке (например, пескоструйной).

Определение режимов испытаний. В данном разделе приведены расчетные формулы для испытательных образцов в виде колец по вариантам а) и б), изображенным на рисунке 1 (с прямолинейной контактной поверхностью). В случае изготовления испытательных образцов по вариантам в) и г) будет необходима доработка расчётов.

Расчет скорости вращения. Оптимальной окружной скоростью в конечный момент свинчивания, при которой не происходит разрыв смазывающей пленки и микросваривание свинчиваемых поверхностей, являющейся причиной задигов, является скорость 4 м/мин.

$$V = \pi * d * v = 4 \text{ м/мин} \quad (2.51)$$

где  $V$  – оптимальная окружная скорость, м/мин;  $d$  – диаметр образца, м;  $v$  – скорость вращения при испытании, об/мин.

Из (1) находим скорость вращения испытательного образца в оборотах в минуту:

$$v = \frac{V}{\pi * d} = \frac{4}{\pi * d}. \quad (2.52)$$

Расчет количества оборотов образцов. Учитывая описание процесса свинчивания газоплотного резьбового соединения, количество оборотов при свинчивании не превышает 12.

Длина пути трубы и испытательного образца связана следующей зависимостью:

$$\pi * D * N = \pi * d * n, \quad (2.53)$$

где  $D$  – диаметр трубы, м;  $d$  – диаметр испытательного кольца, м;  $n$  – количество оборотов при испытании;  $N$  – количество оборотов при сборке резьбовых соединений = не более 12.

Из (2.53) находим количество оборотов при проведении испытания:

$$n = \frac{\pi \cdot D \cdot 12}{\pi \cdot d} = \frac{D \cdot 12}{d} \quad (2.54)$$

*Расчет нагрузки для получения необходимого контактного давления*

Для определения усилия прижима при проведении испытаний используется формула Герца для расчета максимальной нагрузки при контакте двух цилиндрических тел:

$$P_0 = \sqrt{\frac{E \cdot F}{\pi \cdot L \cdot R}} \quad (2.55)$$

где  $P_0$  – контактное давление при испытании, МПа (задаваемая величина);  $E$  – приведённый модуль упругости (модуль Юнга), МПа – формула (7);  $F$  – усилие прижима, Н (искомая величина);  $L$  – длина контактной поверхности в миллиметрах (характеристика образца);  $R$  – приведённый радиус образцов в миллиметрах – формула (5.8).

Из (4) находим усилие прижима образцов при испытаниях:

$$F = \frac{P_0 \cdot \pi \cdot L \cdot R}{E} \quad (2.56)$$

Приведённый модуль упругости:

$$E = 1 / \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right), \quad (2.57)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости материалов контактных поверхностей;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты Пуассона материалов контактных поверхностей.

Приведённый радиус образцов:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2.58)$$

де  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы испытательных образцов, м.

Порядок работ при испытании.

1) Рассчитать нагрузку, устанавливаемую при контакте испытательных образцов по формуле (2.56).

2) Рассчитать скорость вращения испытательных образцов по формуле (2.52) и минимальное количество оборотов по формуле (2.54).

3) Взвесить каждый испытательный образец с точностью до 0,0001 г, занести данные в протокол испытания.

4) Подготовить машину к проведению испытаний.

5) Вал каретки (верхний) отключить от привода вращения (расцепить полумуфту, закрепить болтом-фиксатором).

6) На верхний (неподвижный) вал установить образец с покрытием, планируемым для нанесения на ниппельную часть трубы. На нижний (подвижный) вал – образец с покрытием для резьбы муфт.

7) Приработку образцов не проводить.

8) Установить скорость вращения и нагрузку в соответствии с рассчитанными в п. 1-2. Начать испытание. В ходе испытания контролировать температуру поверхности образцов, которая не должна превышать 80°C, и внешний вид покрытий. После прохождения нижним образцом количества оборотов, рассчитанного по формуле (2.54), остановить испытание для оценки состояния покрытия на испытательных образцах. В случае отсутствия нагрева образцов и разрушения покрытия снять нижнее испытательное кольцо с вала, развернуть на 180° относительно плоскости кольца, закрепить на валу и продолжить испытание при тех же режимах и на том же количестве оборотов. Данный цикл имитирует однократное свинчивание и развинчивание резьбового соединения.

9) Повторить испытание по п. 8 необходимое количество циклов. После каждого цикла оценивать состояние покрытия на образцах с фиксацией в протоколе испытания.

10) Взвесить испытательные кольца, рассчитать изменение массы, занести в протокол испытания.

### *Оборудование*

Испытания образцов-колец с покрытиями проведены согласно процедуре проведения сравнительных лабораторных испытаний сухих смазочных покрытий на машине для испытаний материалов на трение и износ путем воздействия на покрытие сил трения при приложении внешних нагрузок 1100 Н\*м, 1700Н\*м и 2000 Н\*м. Первый этап испытаний проведен на машине трения ИИ 5018 (рис. 2.52), второй этап испытаний на машине трения СМЦ-2 (рис. 2.53).



1. Частота вращения нижнего образца, об/мин	0 - 2000
2. Диапазон измерения момента трения, Нм	0,5 - 20,0
3. Нагрузка на образцы, кН	0,2 - 5,0
4. Мощность, потребляемая, кВт	3,0
5. Масса машины, кг	550

Рис. 2.52. Общий вид машины трения ИИ 5018 и ее технические характеристики





1. Частота вращения нижнего образца, об/мин	0-1100
2. Диапазон измерения момента трения, Нм	1,5 - 15,0
3. Нагрузка на образцы, кН	0,2 - 2,0
4. Мощность, потребляемая, кВт	2,2
5. Масса машины, кг	500

Рис. 2.53. Общий вид машины трения СМЦ-2 и ее технические характеристики

#### *Режимы нанесения покрытий*

Нанесение покрытий по технологии «Брашинг» произведено вращающейся проволочной щеткой согласно следующим характеристиками и режимам [2.45, 2.46]:

- внешний диаметр  $D_{щ}=320$  мм;
- ширина ВПЩ  $b_{щ}=25$  мм;
- диаметр ворса  $d_v=0,27$  мм;
- длина ворса  $l_v=70$  мм;
- относительно скорость скольжения ВПЩ:

- 30 м/с (режим 1);
- 40 м/с (режим 2);
- величина натяга (сближение оси ВПЩ и детали, N):
- 2 мм (режим 1);
- 4 мм (режим 1);
- число проходов  $n = 5$ .

*Результаты испытаний, имитирующих условия свинчивания-развинчивания*

Результаты испытаний первого этапа испытаний. На кольца были нанесены следующие виды покрытий: Образец №1 – Медное; Образец №2 – Латунное; Образец №3 – Фторопласт; Образец №4 – Фторопласт; Образец №5 – Алюминий; Образец №6 – Алюминий + Фторопласт; Образец №7 – Медь + Латунь; Образец №8 – Латунь + Фторопласт (режим 1); Образец №9 – Латунь + Фторопласт (режим 2).

С целью оценки стойкости покрытий к истирающим нагрузкам проводились испытания колец на машине трения ИИ 5018 в соответствии с Процедурой проведения сравнительных лабораторных испытаний сухих смазочных покрытий на машине для испытаний материалов на трение и износ № 200570-УТВ-3838/20 от 15.12.2020 г. путем воздействия на покрытие сил трения при приложении внешних нагрузок 1100 Н\*м, 1700 Н\*м и 2000 Н\*м.

Один цикл испытания включает в себя: – 40 оборотов испытательного кольца с заданной нагрузкой, снятие кольца с вала, разворот на 180°,


– 40 оборотов испытательного кольца в обратном направлении с заданной нагрузкой.

Результаты испытаний образцов с покрытиями на машине трения представлены в таблицах 2.11-2.13 [2.29,2.30, 2.40, 2.46,2.47].

## Результаты испытаний покрытий

Параметры покрытия	Номер цикла испытания	Приложенная нагрузка, Н	Примечание
Образец №8 Латунь + Фторопласт (режим 1)	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытания без нарушения сплошности. Отмечены легкие заедания при вращении образца в течение всего испытания
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
 <p>до испытания</p>		 <p>после 5 циклов испытания</p>	
Образец №9 Латунь + Фторопласт (режим 2) 4÷7 мкм	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытания без нарушения сплошности и без заедания при вращении образца
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
 <p>до испытания</p>		 <p>после 5 циклов испытания</p>	
Образец №4 Фторопласт	1	1100	3 цикла без нарушения сплошности покрытия; на 4-ом цикле после увеличения нагрузки заедание образца с характерным звуком трения «металл-металл»
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	-	-	
 <p>до испытания</p>		 <p>после 4 циклов испытания</p>	

## Результаты испытаний покрытий

Параметры покрытия	Номер цикла испытания	Приложенная нагрузка, Н	Примечание
Образец №2 Латунь 8÷12 мкм	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытания без нарушения сплошности и без заедания при вращении образца
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
			
до испытания		после 5 циклов испытания	
Образец №1 Медь	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытания без нарушения сплошности и без заедания при вращении образца
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
			
до испытания		после 5 циклов испытания	
Образец №5 Алюминий 3÷6 мкм	1	1100	В первые 0,5 цикла при вращении образовались риски на поверхности, после разворота образца произошло заедание с характерным звуком трения «металл-металл»
			
до испытания		после 1 цикла испытания	

## Результаты испытаний покрытий

Параметры покрытия	Номер цикла испытания	Приложенная нагрузка, Н	Примечание
Образец №7 Медь + Латунь 5÷10 мкм	1	1100	С 1-го цикла на образце начали появляться риски; 3 цикла вращения с легкими заеданиями, на 4-ом цикле заедание образца с характерным звуком трения «металл-металл»
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	-	-	
			
до испытания		после 4 циклов испытания	
11.01.2022 г. Образец №2 Латунь 8÷12 мкм	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытания без нарушения сплошности и без заедания при вращении образца
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
			
до испытания		после 5 циклов испытания	

Выводы по первому этапу испытаний: установлена способность выдерживать испытательные нагрузки, определенные процедурой испытаний материалов на трение и износ для следующих покрытий:

- медь;
- латунь;
- латунь + фторопласт.

Покрытия «Медь», «Латунь», «Латунь + фторопласт» рекомендованы к дальнейшим исследованиям.

*Результаты второго этапа испытаний*

Перечень нанесенных покрытий для проведения второго этапа испытаний представлен в таблице 2.14. Результаты испытаний предоставлены в таблицах 2.15-2.19 [2.29,2.30,2.40].

## Перечень нанесенных покрытий

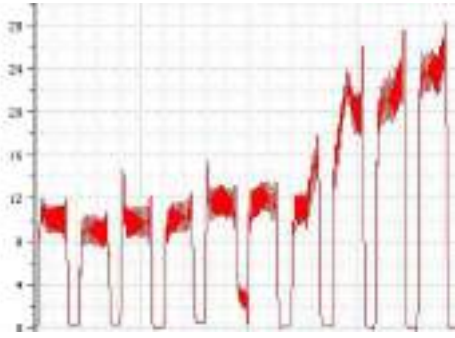


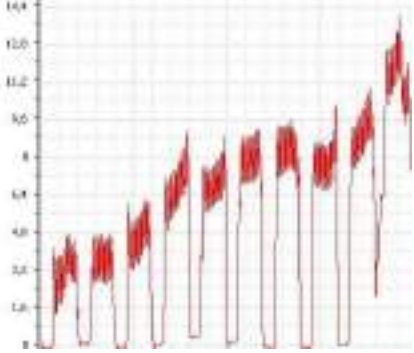


Тип покрытия	Режим	Толщина покрытия, мкм
Фторопласт	2	-
Медь	1	5÷10
Медь	2	3÷6
Латунь	2	7÷12
Латунь + Фторопласт	1	6÷13
Латунь + Фторопласт	2	5÷11
Медь + Фторопласт	2	5÷9
Алюминий	1	9÷18
Алюминий + Фторопласт	2	5÷8
Медь + Латунь + Фторопласт	2	7÷12

Таблица 2.15

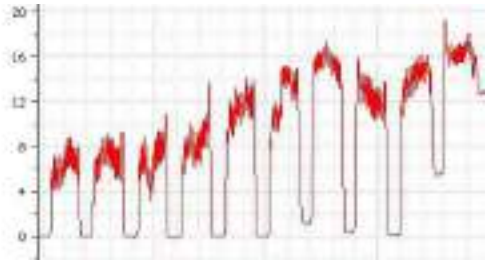


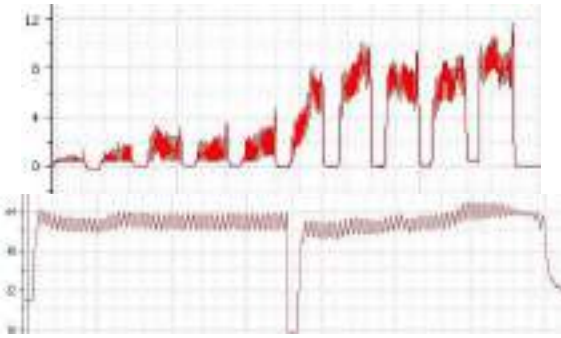
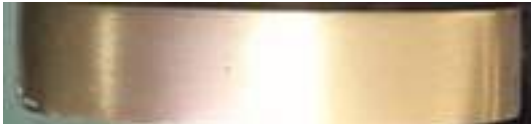


## Результаты испытаний покрытий

Параметры покрытия	Номер цикла испытания	Приложенная нагрузка, Н	Примечание
Фторопласт Режим нанесения №2	1	1100	4 цикла без нарушения сплошности покрытия; на 5-ом цикле заедание образца
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
Медь Режим нанесения №1 5÷10 мкм	1	1100	С 2-го цикла на образце начали появляться риски, на 5-ом цикле заедание образца с характерным звуком трения «металл-металл»
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
	-		 После 5 циклов испытаний
	 До испытаний		 После 5 циклов испытаний
	 До испытаний		 После 5 циклов испытаний

## Результаты испытаний покрытий

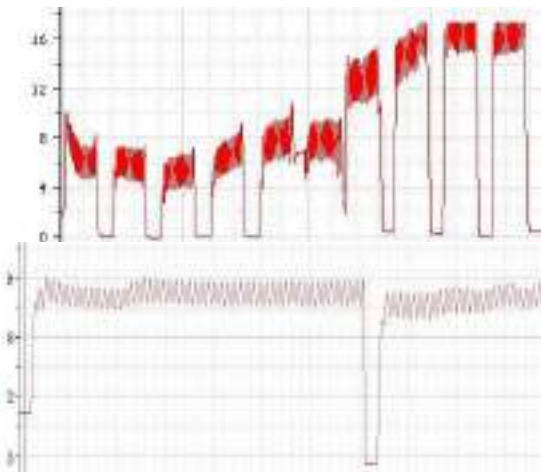



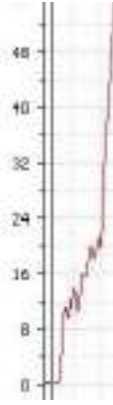


Параметры покрытия	Номер цикла испытания	Приложенная нагрузка, Н	Примечание
Медь Режим нанесения №2 3÷6 мкм	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытаний, однако визуально замечено, что покрытие изношено до металлической основы. Посторонних шумов и заедания не зафиксировано
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
	 <p>До испытаний</p>		
	 <p>После 5 циклов испытаний</p>		
Латунь Режим нанесения №2 7÷12	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытаний. Повреждение поверхности не обнаружено
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
	 <p>До испытаний</p>		
	 <p>После 5 циклов испытаний</p>		

## Результаты испытаний покрытий

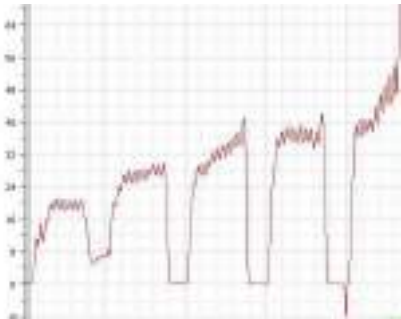


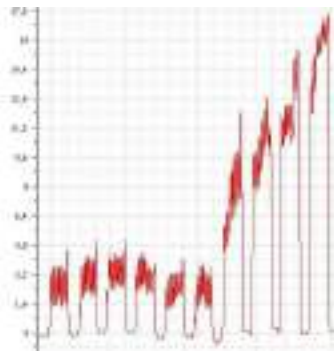


Параметры покрытия	Номер цикла испытания	Приложенная нагрузка, Н	Примечание
Латунь + Фторопласт Режим нанесения - №1 6÷13	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытаний. Повреждение поверхности не обнаружено
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
	 <p>До испытаний</p>		
	 <p>После 5 циклов испытаний</p>		
Латунь + Фторопласт Режим нанесения - №2 5÷11	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытаний. Повреждение поверхности не обнаружено. Покрытие выдержало дополнительный цикл при 2500 Н.
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
	6	2500	
	 <p>До испытаний</p>		
	 <p>После 5 циклов испытаний</p>		
	 <p>После 6 циклов испытаний</p>		



## Результаты испытаний покрытий

Параметры покрытия	Номер цикла испытания	Приложенная нагрузка, Н	Примечание
Медь+Фторопласт Режим нанесения №2 5÷9 мкм	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытаний. Повреждение поверхности не обнаружено. Покрытие выдержало дополнительный цикл при 2500 Н
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
	6	2500	
	 До испытаний		
	 После 5 циклов испытаний		
	 После 6 циклов испытаний		
Алюминий Режим нанесения №1 9÷18 мкм	1	1100	В первом обороте цикла покрытие отошло от поверхности образца.
	-	-	
	-	-	
	-	-	
	-	-	
	 До испытаний		
	 После 1 цикла испытаний		

## Результаты испытаний покрытий

Параметры покрытия	Номер цикла испытания	Приложенная нагрузка, Н	Примечание
Алюминий+Фторопласт Режим нанесения №2 5÷8 мкм	1	1100	Риски образовались на втором цикле, в третьем цикле произошло заедание.
	2	1100	
	3	1100	
	-	-	
	-	-	
	 После 5 циклов испытаний		
	 До испытаний		
Медь+Латунь+Фторопласт Режим нанесения №2 7÷12 мкм	1	1100	Покрытие выдержало 5 циклов испытаний. Повреждение поверхности не обнаружено.
	2	1100	
	3	1100	
	4	1700	
	5	2000	
	 До испытаний		
	 После 5 циклов испытаний		

Выводы по второму этапу испытаний. Следующие покрытия способны выдерживать испытательные нагрузки:

- латунь (режим нанесения покрытия - №2);
- латунь + фторопласт (режим нанесения покрытия - №1);

- латунь + фторопласт (режим нанесения покрытия - №2);
- медь+фторопласт (режим нанесения покрытия - №2)
- медь+латунь+фторопласт (режим нанесения покрытия - №2).

По графикам можно выделить следующие покрытия с наименьшим моментом трения:

- латунь + фторопласт (режим нанесения покрытия - №2);
- медь+фторопласт (режим нанесения покрытия - №2).

#### *Рекомендованные покрытия*

В ходе испытаний покрытия из алюминия, фторопласта и их комбинации не прошли испытания на машине трения.

Прошли испытания с дополнительным циклом покрытия медь+фторопласт, латунь, медь, латунь+фторопласт.

Таким образом, рекомендуются покрытия к нанесению на резьбовые соединения труб нефтегазового сортамента: латунь+фторопласт, медь+фторопласт.

#### *Выводы по результатам испытаний*

Покрытия, полученные технологией «Брашинг», в целом выдержали испытания на стойкость, моделирующие процесс свинчивания, и испытания на коррозионную стойкость. Таким образом, функциональные возможности покрытий, позволяет рекомендовать их при обработке резьбовых соединений труб нефтегазового сортамента.

Результаты испытаний на стойкость показали следующее:

- покрытия из алюминия, фторопласта и их комбинации не прошли испытания на машине трения;
- покрытия медь+фторопласт, латунь, медь и латунь+фторопласт прошли испытания с дополнительным циклом нагрузки.

Результаты испытаний на коррозионную стойкость показали следующее:

- на образцах с двухслойными покрытиями «медь+фторопласт», «латунь+фторопласт» после 72 часов испытаний коррозия не наблюдается.

- после 240 часов испытаний повышенную коррозионную стойкость показали образцы с двухслойными покрытиями:

\* «латунь+фторопласт» - коррозионное поражение на площади образца в диапазоне 330...464 мм<sup>2</sup>;

\* «медь+фторопласт» - коррозионное поражение на площади образца в диапазоне 840...920 мм<sup>2</sup>.

Таким образом, рекомендуются покрытия к нанесению на резьбовые соединения труб нефтегазового сортамента: латунь+фторопласт, медь+фторопласт.

*2.4.1.2. Испытание разработанных покрытий на муфтонаверточной машине СКР-500*

Проведена оценка антизадирных свойств сухого твердосмазочного покрытия на резьбе муфт НКТ с помощью муфтонаверточной машины [2.29, 2.30, 2.40].

#### *Краткая характеристика покрытия*

Для формирования комбинированного двухслойного покрытия, наружный и внутренний слои были нанесены методом плакирования гибким инструментом, заключающийся в термомеханическом взаимодействии вращающейся проволочной щетки, к периферийной поверхности которой с определенным усилием прикладывался материал донор (фторопласт). При заданных режимах обработки происходит массоперенос материала донора на подготовленную ювенильную поверхность изделия (муфта), с формированием однородного слоя покрытия толщиной 6÷10 мкм. Адгезионная прочность сформированного покрытия составляет на уровне 7÷12 МПа.

Экспериментальный вариант покрытия был нанесен на муфты условным размером 73 с резьбовым соединением T100, изготовленные из материала группы прочности N80Q.

#### *Методы исследования*

Оценку внешнего вида муфт с нанесенным комбинированным двухслойным покрытием проводили визуально. Замеры толщины покрытия производили с помощью толщиномера Константа К5 (без вычитания «нулевого» слоя) по центральной расточке муфты. Измерение диаметра резьбы и радиального уплотнения проводили приборами типа Gagemaker MRP и Gagemaker MRP-U соответственно. Контроль профилей резьбы и уплотнительных элементов проводился с использованием слепочного материала на видеоизмерительной установке Micro-Vu Vertex 251HC. Температуру нагрева муфт при свинчивании-развинчивании измерялась с помощью бесконтактного пирометра «TL 315E Time Group inc.». Увеличенное изображение цинкового покрытия получено в центре коллективного пользования НИИ «Наносталей» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» с использованием оптического микроскопа Zeiss Axio Observer (Zeiss, Германия).

Испытания на свинчивание-развинчивание производили на муфтонаверточной машине СКР-500 (рис. 2.54) в условиях экспериментального участка резьбовых соединений Premium. Свинчивание производили с патрубками из углеродистых марки сталей. Навинчивание муфт производили по графику свинчивания, при этом дополнительно производился визуальный контроль правильности сборки соединения (положения торца муфты относительно сбегая резьбы ниппеля). После каждого цикла свинчивания-развинчивания производился осмотр резьбового соединения на предмет наличия повреждений на поверхности резьбы и уплотнения ниппеля и муфты.

Испытанию на свинчивание-развинчивание подвергали два соединения:

- M2A + N1 (соединение близко к номиналу);

– МЗБ + N7 (тугое соединение).



Рис. 2.54. Муфтонаверточная машина СКР-500 на экспериментальном участке резбовых соединений Premium АО «ПНТЗ».

### *Результаты исследования*

Оценка внешнего вида, толщины покрытия на резьбовой поверхности и параметров резьбы муфт и ниппельных концов приведены в таблице 1. Контроль параметров проводился по нанесенному покрытию. Внешний вид покрытия приведен на рис. 2.55.

Таблица 2.20

### Характеристики муфт и ниппелей

Номер муфты (М), ниппеля (N)	Внешний вид покрытия резьбы	Толщина покрытия, мкм	Отклонения от номинального диаметра резьбы, мм min/max	Отклонения от номинального диаметра радиального уплотнения, мм min/max
М2А	Покрытие муфты серого цвета, гладкое, блестящее с желтоватым отливом	46,4 (30 - 61)	-0,03/ +0,03	-0,18/ -0,14
МЗВ	Покрытие муфты серого цвета, гладкое, блестящее с желтоватым отливом	61,2 (52 - 73)	-0,05/ 0	-0,20/ -0,16
N1	Без покрытия	–	-0,01/ +0,01	-0,24/ -0,25
N7	Без покрытия	–	+0,02/ +0,04	-0,22/ -0,25



Рисунок 2.56. Внешний вид резьбовой поверхности муфт НКТ с двухслойным сухим твердосмазочным покрытием

Из таблицы 2.20 видно, что покрытие на обеих муфтах отличается значительной неоднородностью по толщине (разброс значений толщин от 21 – до 31мкм). В среднем толщина покрытия на муфтах значительная – от 46 до 61мкм. Основная толщина обусловлена цинковым покрытием, толщина слоя полимера не превышает 7мкм.

Контроль профиля резьбы муфт с нанесенным покрытием выявил уменьшение ширины профиля впадины: среднее отклонение составило -0,02 мм от предельного значения. Выявленное отклонение не влияет на способность сборки т.к. в Т100-ТУ 1327-343-00186619-2011 АО «ПНТЗ» конструктивно заложен гарантированный минимальный зазор по виткам резьбы, равный 0,123 мм. Профиль резьбы приведен на рисунке 2.57, результаты контроля профиля резьбы муфты в таблице 2.21.

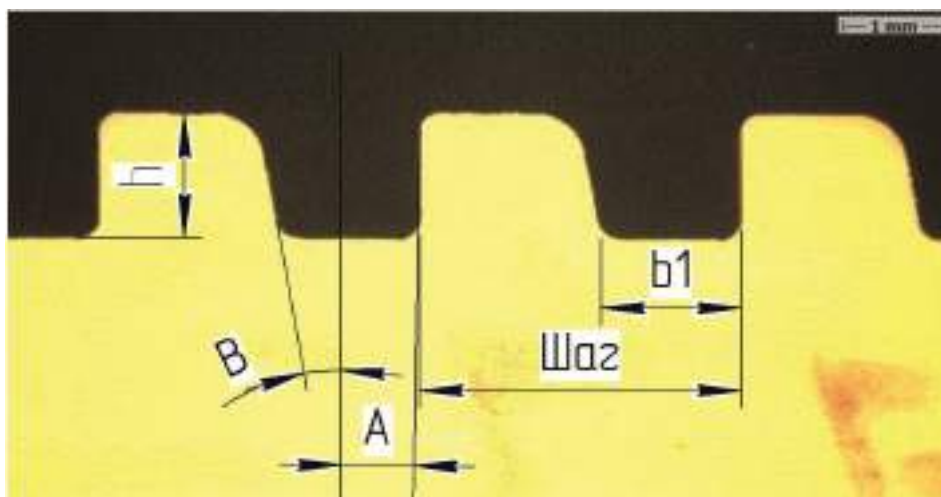


Рисунок 2.57. Профиль резьбы муфты

## Результаты контроля профиля резьбы муфты

Параметры	Фактический	Номинальная	Верхний	Нижний	Отклонение	Вне допуска
Высота профиля $h$ , мм	1,2442	1,0180	0,2400	0,1800	0,2262	-
Ширина вершины профиля $b_1$ , мм	1,6885	1,7100	0,0750	0,0000	-0,0215	-0,0215
Шаг, мм	3,1850	3,1750	0,0300	-0,300	0,0100	-
Угол $A$ , град:мин:сек	1:00:47	3:00:00	0:00:00	-2:00:00	-1:59:13	-
Угол $B$ , град:мин:сек	10:52:06	10:00:00	1:00:00	-1:00:00	0:52:06	-

На рисунке 2.58 приведено изображение нанесенного цинкового покрытия на вершине профиля резьбы муфт НКТ. Изображение фторопластового покрытия, полученное плакированием гибким инструментом, получить не удалось из-за сложности его сохранения при вырезке образцов из муфты НКТ.

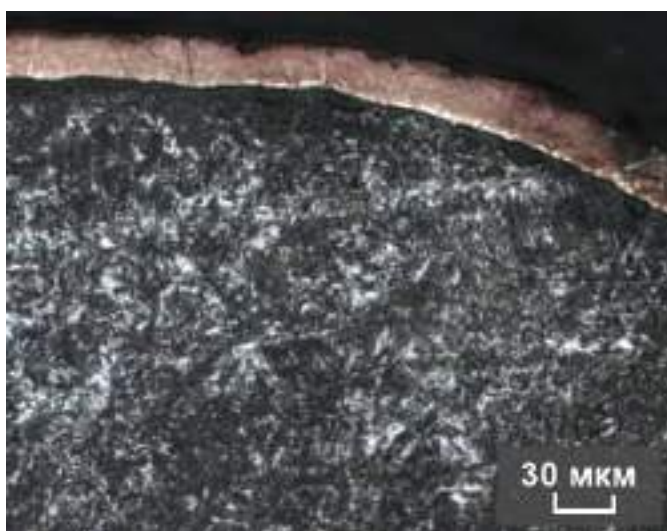


Рисунок 2.58. Изображение цинкового покрытия на вершине профиля резьбы муфты НКТ



В ходе испытаний на свинчивание-развинчивание выявлено следующее.

1. Резьбовое соединение М2А+N1 (номинал по резьбе и уплотнению - измерения по покрытию) выдержало 11 циклов свинчивания-развинчивания. При этом после 8 циклов свинчивания-развинчивания во впадинах резьбы на последних контактных витках ниппеля замечены царапины, развивающиеся при последующих циклах. После 11 циклов во впадинах резьбы наблюдались на последних контактных витках небольшие задиры.

2. Резьбовое соединение МЗВ+N7 (тугое по резьбе и уплотнению - измерения по покрытию) выдержало 11 циклов свинчивания-развинчивания. При этом после первого цикла на последних витках ниппеля были отмечены царапины, мало изменяющиеся при последующих свинчиваниях. После 8 циклов повреждения замечены и на муфте. После 11 циклов существенного развития повреждений не наблюдалось.

3. В ходе испытаний наблюдалась приработка покрытия:

- слабое шелушение покрытия в ходе его приработки;
- образование полосы темного цвета с зеркальным блеском на муфте в местах максимального контакта поверхностей;
- частичный перенос покрытия на ответную часть (ниппельный конец) в виде полос темного цвета по местам максимального контакта (уплотнение металл-металл);
- частичное разрушение и перенос покрытия по местам максимальных контактов, что способствует дополнительному увеличению его противоизносных свойств при работе резьбового соединения (эффект «самосмазывания»).

4. При проведении испытаний наблюдали значительное увеличение моментов свинчивания. Так, на МЗВ + N7 допустимые графики с фиксацией участков контакта по резьбе, уплотнению, заплечика и докрепления соединения были достигнуты при увеличении момента выше 8000 Н·м (вместо 3700 Н·м планируемого, рис. 2.59). Возможно, значительное увеличение момента вызва-

но достаточно высокой толщиной покрытия и его свойствами (цинковое покрытие достаточно твердое, плохо деформирующиеся).

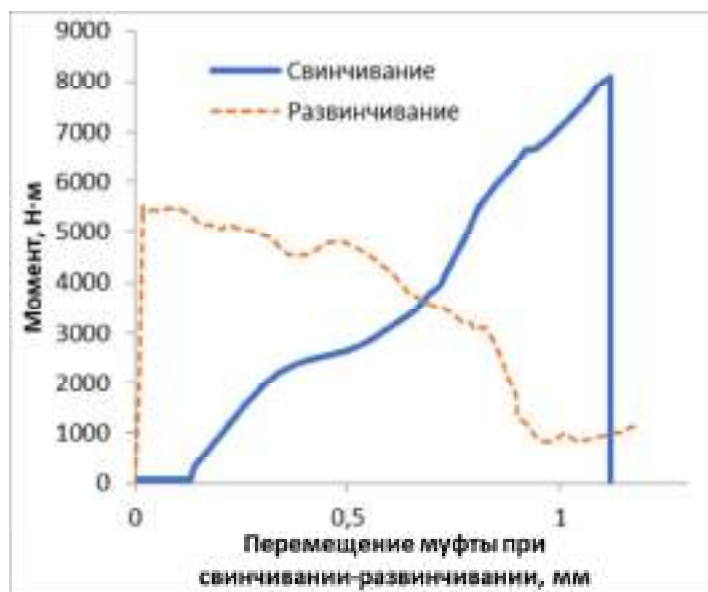


Рис. 2.59. Изменение моментов свинчивания-развинчивания на муфтонаверточной машине (цикл №6, тугое соединение МЗВ + N7)

5. Наблюдалось нагревание резьбового соединения МЗВ + N7 (тугое по резьбе и уплотнению) особенно на 4-6 циклах (до 75°C), что потребовало дополнительного охлаждения муфты. При последующих циклах нагревание стало меньше возможно вследствие приработки покрытия. В целом нанесение полимера методом ПГИ позволило уменьшить склонность резьбового соединения к нагреванию (по сравнению с предыдущими испытаниями ТДЦ покрытий ООО «Вика-Гал» с жидким полимером).

### *Выводы*

1. Проведены испытания на свинчивание-развинчивание муфт НКТ с двухслойным сухим твердосмазочным покрытием полученным методом плакирования гибким инструментом. Результаты испытаний показали, что применение твердосмазочных покрытий оказывает положительное влияние на антизадириные свойства резьбового соединения муфт НКТ: обеспечило 11 циклов свинчивания-развинчивания, что соответствует заданным требованиям и требованиям Заказчиков.

2. При проведении экспериментов на свинчивание-развинчивание было установлено, что после 11 циклов существенного износа покрытия, задиров поверхности и развития повреждений в многослойном покрытии не наблюдалось (Приложение 2.1, 2.2, 2.3).

#### ***2.4.2 Испытание покрытий, нанесенных на поверхности лезвий ножей сортовых станов 170, 370 и 450***

Проведены работы по восстановлению оборудования отрезных ножей горячей резки для станов 170, 370 и 450 ПАО «ММК» [2.47-2.51], не подлежащих дальнейшей эксплуатации вследствие износа. Для восстановления отрезных ножей горячей резки была применена технология плазменно-порошковой наплавки. Также дополнительно на лезвия ножей было нанесено хромовое покрытие методом фрикционного плакирования (брашинг).

Технологический процесс восстановления изношенных ножей представлен на рисунках 2.60-2.61.



Рис. 2.60. Отрезные ножи горячей резки станов 170 и 370:

а – с нанесенным защитным износостойким покрытием; б – механическая обработка лезвия отрезных ножей горячей резки стана 170



а

б

Рис. 2.61. Отрезные ножи горячей резки №1 стана 450:

а – нанесение хромового покрытия; б – вид восстановленного ножа

*Ввод в опытно промышленную эксплуатацию восстановленных лезвий ножей в производственные условия сортового цеха ПАО «ММК»*

Восстановленные отрезные ножи горячей резки (НГР) для станов 170, 370 и 450 были введены в промышленную эксплуатацию в июле-августе 2022 г. (рис. 2.62)



Рис. 2.62. Монтаж и эксплуатация отрезных ножей горячей резки №1 для станов 170, 370 и 450 ПАО «ММК»

Визуальная оценка износа рабочих поверхностей НГР производилась каждые 7 дней.

По результатам работы после суммарной наработки объекта от начала его эксплуатации до наступления им предельного состояния зафиксировано повы-

шение эксплуатационной стойкости НГР в среднем на 35%, а именно (Приложение 2.4):

- отрезные ножи горячей резки стана 170 – стойкость – 35...37 тыс. т;
- отрезные ножи горячей резки стана 370 – стойкость – 32...35 тыс. т;
- отрезные ножи горячей резки стана 450 – стойкость – 38...40 тыс. т.

Также зафиксировано снижение выхода брака и НП по дефекту смятые концы и недокат до 15%.

### ***2.4.3 Испытание покрытий, нанесенных на поверхности лупперов сортовых станов 170, 370 и 450***

Проведены работы по восстановлению оборудования (лупперов) для станов 170, 370 и 450 ПАО «ММК» [42, 45-49], не подлежащих дальнейшей эксплуатации вследствие износа. Для восстановления оборудования (лупперов) была применена технология плазменно-порошковой наплавки.

Часть технологического процесса восстановления изношенных лупперов представлен на рисунках 2.63-2.64. Также дополнительно на поверхности лупперов было нанесено хромовое покрытие методом фрикционного плакирования (брашинг).



Рис. 2.63. Луппера с нанесенным защитным износостойким покрытием станов 170 и 370



а

б

Рис. 2.64. Восстановленный (а) луппер с нанесенным хромовым покрытием (б) для сортового стана

*Ввод в опытно промышленную эксплуатацию восстановленных лезвий ножей в производственные условия сортового цеха ПАО «ММК»*

Восстановленные луппера для станов 170, 370 и 450 были введены в промышленную эксплуатацию в июле-августе 2022 г.

Визуальная оценка износа рабочих поверхностей лупперов производилась каждые 7 дней. По результатам работы после суммарной наработки объекта от начала его эксплуатации до наступления им предельного состояния зафиксировано повышение эксплуатационной стойкости оборудования (лупперов) на 25%, а именно (Приложение 2.5)::

- лупперы стана 170 – стойкость – 15...16 тыс. т;
- лупперы стана 370 – стойкость – 15...16 тыс. т;
- лупперы стана 450 – стойкость – 25...27 тыс. т.

Также зафиксированно снижение выхода брака и НП по дефекту «овальность, закат, плена прокатная и ус» до 15%.

### **3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ОБЛАСТИ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В ПОТОКЕ**

#### **3.1 Испытания разработанных систем элементного анализа в потоке на горно-обогатительных предприятиях, перерабатывающих руды цветных металлов**

Традиционно рентгенофлуоресцентным методом определяют главные компоненты – при анализе материалов металлургической, строительной, стекольной, керамической, топливной промышленности, в геологии.

Методом РФА принципиально возможно определить 87 элементов от бора до урана. Определение легких элементов, однако, вызывает трудности, поскольку для элементов с малым порядковым номером выход флуоресценции невелик. Кроме того, излучение легких элементов лежит в длинноволновой области. Такое излучение характеризуется малой проникающей способностью лишь около 1 мкм, поэтому регистрируемая интенсивность излучения мала. В силу этих причин даже натрий можно определять лишь в некоторых типах приборов [3.1].

Вследствие очень высоких требований, предъявляемых к точности определения основных породообразующих элементов в горных породах, эта задача является одной из сложнейших в аналитической химии. По трудоемкости силикатный анализ составлял 40% всего объема трудозатрат на анализ в геологии и геохимии. При решении некоторых аналитических задач в промышленности не требуется высокая точность определений, но в то же время желательны большая производительность и низкая стоимость анализа. Например, при проведении геохимического картирования в ходе первичной оценки партий геологических образцов необходимо определять содержание основных породообразующих элементов с точностью 10-15 отн. %. Для этого используется методика экспрессного рентгенофлуоресцентного определения  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в больших массивах проб горных пород разнообразного состава. Также метод РФА

используют при анализе бурового шлама в нефтегазовой и горнодобывающей промышленности [3.2-3.4].

В рамках настоящей работы были представлены программы для ЭВМ при оптимизации работ на буровых станках, беспилотных летательных аппаратах и экскаваторах [3.5-3.7]. Проводились работы по непрерывному контролю разгрузочных щелей конусных дробилок и их автоматической регулировке [3.20]. На данном этапе, разработанные ранее алгоритмы и программное обеспечение с аппаратурным оформлением, подвергались промышленной апробации.

Расчет концентраций определяемых элементов  $c_i$ , при рентгенофлуоресцентном анализе выполняют с помощью системы уравнений вида:

$$c_i = c_{0i} * F_i, \quad (3.1)$$

где  $c_i$  — начальное приближение концентрации  $i$ -го элемента, а  $F_i$  - поправка на различие поглощения флуоресцентного излучения аналитической линии  $i$ -го элемента в пробе и стандарте. Поправку на поглощение вычисляют по следующей формуле:

$$F_i = \frac{\sum_j m_{mi}^j * c_j}{\sum_j m_{mi}^j * c_j^{cm}}, \quad (3.2)$$

Неопределяемый элемент кислород дополняет при расчете массовых коэффициентов поглощения сумму концентраций элементов в пробе до единицы. Для учета влияния вариаций минералогического состава и неадекватности модели расчета поправки применяют метод кусочной регрессии. В этом случае используют способ исправления относительных интенсивностей на аппаратурные эффекты в виде линейной регрессии, при котором начальные приближения концентраций находят из выражения:

$$c_{0i} = (a_{0i} + a_{1i} * I_i / I_i^{cm}) * c_i^{cm}, \quad (3.3)$$

где  $a_{0i}$  и  $a_{1i}$  - регрессионные коэффициенты,  $I_i^{cm}$  и  $I_i$  - исправленные на фон и мертвое время интенсивности аналитических линий соответственно пробы и образца сравнения. Значения поправочных коэффициентов оценивают методом наименьших квадратов по экспериментально найденным отношениям интенсивностей  $I_i / I_i^{cm}$  и их расчетным значениям  $(c_i / c_i^{cm}) F_i$  для образцов известного химического состава. Для  $SiO_2$  зависимость  $(c_i / c_i^{cm})$



) $F_i = f ( I_i / I_i^{cm} )$  нельзя с удовлетворительной погрешностью описать единой регрессионной прямой. Однако использование линейной регрессии в кусочном виде позволяет существенно снизить ошибки аппроксимации. Для проведения анализа выделяют три группы пород, сходных по минеральному составу и характерному содержанию основных элементов. В качестве основного критерия классификации выбрано содержание в пробе  $SiO_2$ , оцениваемое начальным приближением  $c_{0i}$ . В первую группу входят породы с содержанием  $SiO_2$  более 55 %, во вторую - менее 55 %, в третью – вулканические породы. Для каждой группы по пробам известного состава и стандартным образцам определяют свои величины регрессионных коэффициентов  $a_{0i}$  и  $a_{1i}$ . В литературе проведено сравнение результатов анализа для двух вариантов определения  $c_{0i}$ . В первом варианте величина  $c_{0i}$  определялась из соотношения  $c_{0i} = (I_i / I_i^{cm}) * c_i^{cm}$ , во втором использовалась кусочная регрессия вида (3.3). Полученные для некоторых оксидов величины относительных среднеквадратичных погрешностей анализа  $S_{r1}$  и  $S_{r2}$  для указанных вариантов определения начального приближения  $c_{0i}$ , а также допустимые значения относительных стандартных отклонений  $\sigma_r$  представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Сравнение результатов анализа для двух вариантов определения  $c_{0i}$ .

Оксид	Интервал массовой доли, %	$S_{r1}$	$S_{r2}$	$\sigma_r$
$Al_2O_3$	10-20	9	3	3.5
$SiO_2$	40-60	30	2.5	0.9
	60-80	19	1.8	0.7
CaO	5-10	8	5	5
	10-20	5	3	3.2
$Fe_2O_3$	1-5	13	7.9	7
	5-10	7	5.9	4.3
	10-20	8.5	2.8	2.1

Для остальных оксидов получены аналогичные результаты. Видно, что достигнутый для второго варианта нахождения  $c_{0i}$  уровень точности достаточен для проведения экспрессного определения содержаний основных породообразующих элементов в группах близких по своему химическому составу проб горных пород.

Для измерения интенсивности флуоресцентного излучения всех следовых элементов используют режим работы трубки: 60 кВ и 50 мА; для большинства основных элементов снижают потенциал или силу тока с целью уменьшения влияния мертвого времени детектора. При анализе используют относительные интенсивности, чтобы устранить необходимость частой калибровки методики. Стандарт сравнения должен быть гомогенным и содержать все определяемые элементы в достаточных количествах с тем, чтобы можно было измерить интенсивности всех аналитических линий с приемлемой ошибкой. Для основных элементов в качестве такого стандарта можно рекомендовать использовать стандартные образцы базальта BSC-I, а для следовых — GSE (USGS). Использование двух разных стандартов сравнения требует применения отдельных программ для основных и следовых элементов. [3.1].

Промышленные испытания разработанных программ [3.5–3.9] с внедрением в АСУ ТП предприятий и спектрометров проводились на медно-цинковых и железосодержащих рудах в условиях предприятий ОАО «Уральская горно-металлургическая компания» и ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Для проверки работы спектрометров 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 [3.10], 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,

$$N = \frac{4 \cdot V^2}{\Delta r^2}, \quad (3.4)$$

где  $V$  - коэффициент вариации. Согласно ГОСТ 14180-80 [3.10] для руд принимается  $V=35\%$ ,  $\Delta r$  - 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:

$$T = \frac{60 \cdot M}{Q \cdot N}, \quad (3.5)$$

Контрольные пробы по железорудному сырью отбирались в соответствии с ГОСТ 15054-80 Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения содержания влаги. [3.11] Минимальную массу точечной пробы, отбираемую с поверхности транспортера, в килограммах, вычисляют по формуле:

$$m = \frac{h \cdot b}{2} \cdot 3d_{\max} \cdot \rho, \quad (3.6)$$

где  $h$  - высота слоя руды в средней части ленты, м;

$b$  - ширина слоя руды, м;

$d_{\max}$  - размер максимального куска, м;

$\rho$  - насыпная плотность руды, кг/м.

Коэффициент вариации точечных проб по массе должен быть не более 20 %. Коэффициент вариации ( $C$ ) в процентах определяют по формуле

$$C = \frac{\sigma_1}{X} \cdot 100, \quad (3.7)$$

где  $\sigma_1$  — среднее квадратическое отклонение массы точечной пробы, кг;

$X$  — среднее значение массы точечной пробы, кг.

Минимальное число точечных проб в зависимости от заданной погрешности отбора проб вычисляют по формуле:

$$n = \left( \frac{K \cdot \sigma}{\beta_{\text{отб}}} \right)^2, \quad (3.8)$$

где  $K$  — коэффициент, равный 2 при 95 %-ной вероятности;

$\sigma$  — среднее квадратическое отклонение содержания железа в руде, %;

$\beta_{\text{отб}}$  — погрешность отбора проб, %.

В условиях ПАО «Гайский ГОК» период отбора и количество проб составляют 10,3 минуты, 95 проб с общей массой 190 кг за смену.

Отобранные пробы нумеровались и отправлялись для разделки и химического анализа в лабораторию ПАО «Гайский ГОК». 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 3.2 и на рисунках 3.1-3.3 приведены результаты сопоставления средних значений химического анализа руды и усредненные показания спектрометра, соответствующие отобранным пробам.

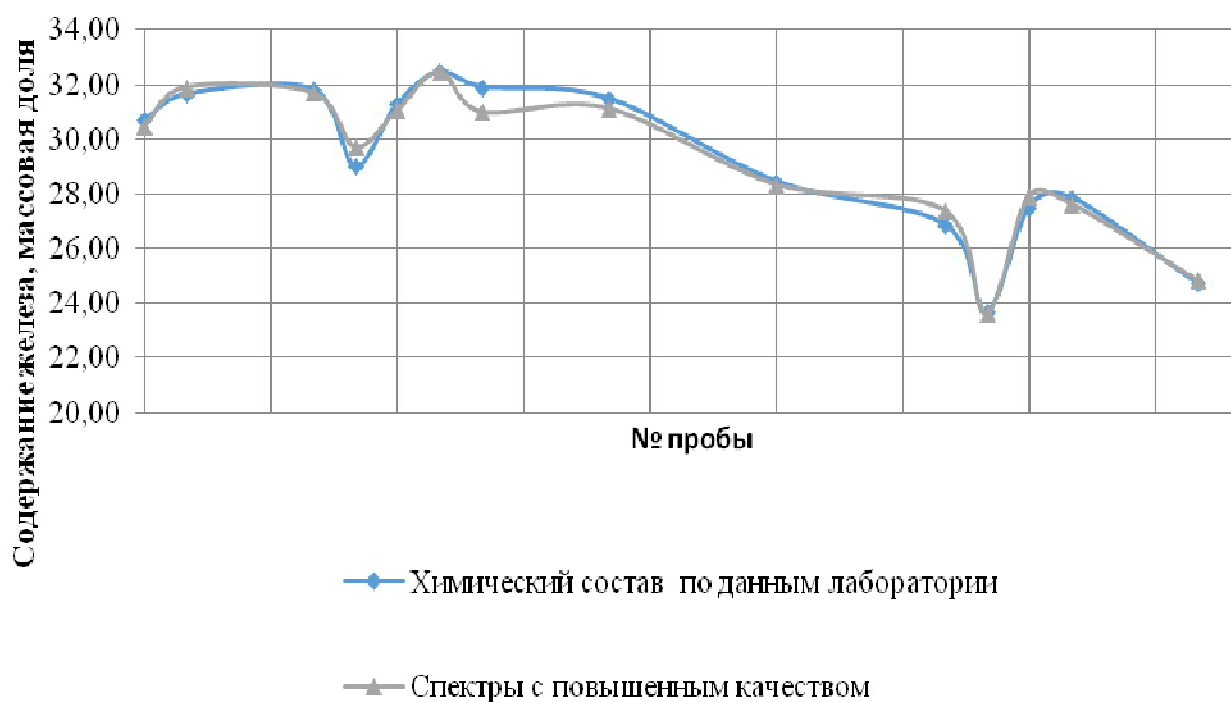


Рис. 3.1. Сравнение показаний спектрометра CON-X 02 и химического состава контрольных проб по содержанию железа

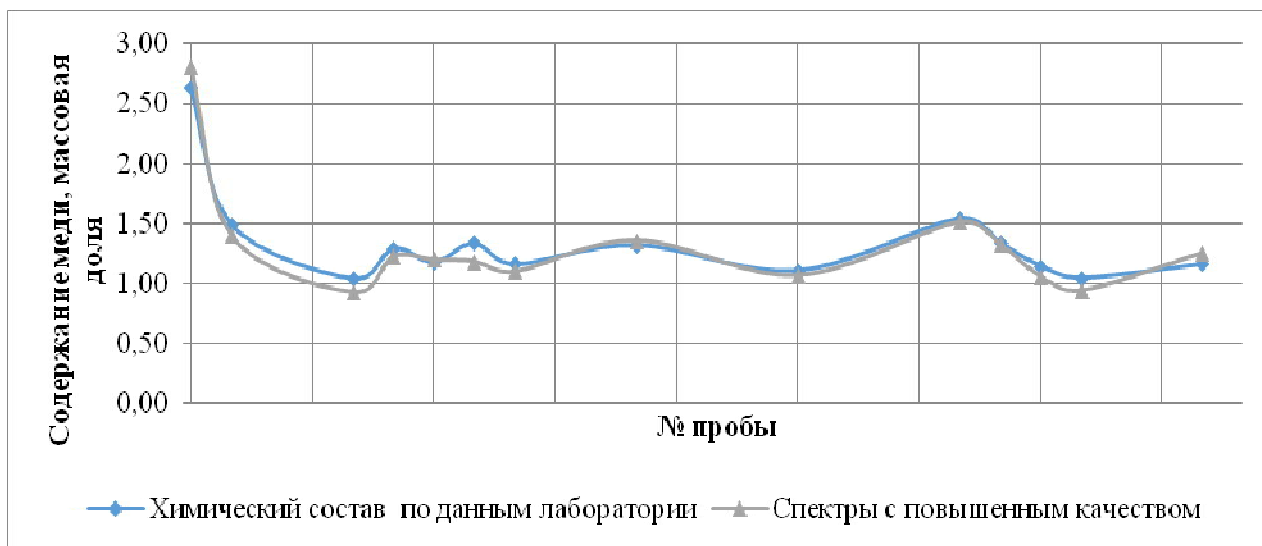


Рис. 3.2. Сравнение показаний спектрометра CON-X 02 и химического состава контрольных проб по содержанию меди

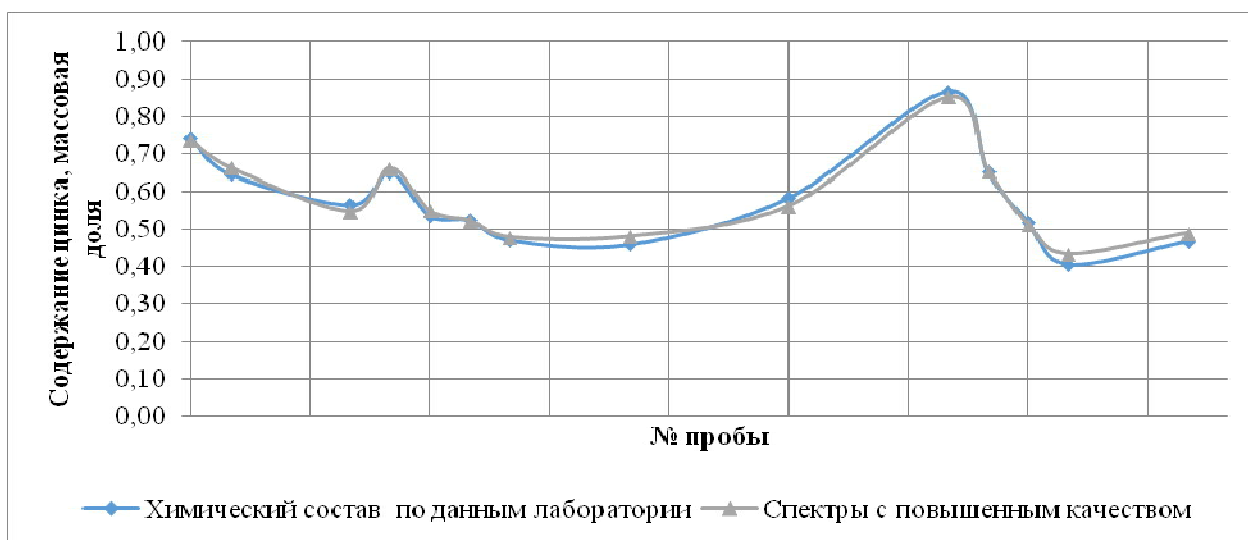


Рис. 3.3. Сравнение показаний спектрометра CON-X 02 и химического состава контрольных проб по содержанию цинка

Таблица 3.2

Сопоставление усредненных показаний CON-X 02 и усредненного химического состава отобранных проб руды

№ пробы	Химический состав проб по данным лаборатории			Состав по данным спектрометра, массовая доля		
	Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn
1	30,69	2,63	0,74	30,50	2,81	0,74
2	31,64	1,49	0,65	31,91	1,40	0,66
5	31,81	1,04	0,57	31,69	0,93	0,55

Окончание таблицы 3.2.

№ пробы	Химический состав проб по данным лаборатории			Состав по данным спектрометра, массовая доля		
	Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn
6	29,00	1,29	0,65	29,70	1,22	0,66
7	31,28	1,18	0,54	31,06	1,20	0,55
8	32,45	1,34	0,53	32,48	1,18	0,52
9	31,91	1,16	0,47	30,99	1,10	0,48
12	31,49	1,32	0,46	31,13	1,36	0,48
16	28,44	1,11	0,59	28,34	1,07	0,56
20	26,88	1,54	0,87	27,39	1,51	0,85
21	23,68	1,34	0,65	23,62	1,32	0,66
22	27,47	1,15	0,52	27,92	1,06	0,51
23	27,87	1,05	0,41	27,64	0,94	0,43
28	24,73	1,16	0,47	24,84	1,25	0,49

На обогатительной фабрике 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 ГОСТов [3.10, 3.12 – 3.16]. 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 представлены на рисунках 3.4-3.9 и в таблице 3.3.

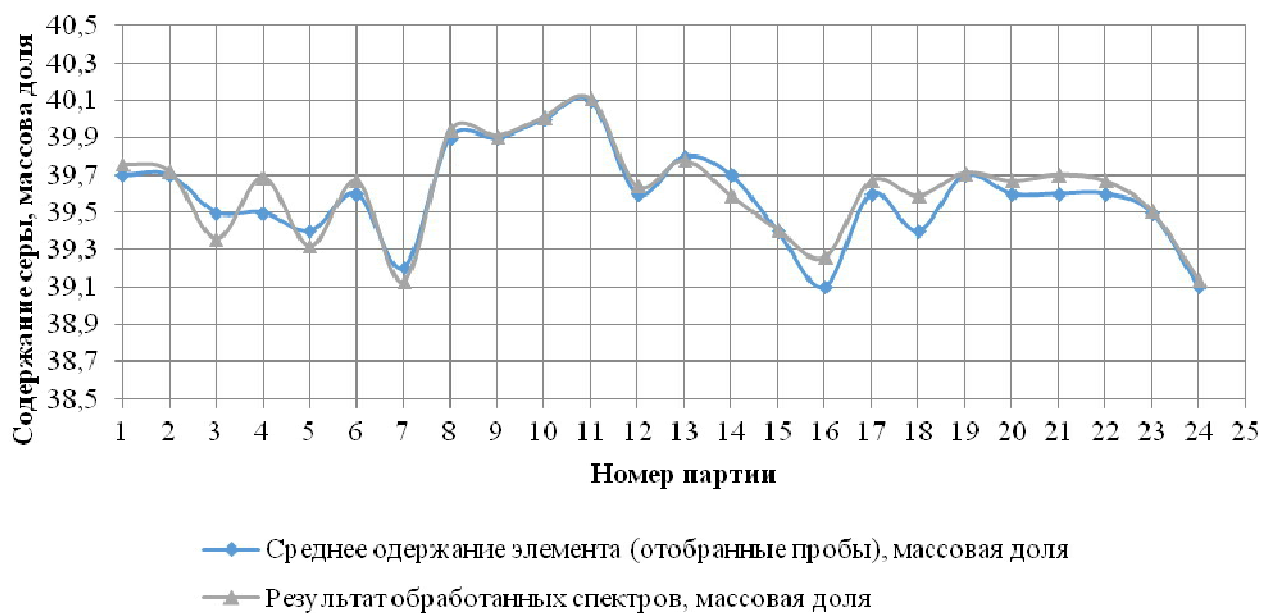


Рис. 3.4. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию серы.

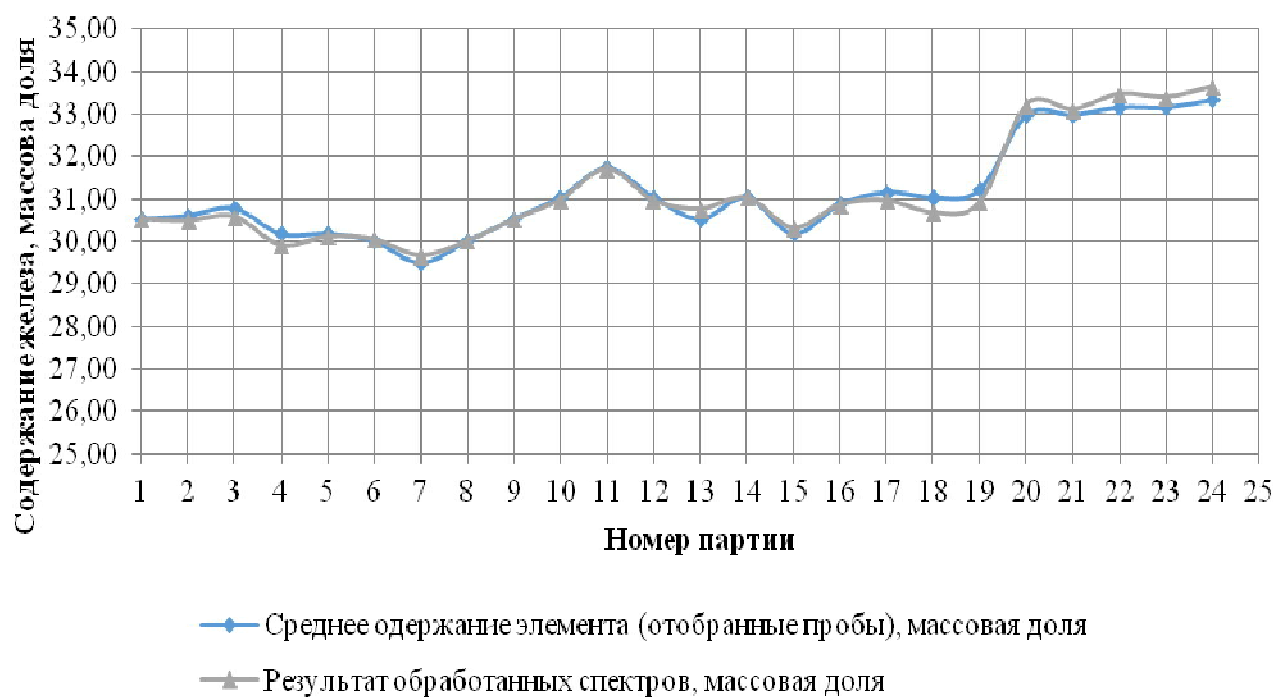


Рис. 3.5. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию железа.



Рис. 3.6. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию меди.

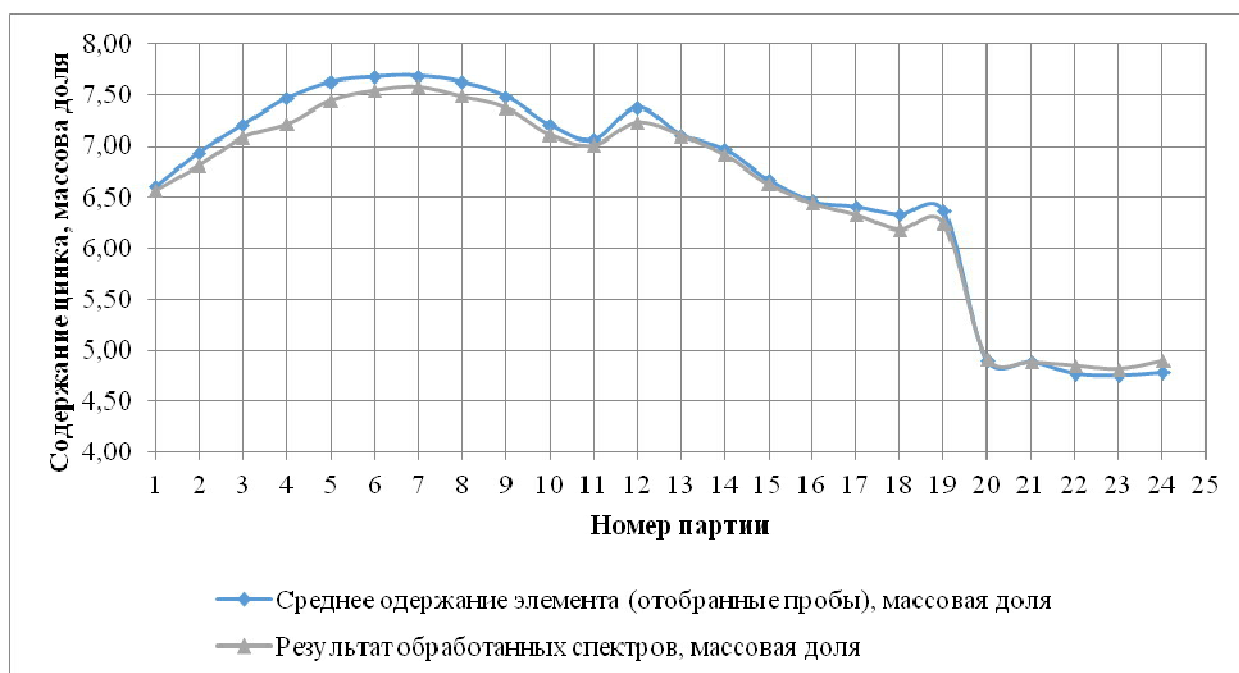


Рис. 3.7. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию цинка.



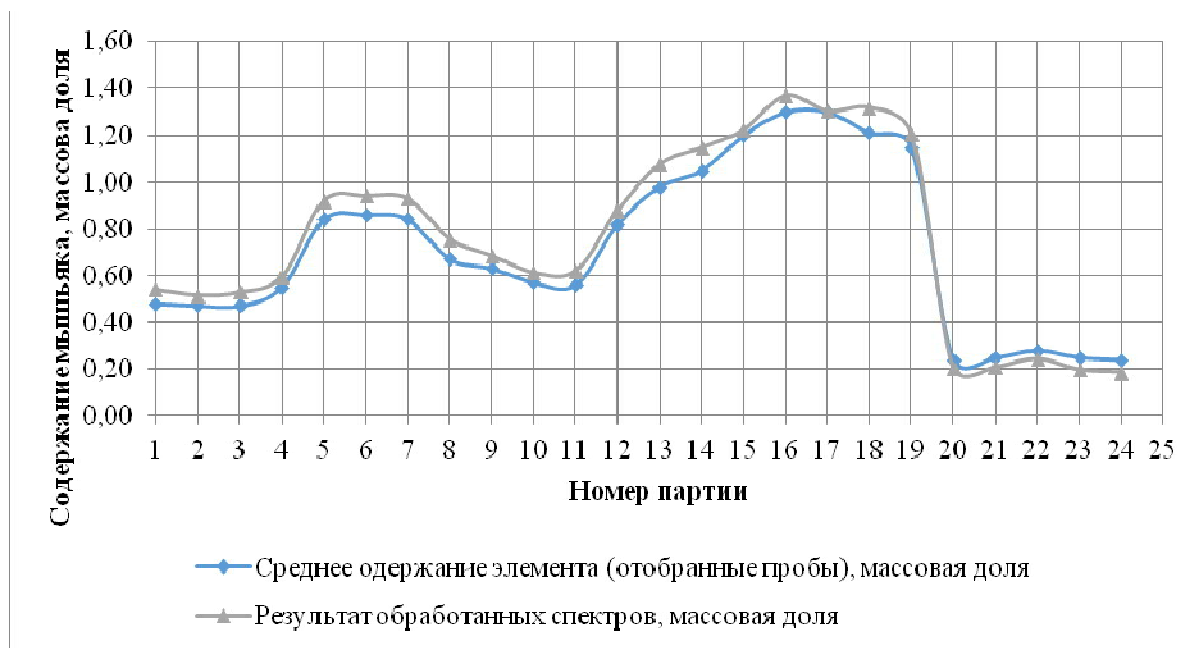


Рис. 3.8. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию мышьяка

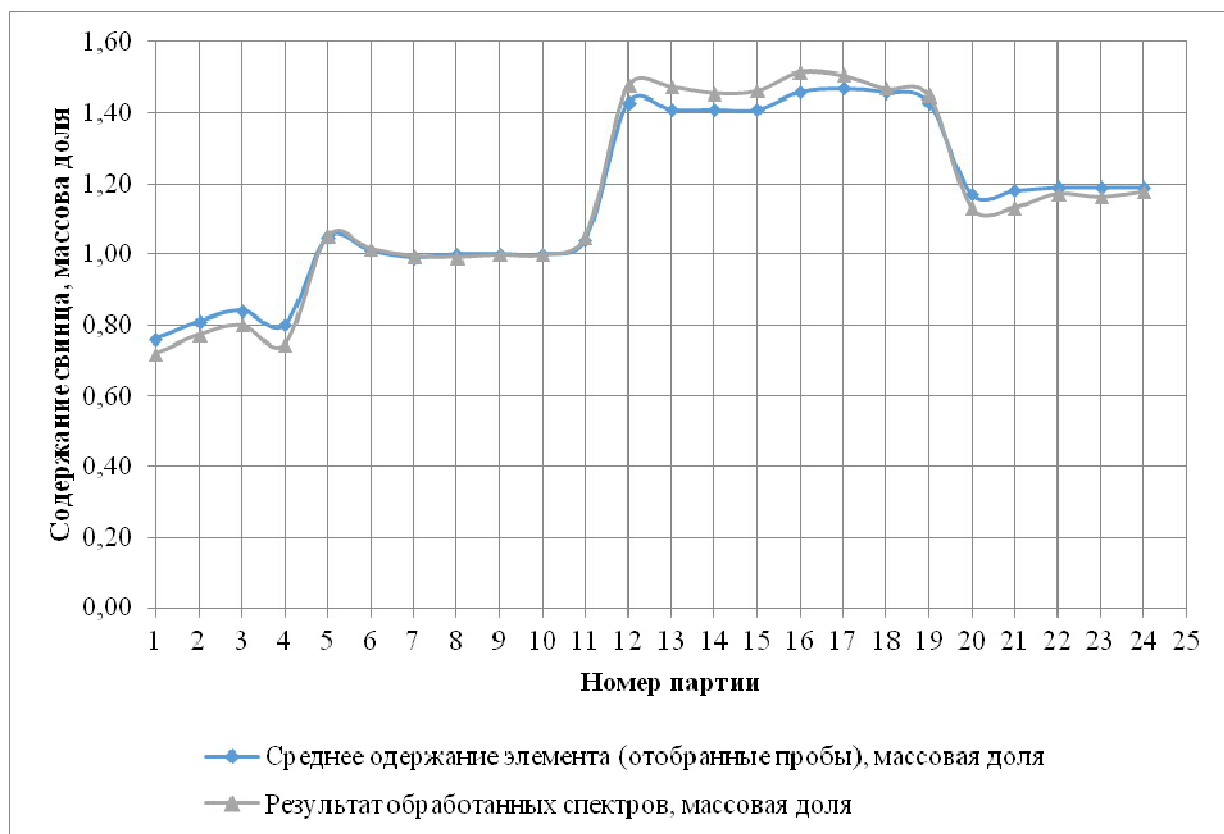


Рис. 3.9. Сравнение результатов химического состава партий по показаниям спектрометра CON-X 02 и результатам химического состава контрольных проб по содержанию свинца.

## Результаты промышленных испытаний на медном концентрате

Номер партии	Среднее одержание элемента (отобранные пробы), массовая доля						Результат обработанных спектров, массовая доля					
	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	39,8	30,52	17,95	6,57	0,54	0,72
2	39,7	30,62	18,01	6,94	0,47	0,81	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	39,4	30,58	17,96	7,09	0,53	0,80
4	39,5	30,19	18,36	7,47	0,55	0,80	39,7	29,91	18,24	7,22	0,60	0,75
5	39,4	30,19	17,64	7,63	0,84	1,05	39,3	30,11	17,59	7,45	0,92	1,05
6	39,6	30,02	17,37	7,68	0,86	1,01	39,7	30,05	17,48	7,56	0,94	1,02
7	39,2	29,50	17,49	7,69	0,84	0,99	39,1	29,67	17,60	7,59	0,93	1,00
8	39,9	30,02	17,20	7,63	0,67	1,00	39,9	30,01	17,33	7,49	0,76	0,99
9	39,9	30,54	17,42	7,49	0,63	1,00	39,9	30,52	17,50	7,38	0,68	1,00
10	40	31,05	17,26	7,21	0,57	1,00	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	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	39,6	30,96	17,39	7,24	0,88	1,48
13	39,8	30,54	17,34	7,11	0,98	1,41	39,8	30,76	17,56	7,11	1,08	1,48
14	39,7	31,05	17,61	6,97	1,05	1,41	39,6	31,03	17,66	6,92	1,15	1,46
15	39,4	30,19	17,80	6,67	1,20	1,41	39,4	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	30,86	18,02	6,44	1,37	1,52
17	39,6	31,17	18,13	6,41	1,30	1,47	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	39,6	30,68	18,06	6,18	1,32	1,47
19	39,7	31,23	18,23	6,37	1,15	1,43	39,7	30,92	18,18	6,25	1,20	1,45
20	39,6	32,99	18,39	4,90	0,24	1,17	39,7	33,22	18,30	4,92	0,20	1,13
21	39,6	32,99	18,40	4,89	0,25	1,18	39,7	33,11	18,19	4,88	0,21	1,13
22	39,6	33,17	18,23	4,77	0,28	1,19	39,7	33,47	18,24	4,85	0,24	1,17
23	39,5	33,17	18,19	4,75	0,25	1,19	39,5	33,40	18,27	4,81	0,20	1,16
24	39,1	33,34	18,39	4,78	0,24	1,19	39,1	33,64	18,34	4,89	0,19	1,18

### 3.2 Апробация разработанных технических и программных решений в условиях предприятий черной металлургии

В условиях ПАО «ММК» промышленные испытания рентгенофлуоресцентного спектрометра проводились на аглофабриках №2 и №3.

Основным условием получения агломерата с заданным химическим составом является своевременное получение информации о среднем химическом составе шихтовых материалов агломерационного производства. Для производства агломерата со стабилизированным содержанием железа особую важность имеет определение среднего химического состава железосодержащих компонентов аглошихты.



Рис. 3.10 Схема подготовки сырья к агломерации на ГОП ПАО «ММК»

В участке усреднения концентратов (УУК) и цехе подготовки аглошихты (ЦПАШ) на основании учёта массы поступивших материалов и их химического состава составляется паспорт штабеля усреднённой смеси. Паспорт штабеля включает в себя: количество выгруженных в штабель полувагонов; масса штабеля; состав штабеля по видам сырья и химический состав штабеля. Массовая доля вида сырья в штабеле определяется по формуле

$$\omega_i = \frac{m_i}{M} \cdot 100 \%, \quad (3.9)$$

где  $m_i$  - масса одного вида сырья, т;  $M$  – масса штабеля, т.

Концентрация элементов в штабеле (%):

$$C^j = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot c_i^j, \quad (3.10)$$

где  $c_i^j$  - концентрация  $j$ -го элемента в  $i$ -м виде сырья, %.

Часть привозных руд и концентратов, поступающих в ЦПАШ, складировается по сортам и используется затем, как технологическое воздействие для получения агломерата заданного состава.

При избыточном поступлении привозное сырье перевозят на склады дробильно-обжиговой фабрики сульфидных руд (ДОФСР).

Используемые при агломерации отсев агломерата из доменного цеха и окалину прокатного производства привозят во временный склад ЦПАШ. После накопления железосодержащих материалов (ЖСМ) производится их совместное перемешивание. Перед отгрузкой на участок усреднения концентрата (УУК) из полученной смеси экскаваторами формируют штабель.

На ДОФ-5 поступает местное сырье из карьеров через усреднительно-перегрузочные склады и привозная руда из ЦПАШ. После двух стадий дробления материал крупностью 0-125 мм укладывается в штабель. Затем руду отправляют на обогащение. Полученный концентрат обезвоживают и ссыпают на усреднительный склад концентрата корпуса мокрой магнитной сепарации. Далее сырье отправляют на узел ввода извести (УВИ) участка усреднения концентрата. В окомкователе получают смесь концентрата и пылевидной извести.

На сборных конвейерах объединяются три потока материалов: 1) из приемных бункеров, 2) из ДОФСР и 3) от УВИ УУК, и разгружаются в штабели УУК. Из 80-110 слоев смеси железорудного сырья и флюсов формируется штабель емкостью 40 тыс. т. Высота одного слоя должна составлять 0,07-0,1 м. Усредняемая в штабеле смесь используется для производства агломерата.

Таблица 3.4

## Распределение материала в штабелях ЦПАШ

Штабель 1		Штабель 2		Исходные данные и обозначения
Высота штабеля с учетом данного слоя	Высота слоя	Высота штабеля с учетом данного слоя	Высота слоя	
1	2	3	4	5
0,195	0,195	1,765	1,765	Плотность 2,2 т/м <sup>3</sup>
0,652	0,457	1,792	0,027	Тангенс угла 0,780744
0,692	0,041	2,823	1,031	Котангенс угла 1,280829
0,732	0,040	2,885	0,062	Длина штабеля 135 м
1,420	0,688	3,460	0,575	Ширина штабеля 49,28088 м
2,077	0,658	4,462	1,002	
2,248	0,170	5,641	1,179	Ковдорский к-т
2,966	0,718	5,666	0,025	Соколовский к-т
3,120	0,154	5,690	0,024	Лебединский к-т
3,135	0,015	5,713	0,022	Стойленский к-т
4,272	1,137	5,722	0,009	Отсев Соколов. окатышей
4,425	0,153	6,262	0,540	
4,625	0,200	6,308	0,046	Отсев Лебед. окатышей
4,668	0,044	6,350	0,041	
4,679	0,011	7,021	0,671	Бакальский обож. сидерит
4,694	0,015	7,042	0,021	
4,708	0,014	7,178	0,136	Колошниковая пыль
4,780	0,072	7,312	0,134	Конвертерный шлак
6,242	1,462	7,398	0,085	Окалина
6,251	0,009	7,686	0,289	Коксовая пыль
6,394	0,143	7,976	0,290	
6,435	0,041	8,647	0,671	
8,303	1,869	8,823	0,176	
8,476	0,173	8,836	0,013	
8,483	0,007	8,937	0,101	
8,494	0,011	9,468	0,531	
8,606	0,112	10,624	1,156	
8,747	0,142	10,651	0,027	
8,756	0,009	10,673	0,022	
9,076	0,320	10,762	0,089	
9,138	0,061	11,024	0,262	
9,243	0,105	11,188	0,164	
9,249	0,006	11,252	0,064	
10,128	0,879	11,330	0,078	

Продолжение табл. 3.4

1	2	3	4	5
10,135	0,008	12,358	1,028	
10,145	0,009	12,443	0,084	
10,151	0,006	12,674	0,231	
10,261	0,111	12,680	0,006	
11,026	0,765	12,908	0,227	
11,098	0,072	12,912	0,005	
11,187	0,089	13,031	0,119	
11,224	0,037	13,142	0,111	
12,365	1,141	13,788	0,646	
13,612	1,247	13,923	0,135	
13,691	0,080	14,098	0,175	
13,716	0,025	14,120	0,022	
14,407	0,691	14,196	0,075	
14,503	0,096	14,244	0,048	
14,584	0,081	14,248	0,004	
14,594	0,010	15,059	0,811	
14,600	0,006	15,086	0,027	
14,659	0,059	15,227	0,141	
15,203	0,544	15,270	0,043	
15,281	0,077	15,342	0,072	
15,326	0,045	15,388	0,045	
15,403	0,077	15,409	0,021	
15,411	0,008	15,695	0,286	
16,040	0,630	15,987	0,292	
16,131	0,091	16,056	0,069	
16,195	0,064	16,130	0,074	
16,203	0,008	16,145	0,015	
16,406	0,203	16,149	0,004	
16,433	0,027	16,277	0,128	
16,582	0,148	17,285	1,009	
16,648	0,067	17,331	0,046	
16,719	0,071	17,348	0,017	
16,729	0,010	17,549	0,200	
16,759	0,030	17,572	0,023	
16,793	0,034	17,581	0,009	
		17,910	0,329	
		17,959	0,049	
		17,989	0,030	
		17,994	0,005	
		18,010	0,017	
		18,014	0,003	

1	2	3	4	5
		18,217	0,203	
		18,281	0,064	
		18,285	0,005	
		18,294	0,008	
		18,298	0,005	
		18,315	0,016	
		18,636	0,321	
		18,709	0,073	
		18,746	0,038	
		18,898	0,151	
		18,938	0,040	
		18,975	0,037	
		18,979	0,003	
		19,102	0,123	
		19,165	0,063	
		19,227	0,063	
		19,238	0,010	

В табл. 3.5 показано распределение материала в штабеле УУК.

Для расчета состава агломерационной шихты дозировщики аглофабрик используют данные паспорта штабеля УУК, который содержит общую массу штабеля (т), материальный состав (%), расчетный химический состав (%).

Расчет штабеля УУК производят аналогично расчету штабеля ЦПАШ.

Основная роль по усреднению сырья по химическому составу отведена штабелям ЦПАШ и УУК. В приведенном примере (см. табл. 3.4) в одном из штабелей ЦПАШ содержится шестьдесят девять слоев материалов, толщина которых варьируется от 0,006 до 1,869 м. При этом в штабеле находится пять слоев высотой более 1 м однородного материала. В другом штабеле содержится девяносто два слоя, высота семи из которых превышает 1 м. Минимальная высота слоя составила 0,004 м, максимальная – 1,765 м. В обоих штабелях самые высокие слои образует Соколовский концентрат – основной вид привозного сырья для производства агломерата.

Таблица 3.5.

## Распределение материалов в штабеле УУК

Высота штабеля с учетом данного слоя	Высота слоя	Исходные данные и обозначения	
1	2	3	
0,108	0,108	Плотность 2,2 т/м <sup>3</sup>	
0,483	0,375	Тангенс угла 0,780744	
0,799	0,316	Котангенс угла 1,280829	
1,330	0,531	Длина штабеля 135 м	
1,777	0,447	Ширина штабеля 23,5423 м	
1,980	0,203	Смесь	
2,172	0,192	Соколовский концентрат	
2,354	0,182	Ковдорский концентрат	
2,528	0,174	Агломелочь	
2,856	0,328	Шлам	
3,161	0,305		
3,248	0,087		
3,530	0,282		
3,665	0,135		
3,797	0,132		
4,051	0,254		
4,294	0,243		
4,412	0,118		
4,528	0,116		
4,641	0,113		
4,752	0,111		
4,969	0,217		
5,179	0,210		
5,240	0,061		
5,442	0,202		
5,541	0,099		
5,638	0,097		
5,829	0,191		
6,015	0,186		
6,106	0,091		
6,196	0,090		
6,285	0,089		
6,373	0,088		
6,547	0,174		
6,717	0,170		
6,767	0,050		



1	2	3
6,933	0,166	
7,015	0,082	
7,096	0,081	
7,255	0,159	
7,412	0,157	
7,489	0,077	
7,566	0,077	
7,642	0,076	
7,717	0,075	
7,866	0,149	
8,013	0,147	
8,056	0,043	
8,200	0,144	
8,271	0,071	
8,342	0,071	
8,482	0,140	
8,620	0,138	
8,688	0,068	
8,756	0,068	
8,823	0,067	
8,890	0,067	
9,022	0,132	
9,153	0,131	
9,192	0,039	

Штабель не может обеспечить достаточное усреднение при совокупности таких условий (значительная толщина слоев, большое количество видов сырья, закладываемых в данный штабель, а также колебания химического состава каждого вида сырья относительно друг друга).

Штабель УУК (см. табл. 3.5) состоит из шестидесяти слоев. Из них двадцать три слоя более 0,1 м, а максимальная высота слоя превышает 1 м и составляет 1,181 м. Такие условия также не позволяют достичь требуемого усреднения.

Отгрузка ЖРС из штабелей УУК осуществляется грейферными кранами с емкостью грейферов 4 м<sup>3</sup> через стационарные бункеры ёмкостью 60 т, оборудованные ленточными или вибрационными питателями с регулируемой

производительностью от 100 до 500 т/ч. До приёмных бункеров аглофабрик смесь УУК транспортируется конвейерами № 705-8, 9; 708-1, 2; 708-3, 4; 708-3 бис, 708-4 бис; 706-2; 709-2. Распределение потока усреднённой смеси на аглофабрики № 2, 3 и 4 производится на конвейерах № 708-3 и 4 шибберным делителем. В бункере перегрузочного узла конвейера № 709-1, оборудованного электровибрационными питателями, производится разделение потока на аглофабрики 2 и 3.

Схема движения потоков на УУК представлена на рис. 3.11.

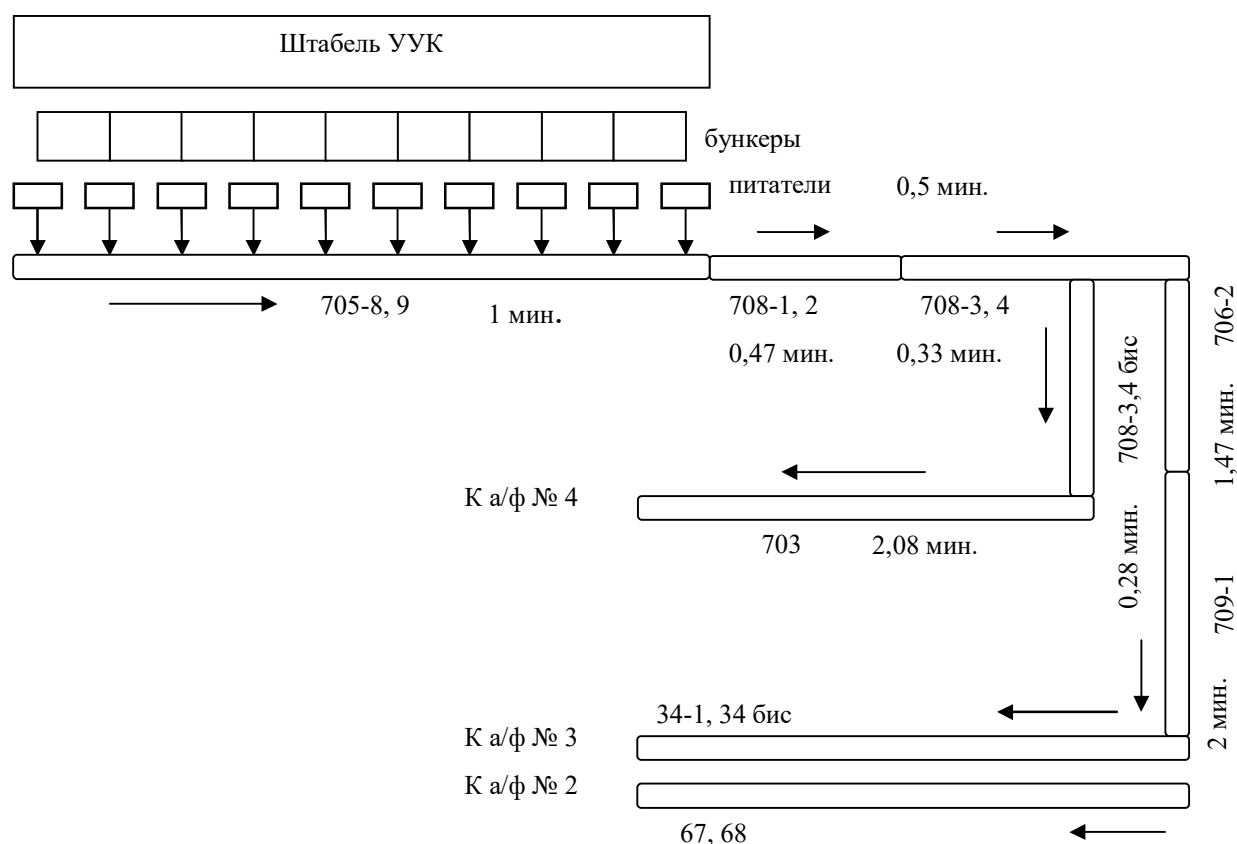


Рис. 3.11 Схема распределения потока ЖРС по аглофикам

Таким образом, от момента смешения компонентов аглошихты на конвейере до окончания спекания агломерата проходит 54,55 мин., а с момента загрузки рудной части в бункера шихтового отделения – 188,55 мин. или 3 часа и 8,55 мин.

Отбор проб поступившего в ЦПАШ сырья производится перед выгрузкой материалов в пролеты. Качество поступившего продукта контролируется

по химическому составу объединенной пробы материалов, полученной из разовых проб, отобранных из партии до 25 полувагонов. Содержание некоторых видов сырья в штабелях ограничен, поэтому, исходя из количества выгруженных материалов каждого сорта, по мере заполнения пролетов рассчитывается состав усредняемых штабелей по видам сырья.

После окончания формирования штабеля рассчитывается паспорт штабеля ЦПАШ, данные которого используются для определения прогнозируемого качества агломерата и составления паспорта штабеля УУК.

При поступлении в ЦПАШ привозного сырья, складированного по сортам, производится отбор проб материалов в специально отведенных точках. Контроль качества поступившего продукта осуществляется по химическому составу объединенной пробы материалов, полученной из разовых проб, отобранных из партии до 30 полувагонов. После заполнения пролетов материалами по разовым пробам рассчитывается усредненный химический состав. Результат расчетов используется для определения прогнозируемого качества агломерата и составления паспорта штабеля УУК.

Отбор проб отсева агломерата и окалины на химический и гранулометрический состав осуществляется после их выгрузки на временный склад ЦПАШ. Масса учитывается по количеству доставленных хопперов. В паспорте штабеля указывается общее количество материалов (т), соотношение между ними (%) и средний химический состав (по видам материалов). Эти данные необходимы для определения прогнозируемого качества агломерата и расчета паспорта штабеля УУК.

Химический состав и масса ЖРС, поступающих из ДОФСР и ДОФ-5, контролируется при отгрузке материалов из фабрик в УУК. Это требуется для расчета паспорта штабеля УУК.

При поступлении материалов в приемные бункера УУК отбираются пробы всех видов ЖСМ (кроме смеси ЦПАШ) и извести на химический анализ, из которых один раз в смену формируются усредненные пробы ЖРС и извести. Результаты анализа используют для расчета паспорта штабеля УУК.

Общее количество материалов, уложенных в штабель УУК, контролируется конвейерными весами на конвейерах СК 1,2. При начале выборки нового штабеля делают предварительный расчет паспорта штабеля. Расчет ведется на основании количества поступивших материалов по всем потокам и усредненных химических составов различных видов сырья (поступивших на данный момент), а также паспорта штабеля ЦПАШ. Предварительный паспорт штабеля необходим для возможной корректировки состава аглошихты. После полной выработки «старого» штабеля рассчитывается основной паспорт штабеля, который используется для расчета состава аглошихты.

Один раз в смену осуществляется отбор проб известняка на гранулометрический и химический состав. Результаты анализов необходимы, чтобы определить состав агломерационной шихты.

Таким образом, на аглофабриках для расчета шихты используют следующие данные: паспорт штабеля УУК, химический состав известняка и возврата, а также соотношение компонентов в шихте.

Для расчета химического состава агломерата необходимо знать массу, состав и влажность компонентов аглошихты.

Пересчет массы ЖРС, известняка и кокса на сухую массу (кг) ведется по формуле:

$$m_i^{\text{сух}} = \frac{m_i \cdot (100 - W_i)}{100}, \quad (3.11)$$

где  $m_i$  и  $W_i$  - масса (кг) и влажность (%)  $i$ -го компонента шихты соответственно.

Потери при прокаливании ЖРС (%) принимаются в зависимости от содержания железа в ЖРС по функции

$$\text{ППП}_{\text{ЖРС}} = 3 - \frac{\text{Fe}_{\text{ЖРС}} - 58}{2}, \quad (3.12)$$

Исходя из содержания оксида кальция в известняке, рассчитываются потери при прокаливании известняка (%)

$$\text{ППП}_{\text{изв.}} = 44,5 - \frac{\text{CaO}_{\text{изв.}} - 51,5}{2}. \quad (3.13)$$

Потери при прокаливании кокса в расчете – величина постоянная и равная 87,5 %.

Для пересчета потерь при прокаливании из относительной величины (%) в абсолютную (кг) используется формула:

$$\text{ППП}_i^{\text{кг}} = m_i^{\text{сух}} \cdot \frac{(100 - \text{ППП}_i)}{100}, \quad (3.14)$$

где  $\text{ППП}_i$  - потери при прокаливании  $i$ -го компонента аглошихты, %.

Общие потери при прокаливании представляют собой сумму потерь при прокаливании всех материалов (кг):

$$\text{ППП} = \sum \text{ППП}_i. \quad (3.15)$$

Масса Fe, CaO и SiO<sub>2</sub> в шихтовых материалах (кг) находятся по формуле

$$m_i^j = m_i^{\text{сух}} \cdot \frac{c_i^j}{100}, \quad (3.16)$$

где  $c_i^j$  - концентрация Fe, CaO и SiO<sub>2</sub> в  $i$ -м компоненте аглошихты, %.

Формула для определения содержания железа, оксидов кальция и кремния в агломерате имеет вид

$$c_{\text{агл}}^j = \frac{\sum m_i^j \cdot 0,9925 \cdot 100}{\text{ППП}}, \quad (3.17)$$

где 0,9925 – коэффициент, учитывающий увеличение массы агломерата за счет присоединения кислорода из воздуха.

По вышеприведенному алгоритму были произведены расчеты состава агломерата за недельный период (с 9.10 по 15.10) типичной работы аглофабрики. В первом случае состав компонентов аглошихты принимался по результатам химического анализа проб из-под бункеров шихтового отделения аглофабрик, во втором – в соответствии с паспортом штабеля УУК.

Результаты расчетов и соответствующие им фактические значения содержания железа, оксида кальция, оксида кремния и основности агломерата за 9.10. приведены на рис. 3.12 – 3.18. Из рисунков видно, что между расчет-

ными значениями и реальными существенная разница. В табл. 3.6 приведены соответствующие коэффициенты корреляции. Во многих случаях отличается и характер кривых: например, (см. рис. 3.12), содержание железа в агломерате в 22:00 по расчету должно было резко упасть (на 1,07 %), а на практике оно осталось на прежнем уровне. Расходятся и расчетные данные между собой: прогнозируемый состав агломерата по паспорту штабеля и по пробам из-под бункеров отличаются.

Таблица 3.6

Коэффициенты корреляции между расчетными и фактическими данными

	Коэффициент корреляции по			
	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	B
по бункеру	0,624	0,686	0,240	0,664
по штабелю	0,596	0,752	0,331	0,832

Все это свидетельствует о том, что данные о составе шихтовых материалов (по пробам из-под бункеров и по паспорту штабеля) не отражают действительность, что в свою очередь говорит о несовершенстве пробоотбора.

Анализ полученных результатов показывает, что во всех сериях колебания железа в точечных пробах ЖРС превышали доверительный интервал. Средние значения содержания железа, оксида кальция, оксида кремния и основности значительно отличались от аналогичных значений в паспорте штабеля. Это свидетельствует о значительной сегрегации компонентов смеси, которая приводит к не представительности точечной пробы.

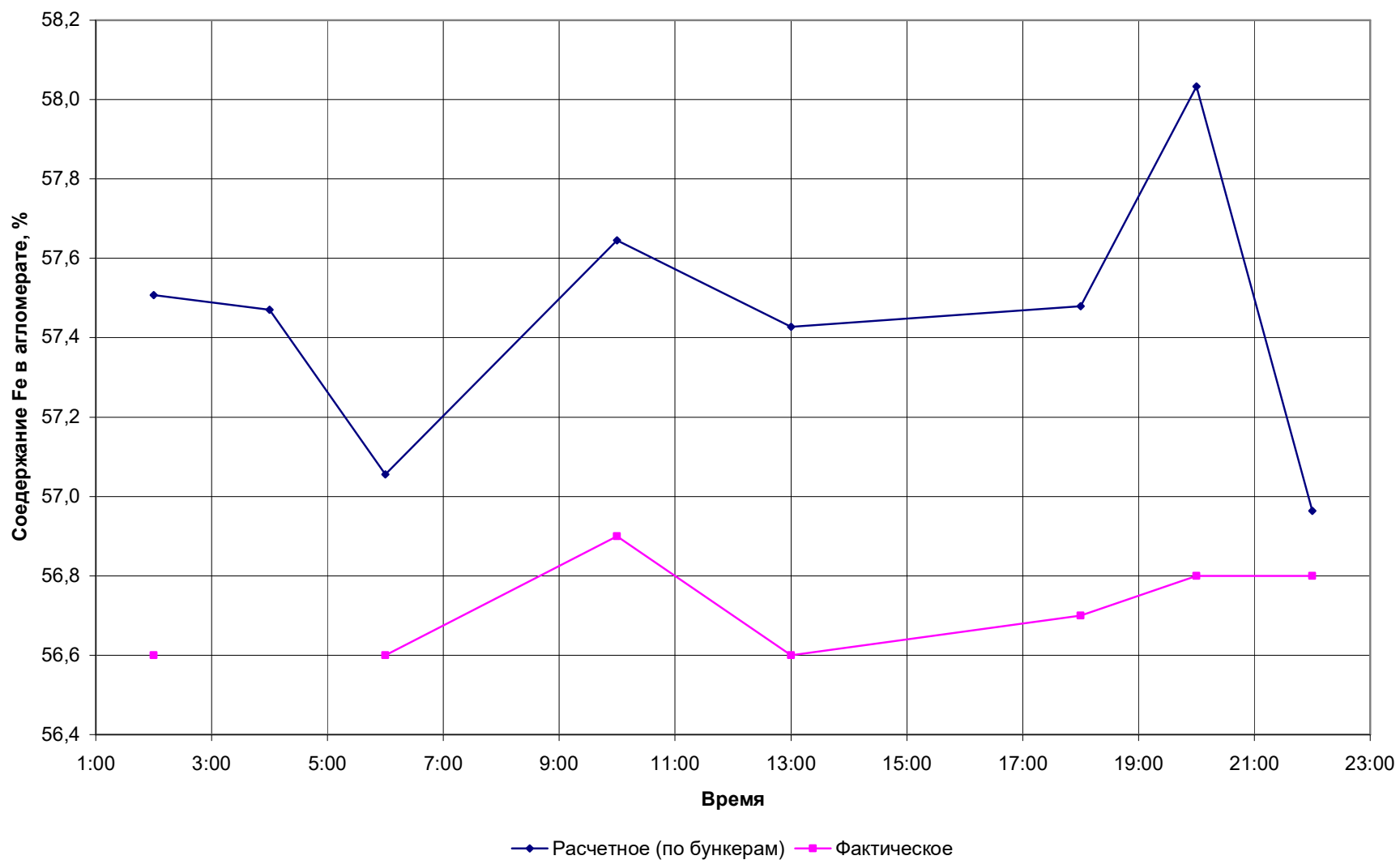


Рис. 3.12 Содержание железа в агломерате, рассчитанное по пробам из-под бункеров за 9.10.

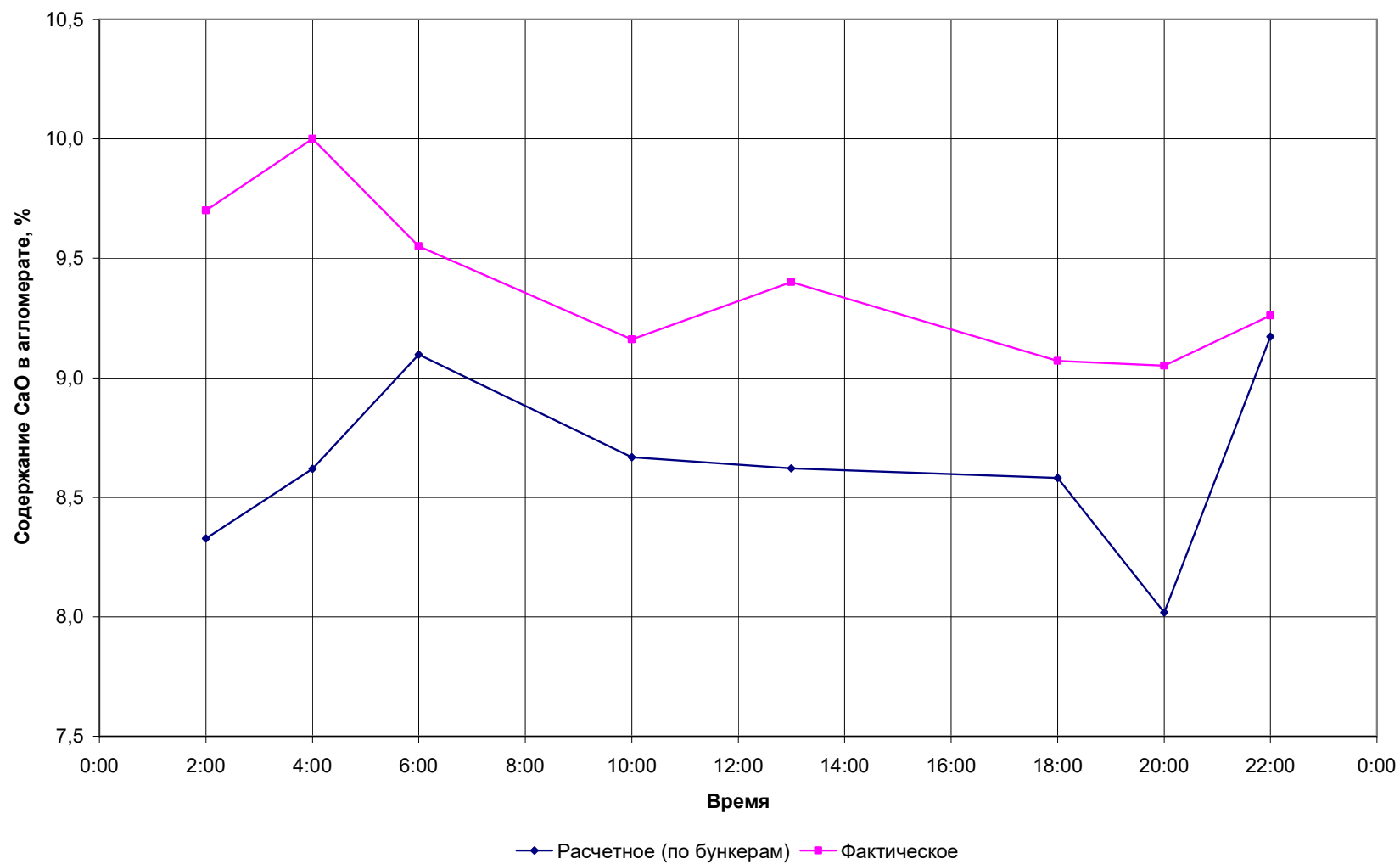


Рис. 3.13 Содержание оксида кальция в агломерате, рассчитанное по пробам из-под бункеров за 9.10.



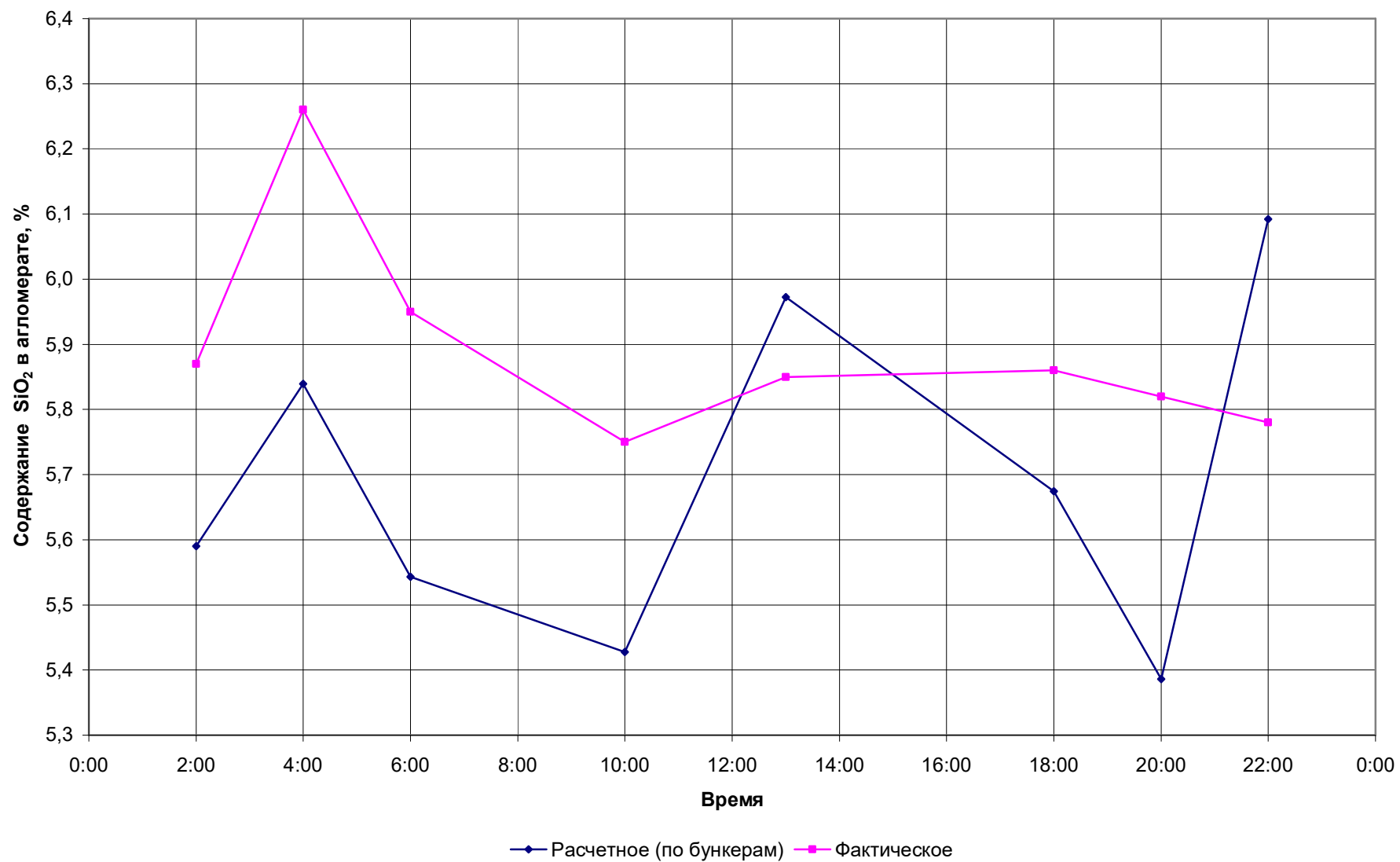


Рис. 3.14. Содержание оксида кремния в агglomerате, рассчитанное по пробам из-под бункеров за 9.10.

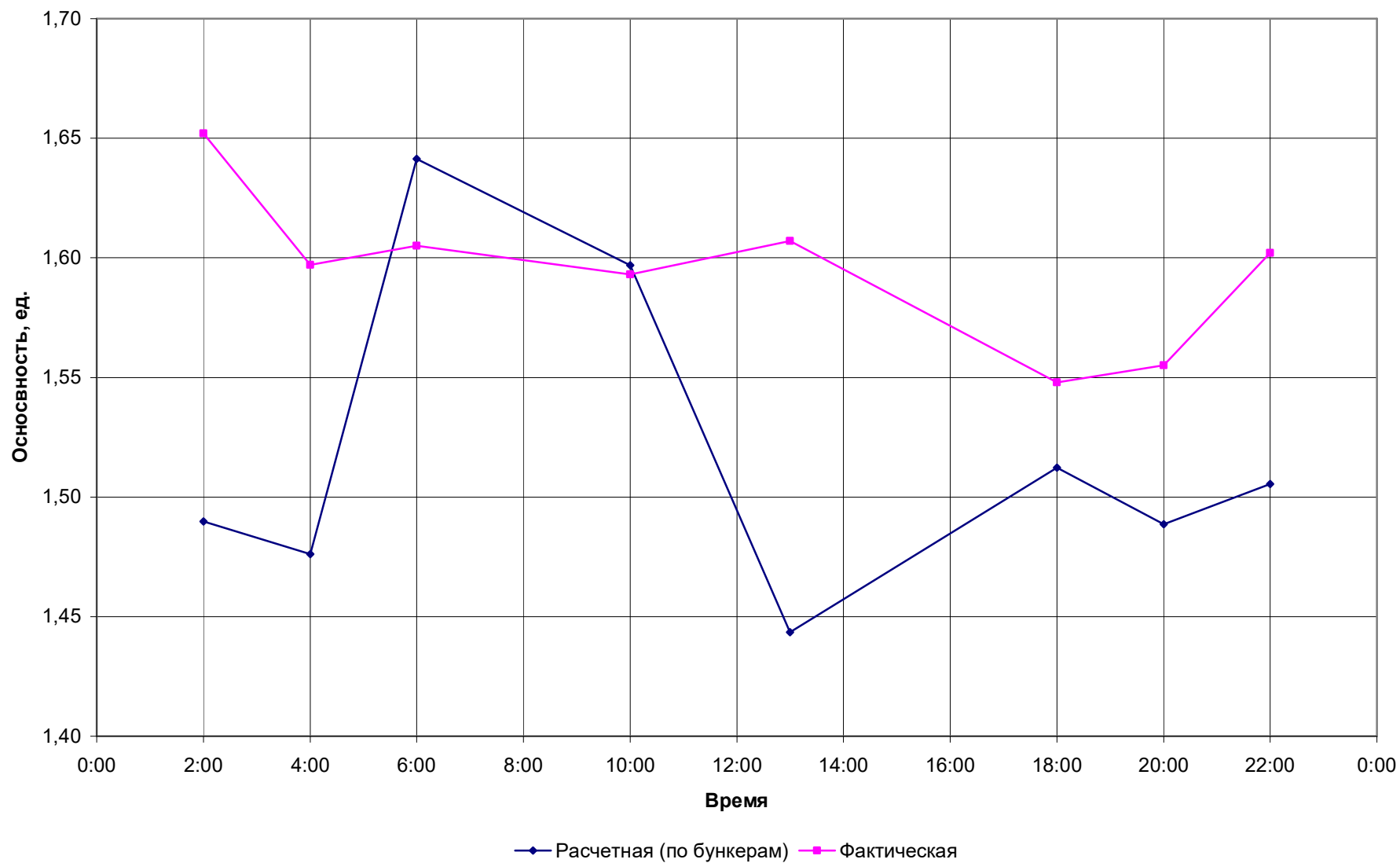


Рис. 3.15. Оснобность агломерата, рассчитанная по пробам из-под бункеров за 9.10.

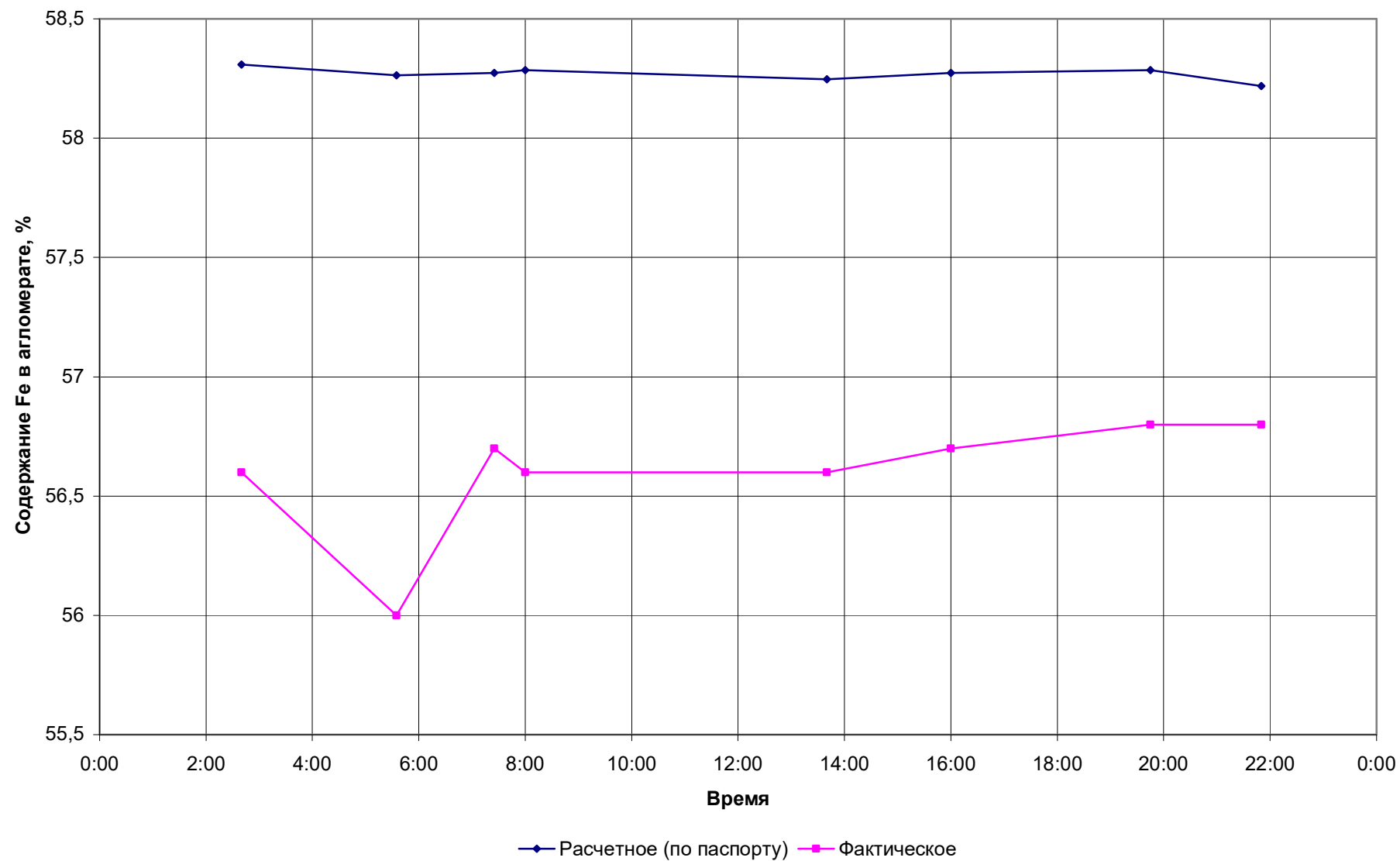


Рис. 3.15. Содержание железа в агломерате, рассчитанное по паспорту штабеля УУК за 9.10.

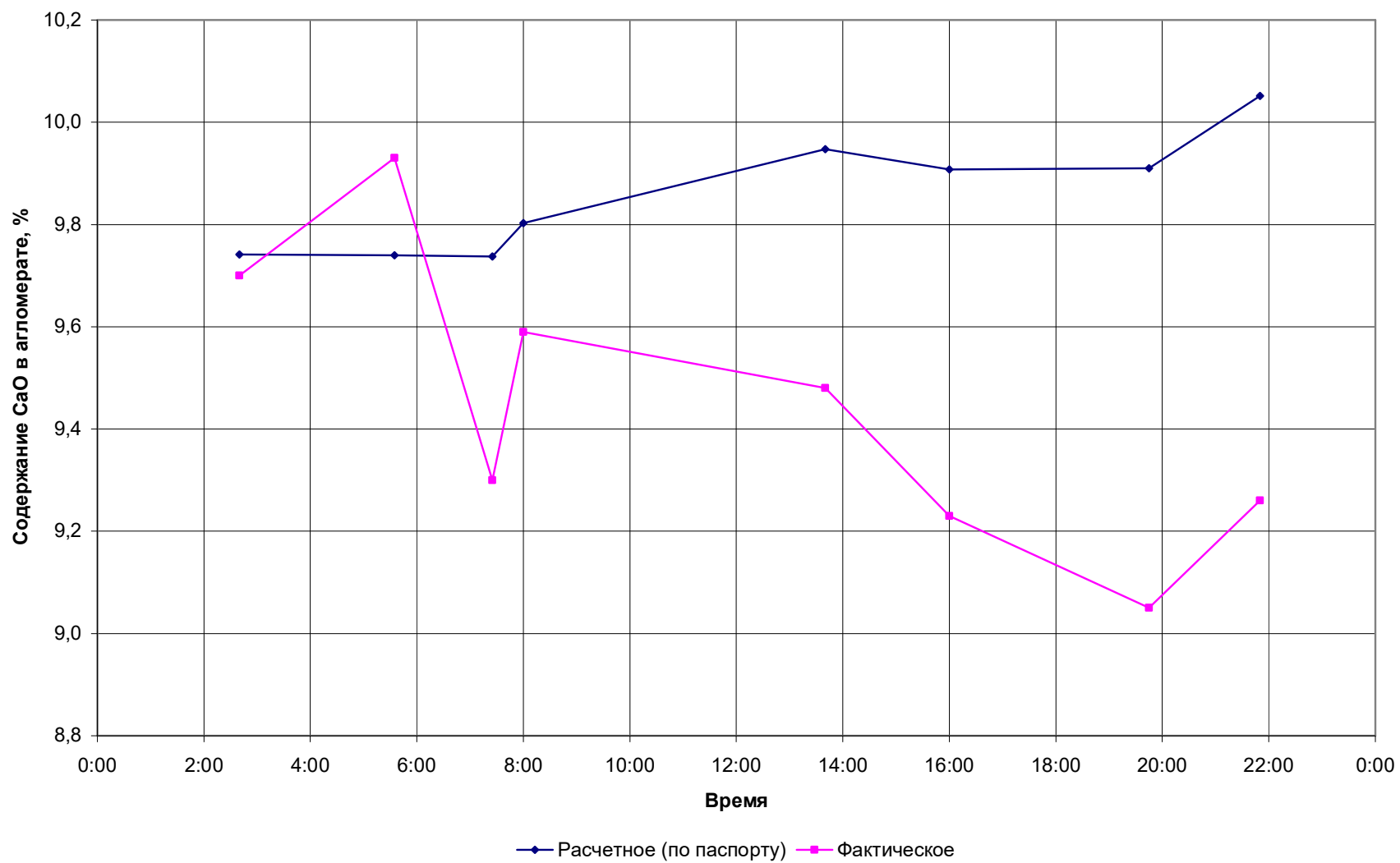


Рис. 3.16. Содержание оксида кальция в агglomerате, рассчитанное по паспорту штабеля УУК за 9.10.

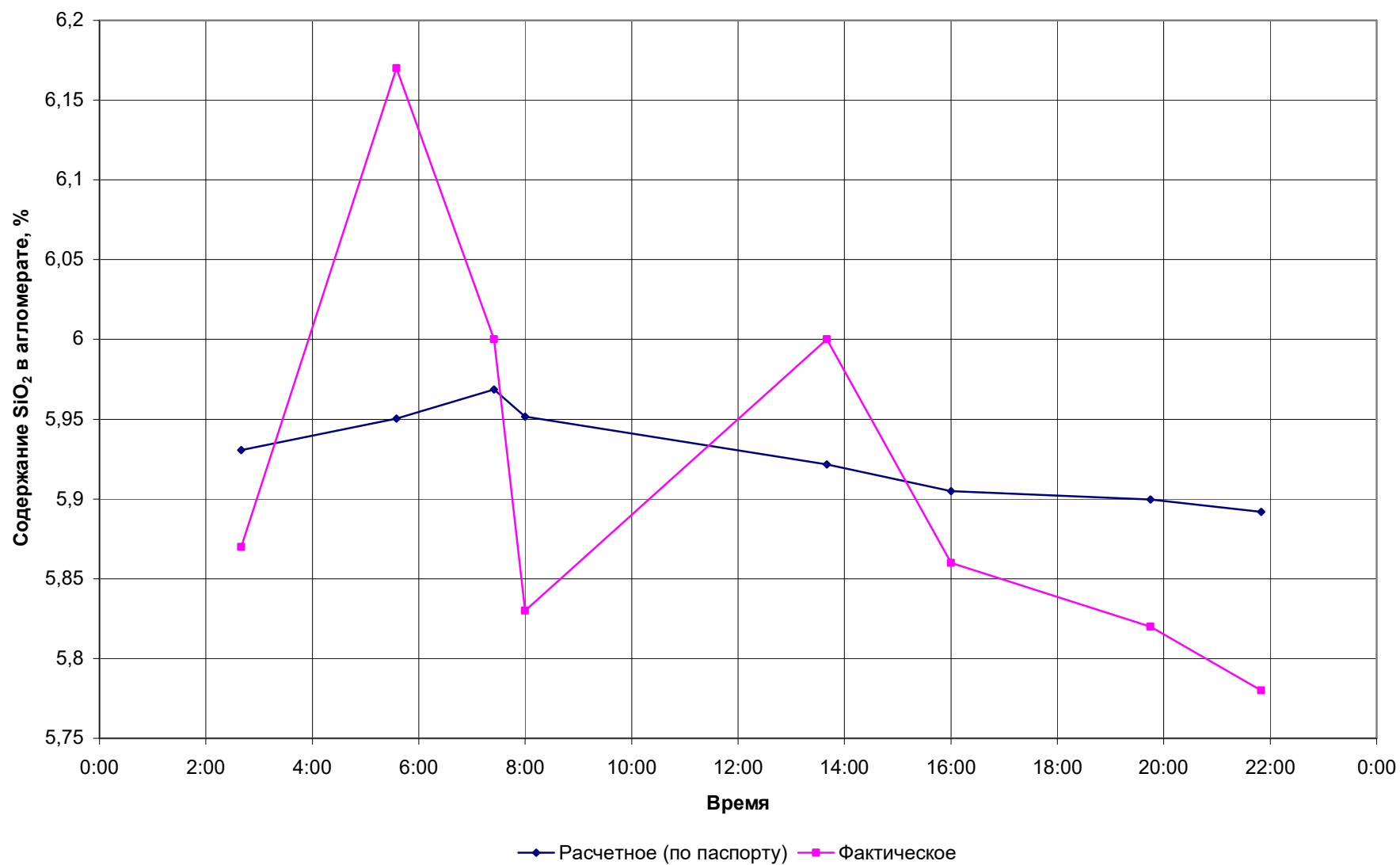


Рис. 3.17 Содержание оксида кремния в агломерате, рассчитанное по паспорту штабеля УУК за 9.10.08 г.

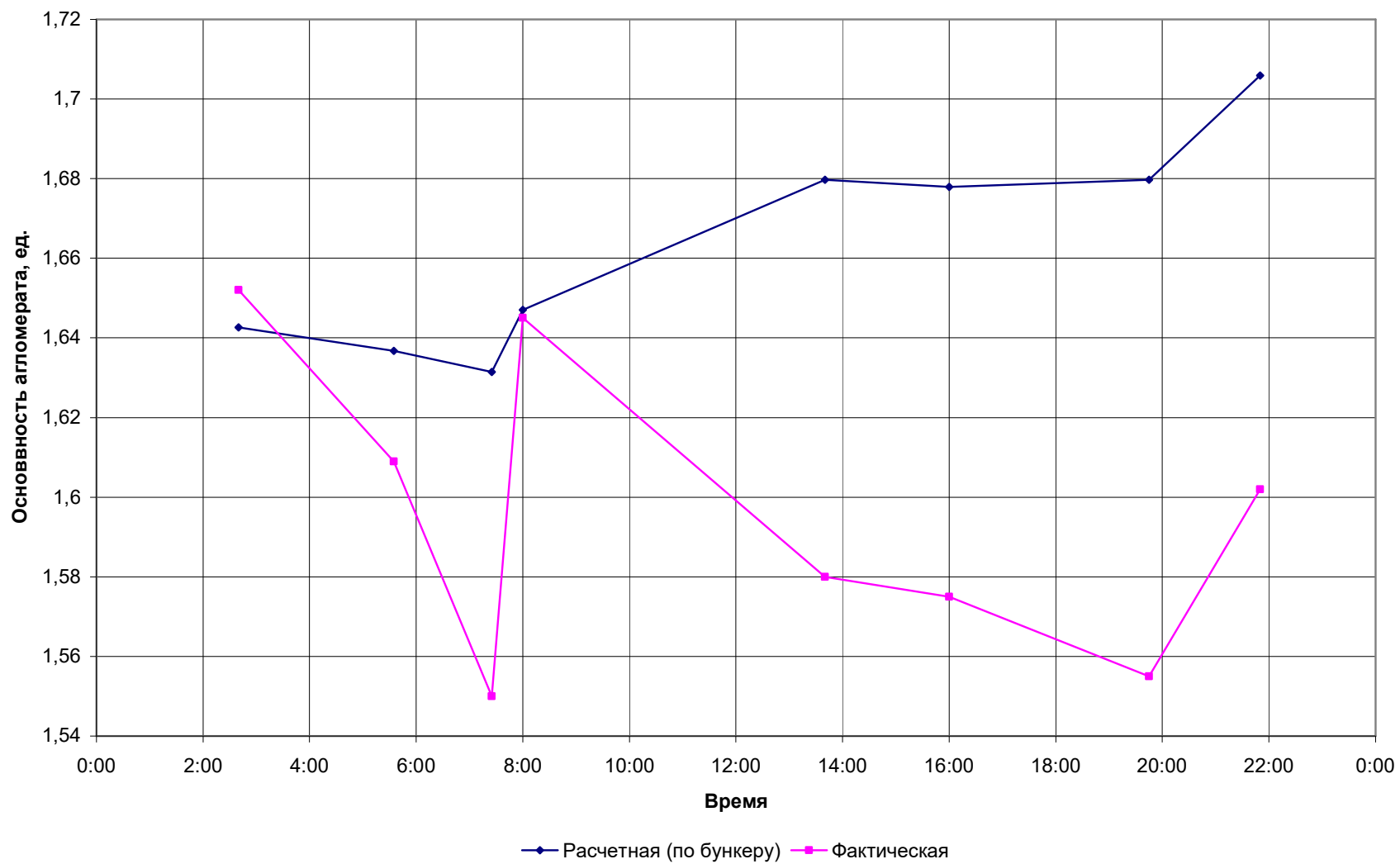


Рис. 3.18. Основность агломерата, рассчитанная по паспорту штабеля УУК за 9.10.

В качестве выхода из существующего положения было предложено провести промышленные испытания рентгенофлуоресцентного анализатора в качестве экспрессного метода контроля и регулирования процесса составления шихты.

По два экземпляра трех проб в виде сплавленных дисков были проанализированы на волнодисперсионном последовательном спектрометре S4 Pioneer фирмы Bruker AXS в комбинации с программным пакетом SPECTRA<sup>plus</sup>.

В табл. 3.7 представлены результаты РФА проб ЖРС.

Таблица 3.7

Результаты анализа проб ЖРС методом РФА

№ пробы	Массовая доля компонента, %					Основность, ед.
	Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	Mg	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
27 (основная)	60,4	5,00	3,60	1,47	1,73	0,72
27 (арбитражная)	58,9	5,18	3,93	1,43	1,68	0,76
71 (основная)	59,8	5,79	3,72	1,50	1,85	0,64
71 (арбитражная)	59,2	5,65	3,72	1,49	1,95	0,66
73 (основная)	59,4	5,66	3,98	1,55	1,86	0,69
73 (арбитражная)	60,7	5,09	3,61	1,65	1,75	0,71

Как видно из таблицы, имеются существенные различия по содержанию железа в основной пробе и арбитражной пробе и небольшие различия по содержанию других компонентов. Это свидетельствует о том, что проанализированные пробы неrepresentative.

Для оценки воспроизводимости был проанализирован 2 раза один и тот же образец ЖРС (проба № 27 арбитражная). Результаты измерений образца представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8.

Оценка воспроизводимости спектрометра

Проба	Компонент, %					Основность CaO/SiO <sub>2</sub>
	Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Анализ №1	58,7	5,29	3,93	1,51	1,51	0,74
Анализ №2	58,9	5,18	3,93	1,43	1,68	0,76

Спектрометр хорошо воспроизводит результаты. Небольшие различия результатов, вероятно, связаны с шероховатостью поверхности пробы, так как интенсивность линии вторичного спектра зависит от качества поверхности излучателя.

Для изучения зависимости рентгеновского возбуждения от кристаллохимического состава ЖРС проанализировали образцы оксидов железа разного фазового состава (50 % Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и 50 % FeO; 50 % Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и 50 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Считается, что различие в кристаллохимическом составе проб может привести к различному положению линий в спектре рентгеновской флуоресценции. В случае железа это возможно, но только для линии Fe K $\beta$ . В нашей работе определение железа проводили по линии Fe K $\alpha$ , а эта линия к различию кристаллохимического состава не чувствительна. На рис. 3.19 показаны спектральные линии Fe K $\alpha$ , измеренные на двух пробах различного фазового состава.

Как видно из рисунка, положение спектральных линий одинаково, а различия по интенсивности обусловлены различным содержанием железа в пробах.



Полученные результаты позволяют сделать вывод о принципиальной возможности анализа ЖРС методом РФА. Никаких ограничений, связанных именно с методом анализа, не обнаружено.

Все проблемы, связанные с анализом ЖРС, сводятся к получению представительной пробы материала.

В ПАО «ММК» состав проб ЖРС определялся с помощью анализатора CRM-25 по методике, изложенной в стандарте предприятия (НДП 02.06.81-2005) и титриметическим дихроматным методом согласно НДП 01.05.06.65-2004. В табл. 3.9 приведены данные титриметрии по составу проб ЖРС Центральной лаборатории комбината (ЦЛК) ПАО «ММК».

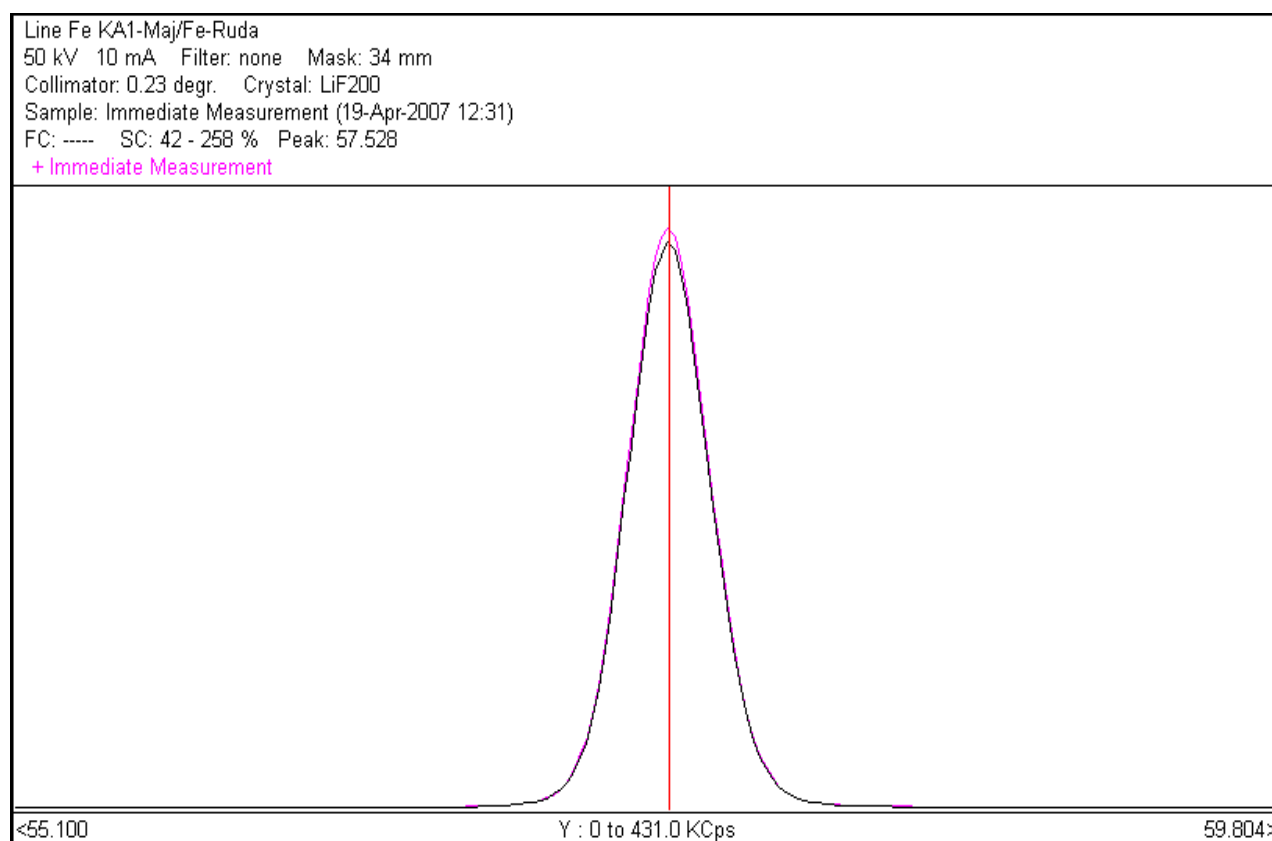


Рис. 3.19 – Спектральные линии Fe K $\alpha$ , измеренные на двух пробах различного фазового состава

Результаты анализа проб ЖРС методом титриметрии

№ пробы	Массовая доля компонента, %					Основность, ед.
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Cr	Fe	
27	1,43	3,68	3,27	0,011	62,7	0,89
28	1,38	3,31	3,25	0,010	63,0	0,98
33	1,58	4,60	3,15	0,016	62,1	0,68
34	1,63	4,46	3,00	0,018	62,5	0,67
55	1,42	3,80	3,40	0,010	62,6	0,89
57	1,64	4,81	4,00	0,017	60,5	0,83
59	1,40	3,80	3,66	0,014	60,3	0,96
71	1,80	5,20	3,24	0,012	61,4	0,68
73	1,76	5,32	3,88	0,015	59,5	0,73
75	1,58	4,81	3,46	0,011	61,6	0,72

Методом титриметрии также анализировались пробы в лаборатории ФГБОУ ВО МГТУ им. Носова по НДП 01.05.06.65-2004 (см. рис. 3.20).

На рис. 3.20 изображено содержание железа (общего) в пробах ЖРС, определенное различными методами [3.17].

Проведена статистическая обработка результатов анализа по выявлению грубых ошибок (см. табл. 3.10). Все результаты, попадают в доверительный интервал.

Проведенные предварительные исследования показали возможность проведения промышленных испытаний. Испытания проводились на поточном анализаторе CON-X 2, установленным над конвейером аглошихты.

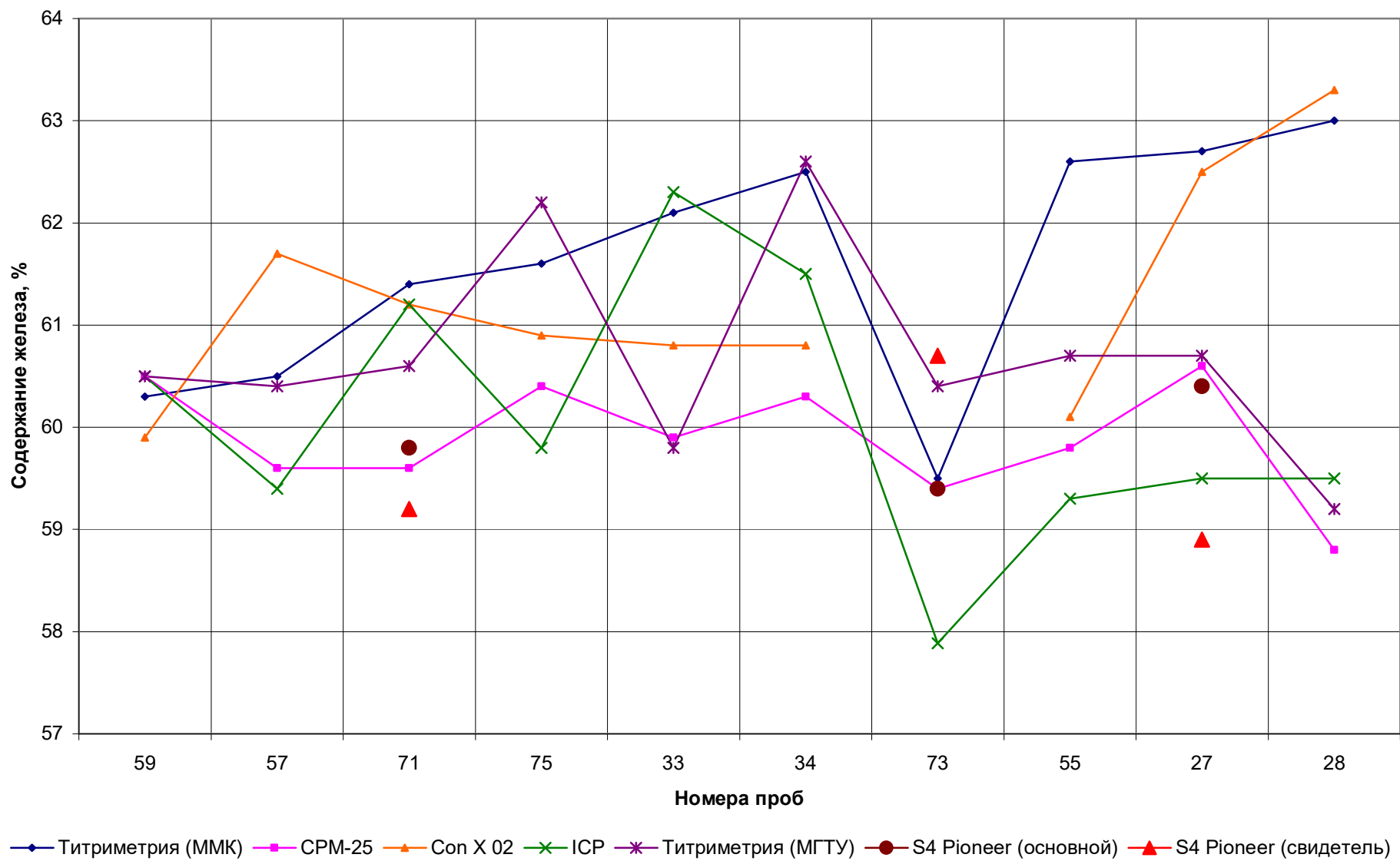


Рис. 3.20 Содержание железа в ЖРС, определенное различными методами

Таблица 3.10

## Результаты расчетов погрешности определения железа

№ пробы	Методы анализа							Расчёт погрешности результатов определения					Интервал с вероятностью 0,95
	ICP	РФА				Титриметрия		Среднее значение	n	Дисперсия	Стандартное отклонение	Относительное стандартное отклонение	
		S4 Pioneer (основной)	S4 Pioneer (свидетель)	СРМ	CON X 02	ММК	МГТУ						
59	60,5			60,5	59,9	60,3	60,5	60,45	4	0,010	0,1000	0,0017	60,45 ± 0,159
57	59,4			59,6	61,7	60,5	60,4	60,32	5	0,827	0,9094	0,0151	60,32 ± 1,131
71	61,2	59,8	59,2	59,6	61,2	61,4	60,6	60,43	7	0,792	0,8902	0,0147	60,43 ± 0,824
75	59,8			60,4	60,9	61,6	62,2	60,98	5	0,902	0,9497	0,0156	60,98 ± 1,181
33	62,3			59,9	60,8	62,1	59,8	60,98	5	1,397	1,1819	0,0194	60,98 ± 1,469
34	61,5			60,3	60,8	62,5	62,6	61,54	5	1,033	1,0164	0,0165	61,54 ± 1,264
73	57,9	59,4	60,7	59,4		59,5	60,4	59,55	6	0,972	0,9860	0,0166	59,55 ± 1,035
55	59,3			59,8	60,1	62,6	60,7	60,50	5	1,635	1,2787	0,0211	60,50 ± 1,590
27	59,5	60,4	58,9	60,6	62,5	62,7	60,7	60,76	7	1,999	1,4140	0,0233	60,76 ± 1,309
28	59,5			58,8	63,3	63,0	59,2	60,76	5	4,833	2,1984	0,0362	60,76 ± 2,733

Отбор проб для лабораторных исследований производили исходя из требований НПД 01.05.06.65-2004 и НПД 02.06.81-2005. Общую пробу массой 4-5 кг сокращали до 1 кг. Из сокращенной пробы отбирали аналитическую пробу, химический состав которой определяли в ЦЛК ОАО «ММК». Результаты приведены в табл. 3.11. Из оставшейся части материала формировали пробу для лабораторных исследований массой 500 г.

Таблица 3.11

Состав ЖРС

№ пробы	Содержание компонентов, %				
	Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr
27	62,7	3,68	3,27	1,43	0,011
28	63,0	3,31	3,25	1,38	0,010
33	62,1	4,60	3,15	1,58	0,016
34	62,5	4,46	3,00	1,63	0,018
55	62,6	3,80	3,40	1,42	0,010
57	60,5	4,81	4,00	1,64	0,017
59	60,3	3,80	3,66	1,40	0,014
71	61,4	5,20	3,24	1,80	0,012
73	59,5	5,32	3,88	1,76	0,015
75	61,6	4,81	3,46	1,58	0,011

Для определения наиболее эффективного режима возбуждения была использована проба № 27. Регистрировали спектры рентгеновской флуоресценции данной пробы, изменяя ток и напряжение рентгеновской трубки, используя разные фильтры и материал анода мишени (Mo и Rh).

Выявить спектральные линии интересующих легких элементов (Al и Si) и определить их концентрации не удалось, в связи с тем, что определяемые концентрации слишком малы, и эффект абсорбции подавляет вторичную, отражённую и регистрируемую энергию этих элементов.

В анализируемых пробах удалось обнаружить присутствие следующих элементов: кальций (Ca), титан (Ti), ванадий (V), хром (Cr), марганец (Mn), железо (Fe), никель (Ni), медь (Cu), цинк (Zn). Однако в движущемся потоке можно определить концентрации только Ca, Mn, Fe и Zn. Затруднения при опреде-

лении концентраций титана и хрома связаны с наложением их спектральных линий  $K\alpha$  на спектральную линию  $Fe K\alpha$ .

Интересующий участок спектра пробы № 27 отображен на рисунке 3.21. Данный вид спектра характерен для всех образцов.

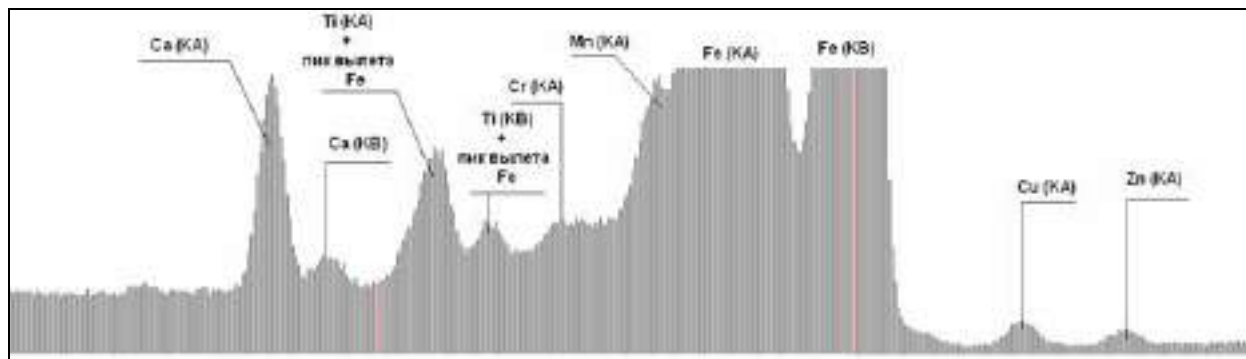


Рис. 3.21 Часть спектра пробы № 27.

По зарегистрированному спектру были рассчитаны следующие характеристики: предел обнаружения (ПО), точность  $\sigma$  и чувствительность  $\varepsilon$  анализа (см. табл. 3.12).

Предел обнаружения показывает минимальную концентрацию элемента, которая будет обнаружена в течение заданного времени измерения. Меньшая концентрация элемента не будет обнаружена из-за статистического шума.

$$\text{ПО} = \frac{3\sqrt{Sf}}{Sp} \cdot C, \quad (3.18)$$

где  $Sp$  – площадь пика;

$Sf$  – площадь фона под пиком;

$C$  – концентрация вещества.

Точность показывает максимально допустимую точность определения концентрации, которая могла бы быть теоретически достигнута. Точность анализа, достигаемая на практике всегда ниже.

$$\varepsilon = \frac{Sp}{t \cdot C}, \quad (3.19)$$

где  $t$  – время измерения.

Чувствительность показывает количество импульсов от данной спектральной линии элемента, считаемого датчиком в секунду, на процент концентрации

данного элемента. Чувствительность показывает также эффективность возбуждения этого элемента в заданных условиях.

$$\varepsilon = \frac{Sp}{t \cdot C}. \quad (3.20)$$

Таблица 3.12

Пределы обнаружения и точность анализа

Статистические параметры	РТ с Mo мишенью		РТ с Rh мишенью	
	Ca	Fe	Ca	Fe
ПО, %	2,34	0,01	0,04	0,01
$\sigma$ , отн. %	0,77	0,03	1,00	0,04
$\varepsilon$ , имп./с/%	30,38	246,98	39,38	310,69

Как видно из табл. 3.12, лучшие результаты обеспечивает режим возбуждения рентгеновской трубки с анодом из молибдена. Данный режим выбран для анализа ЖРС в дальнейшем.

Аппаратная погрешность определения железа составила 0,03 отн. %, а кальция – 0,77 отн. % или при переходе к абсолютным значениям  $\pm 0,02$  % и  $\pm 0,023$  % соответственно.

Для проведения градуировки спектрометра были использованы три пробы ЖРС, а остальные – для удостоверения правильности расчёта метода. На рис. 3.22. и 3.23. показаны градуировочные характеристики прибора по железу и кальцию соответственно.

Для градуировки спектрометра по железу использовались пробы № 27, 57 и 71, по кальцию - № 34, 57 и 59.

Как видно из рисунков, графики представляют собой практически линейную зависимость. Величина достоверности аппроксимации составила 0,997 и 0,987 для железа и кальция соответственно, что доказывает высокую работоспособность метода для определения концентрации этих элементов.

Для определения чувствительности прибора к содержанию железа были подобраны несколько образцов, в которых содержание железа меняется от

минимального (59,5 %) до максимального (62,7 %). На рис. 3.24. приведён сравнительный набор спектров проб № 27, № 71 и № 73.

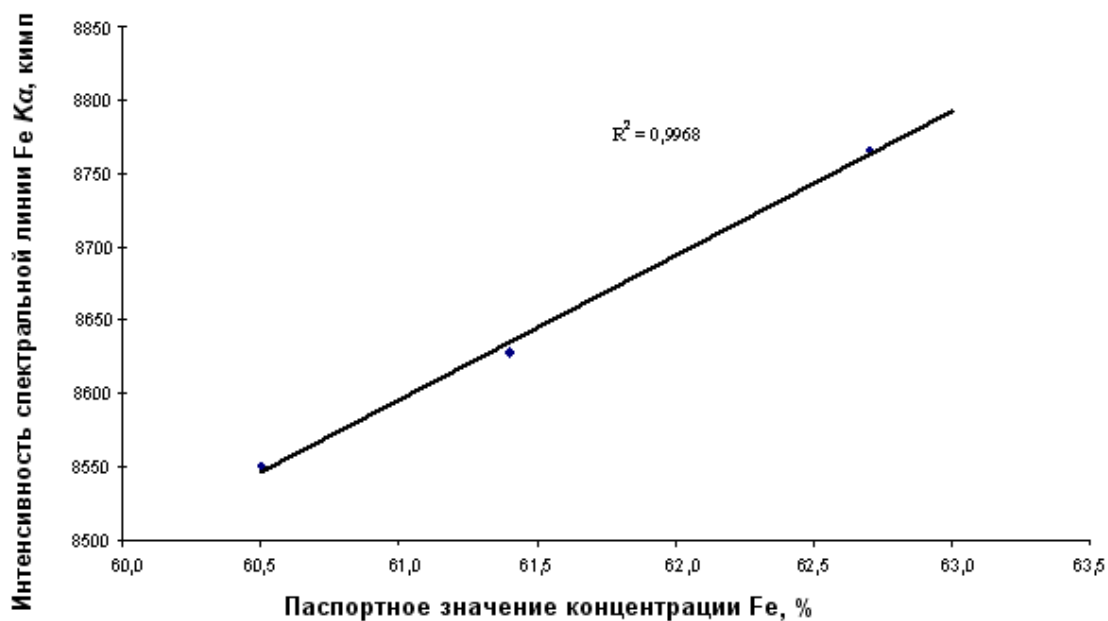


Рис. 3.22. – Градуировочная характеристика спектрометра CON X 02 по железу.

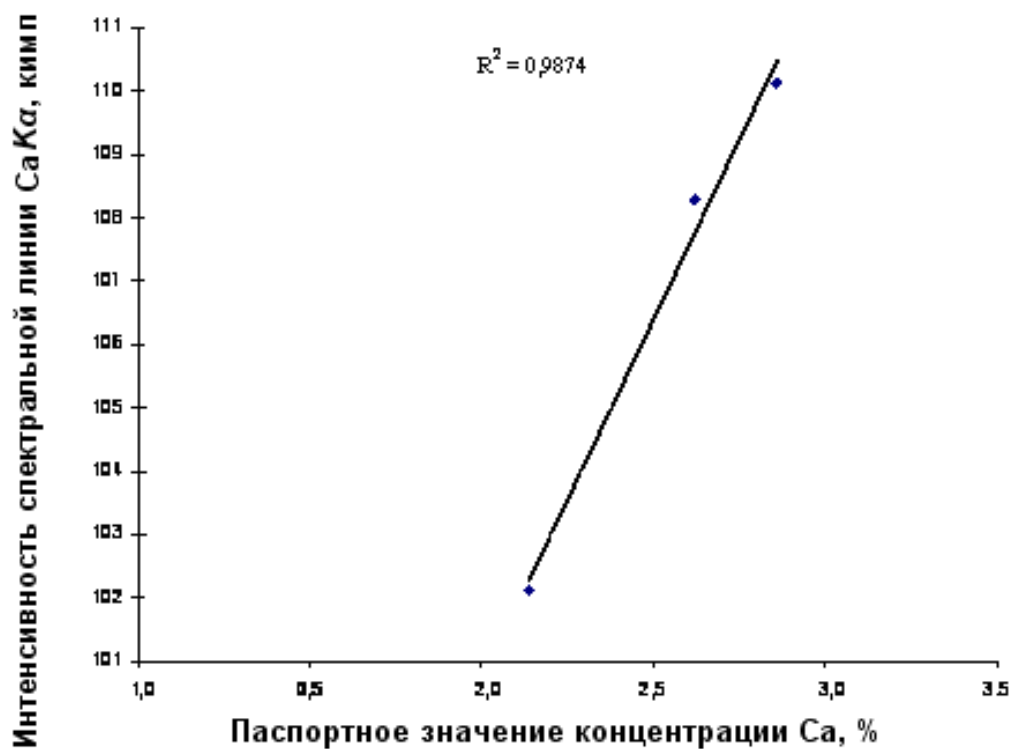


Рис. 3.23 – Градуировочная характеристика спектрометра CON X 02 по кальцию.



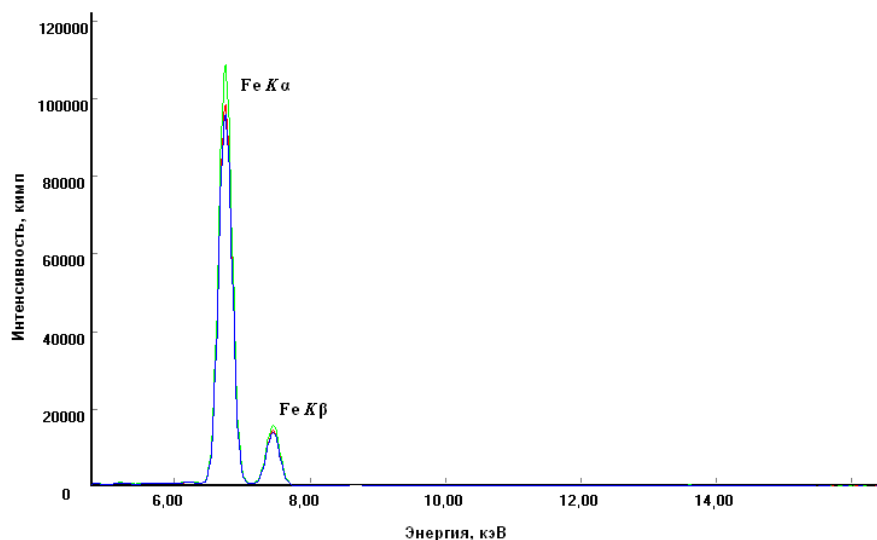


Рис. 3.24 – Сравнение спектральных линий Fe  $K\alpha$  и Fe  $K\beta$  для различных образцов: синяя кривая – образец № 73, красная кривая – образец № 71, зелёная кривая – образец № 27.

Графически видна чувствительность анализа к содержанию железа в заданных образцах.

В результате лабораторных исследований было установлено:

Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр CON X 02 способен определять в стационарных условиях концентрацию железа в ЖРС с погрешностью 0,153 % и кальция с погрешностью 0,07 %.

Выбранный прибор демонстрирует достаточно высокую стабильность, воспроизводимость результатов и чувствительность при анализе проб ЖРС.

Спектрометр не в состоянии определить наличие легких элементов (Al, Si) в связи с тем, что определяемые концентрации слишком малы и эффект абсорбции подавляет регистрируемую энергию этих элементов.

По зарегистрированным спектрам видно, что в пробах содержатся титан, марганец, медь и цинк. Определение концентраций этих элементов затруднено по разным причинам, например, определение концентрации титана затруднено из-за наложения его спектральных линий и спектральных линий железа.

Спектрометр отградуирован для определения железа в диапазоне от 59,5 до 63 % и кальция в диапазоне от 3 до 4,5 %.

Перед началом промышленных испытаний прибор был подвешен над конвейером № 703, используя стационарную подвеску, впереди спектрометра было установлено разравнивающее устройство для формирования постоянной высоты слоя ЖРС, была смонтирована кабельная линия связи между рентгенофлуоресцентным спектрометром и рабочей станцией, выполненной на основе персонального компьютера (ПК), установленной в дозировочной.

За три часа непрерывной работы анализатора с его помощью было произведено 20 измерений. Из массы материала, проанализированной рентгенофлуоресцентным методом, были отобраны пробы для химического анализа. Результаты определения железа, оксида кальция и основности ЖРС двумя способами приведены на рис. 3.25-3.27.

В табл. 3.13 указаны среднеквадратические отклонения содержания компонентов в ЖРС, определенных с помощью РФА и химического анализа.

Различие результатов объясняется большой неоднородностью ЖРС и несовершенством отбора пробы, химический состав отдельно взятой пробы отличается от усредненного состава материала.

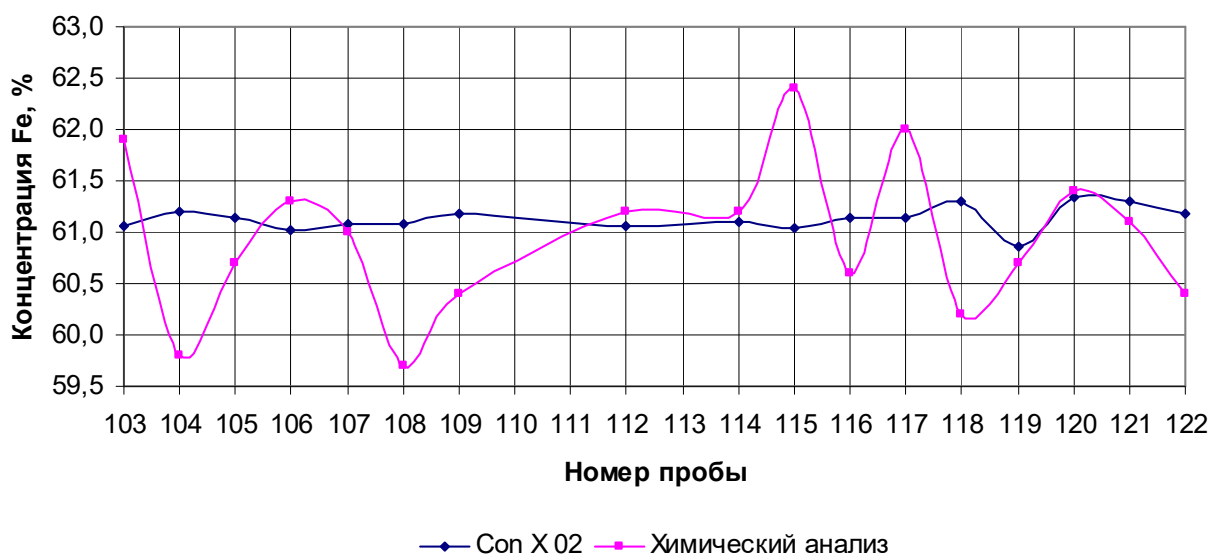


Рис. 3.25. Сравнение результатов определения содержания железа в ЖРС с помощью спектрометра РФА CON-X 02 при его промышленном опробовании и химического анализа

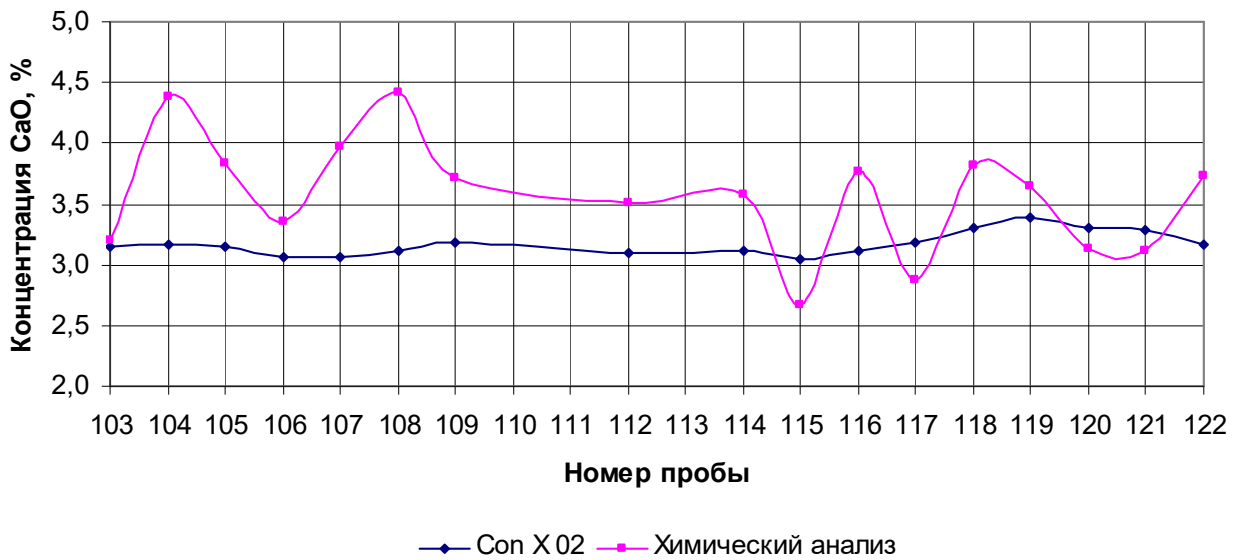


Рис. 3.26. Сравнение результатов определения содержания оксида кальция в ЖРС с помощью спектрометра РФА CON–Х 02 при его промышленном опробовании и химического анализа

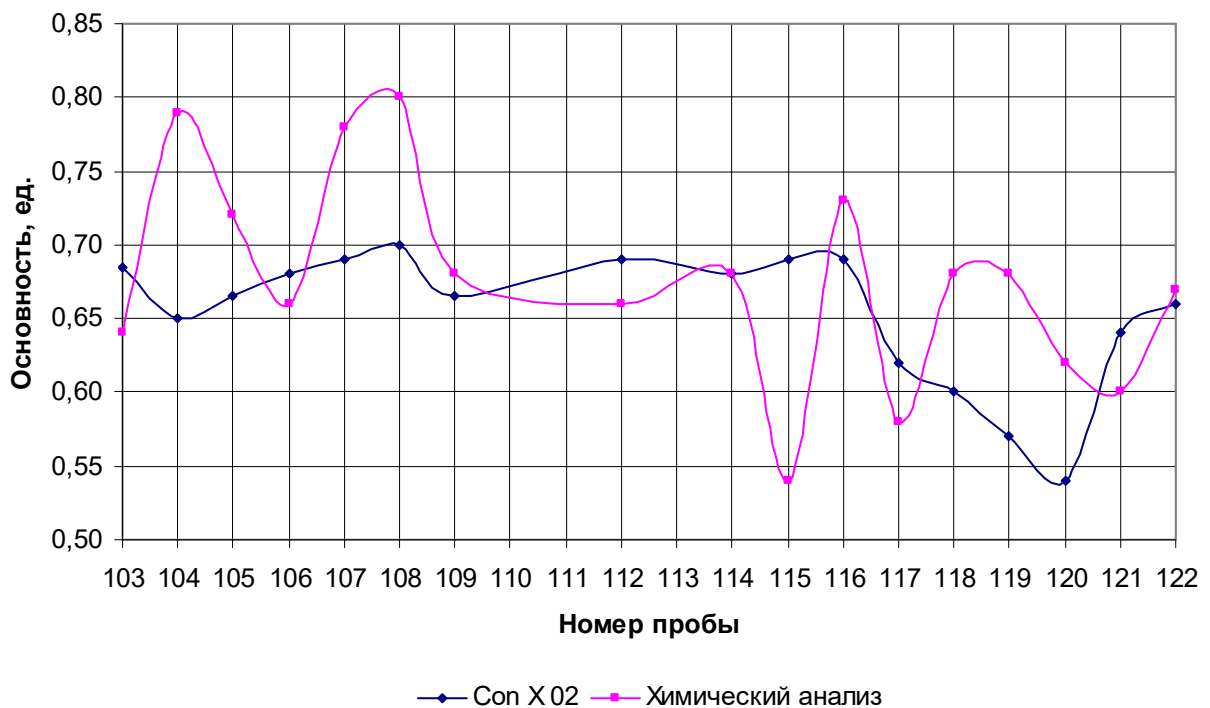


Рис. 3.27. – Сравнение результатов определения основности ЖРС с помощью спектрометра РФА CON–Х 02 при его промышленном опробовании и химического анализа

Таблица 3.13.

Различие средних значений концентраций, полученных с помощью спектрометра CON-X 02 и химического анализа

Компонент	Спектрометр CON-X 02		Химический анализ		Разность средних значений, %
	Среднее, %	СКО	Среднее, %	СКО	
Fe	61,13	0,11	60,95	0,73	0,18
CaO	3,17	0,89	3,57	0,45	0,40
Основность	0,657	0,0431	0,677	0,0667	0,020

При работе спектрометра со стационарной подвеской в производственных условиях были выявлены неблагоприятные факторы, влияющие на его работу:

- широкий диапазон колебаний рудной нагрузки конвейера приводит к изменению высоты слоя анализируемого материала и, как следствие, к увеличению погрешности измерений;
- при увеличении нагрузки конвейера более 350 кг/с наблюдается засыпание прибора рудной смесью;
- прохождение по конвейеру негабаритных предметов представляет угрозу целостности детектора.

Для улучшения надежности работы прибора и повышения точности экспрессного определения состава транспортируемого материала разработан Производственно-аналитический комплекс (ПАК) [3.18 – 3.19].

ПАК состоит из следующих частей:

- энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр;
- плавающая подвеска анализатора с системой защиты от ударов;
- автоматизированный механический пробоотборник;

- автоматическое рабочее место (АРМ) расчёта среднего химического состава материала, поступающего в бункера;
- математическая модель управления весовыми дозаторами.

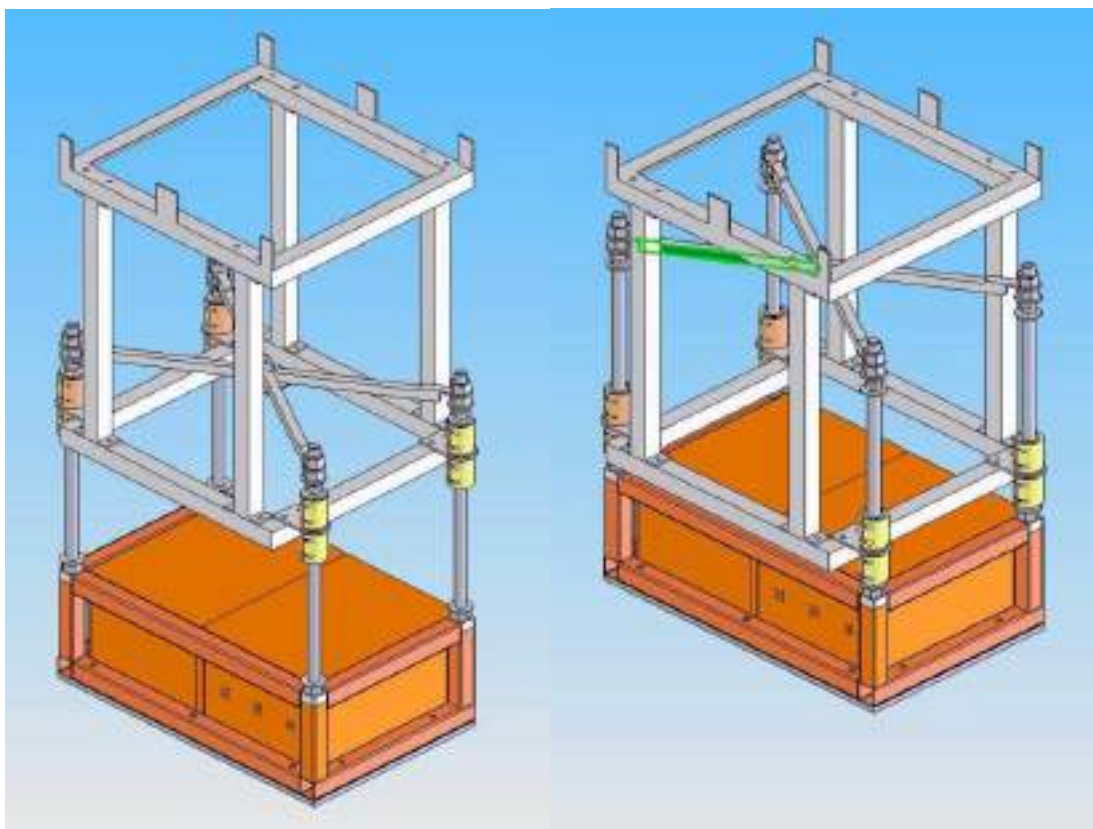
Спектрометр располагается непосредственно над конвейером, транспортирующим железорудную смесь к бункерам. Расстояние между детектором и слоем ЖРС составляет 50 мм. Анализ осуществляется без отбора проб.

Во время измерений данные обрабатываются микропроцессором и сохраняются в памяти спектрометра, затем передаются на АРМ.

Спектрометр снабжен лыжеобразной салазкой, скользящей по поверхности слоя материала, которая имеет прорезь для контакта рентгеновского луча с анализируемым объектом. Основное назначение «лыжи» заключается в обеспечении постоянного расстояния между детектором спектрометра и поверхностью анализируемого объекта.

Плавающая подвеска спектрометра (см. рис. 3.28) обеспечивает защиту прибора от механических повреждений при резких изменениях потока материалов на конвейере и при попадании посторонних предметов на ленту конвейера. За 30 м до спектрометра установлены «флажки» с датчиками уровня. При превышении допустимой высоты слоя поступает сигнал на исполнительный механизм, который перемещает спектрометр в верхнее положение (см. рис. 3.28 а). Таким образом, крупный материал проходит под спектрометром, не повреждая его.

Механический пробоотборник используется при градуировке и поверке спектрометра. По мере необходимости с его помощью набирается накопительная проба железорудной смеси, которая анализируется в химической лаборатории по методике разработанной во второй главе. Результаты анализа используют для подбора поправочных коэффициентов.



а)

б)

Рис. 3.28 – Плавающая подвеска спектрометра:

а) в основном положении, б) в поднятом положении

Алгоритм расчёта среднего химического состава складированного материала позволяет получать достоверные данные о составе заполненных материалом бункеров.

Используя данные, полученные спектрометром, с помощью математической модели рассчитывается расход флюса необходимого для агломерации в зависимости от химического состава поступившего материала.

В комнате дозировщика на мониторе компьютера отображаются данные, полученные спектрометром, результаты расчета среднего состава заполненных бункеров и рекомендация на расход флюса.

После интеграции ПАК в АСУ ТП регулирование расхода флюса будет происходить автоматически.

Работа ПАК была проверена в ходе промышленных испытаний с 14.08 по 14.09.2008 г. на аглофабрике № 4 ОАО «ММК». На рис. 3.29. показано расположение объектов ПАК.

Для контроля правильности показаний спектрометра и проведения его своевременной градуировки в ходе испытаний отбирали пробы ЖРС с конвейера Ш-1 с помощью автоматизированного пробоотборника. Каждые 6 минут путём пересечения потока ЖРС отсекалось до 300 г материала в сборную емкость. Накопленную таким образом за два часа пробу ссыпали в усреднительный барабан и перемешивали, вращая барабан не менее 40 раз. Перемешанную пробу ссыпали на металлический лист, квартовали, отправляли в лабораторию. Пробу для химического анализа предварительно измельчали на валковой дробилке ДЛВ 200x125, затем на дисковом истирателе ИДА-175.

Отбор проб агломерата и возврата производился с конвейеров Ш-3, 4 с помощью совка. Объём общей пробы, составленной из четырех разовых проб, достигал 40 кг. Методом квартования она сокращалась до 2 кг для дальнейшей подготовки на химический анализ.

Отбор проб материалов осуществлялся таким образом, чтобы пробы ЖРС соответствовали пробам полученного впоследствии из нее агломерата.

Отбор проб всех материалов и их подготовка на химический анализ осуществлялась согласно действующей на ОАО «ММК» технологической инструкции.

Подготовленные пробы исследуемых материалов анализировали в химической лаборатории согласно действующим на ОАО «ММК» нормативным документам. Определение массовой доли железа общего в ЖРС осуществляли титриметрическим дихроматным методом по НДП 01.05.06.65-2004, определение массовых долей оксидов кальция, кремния и магния во всех материалах и железа общего в возврате – рентгенофлуоресцентным методом по НДП 02.06.81-2005, определение массовой доли оксида железа (FeO) в возврате – титриметрическим дихроматным методом по НДП 01.05.06.110-2004.

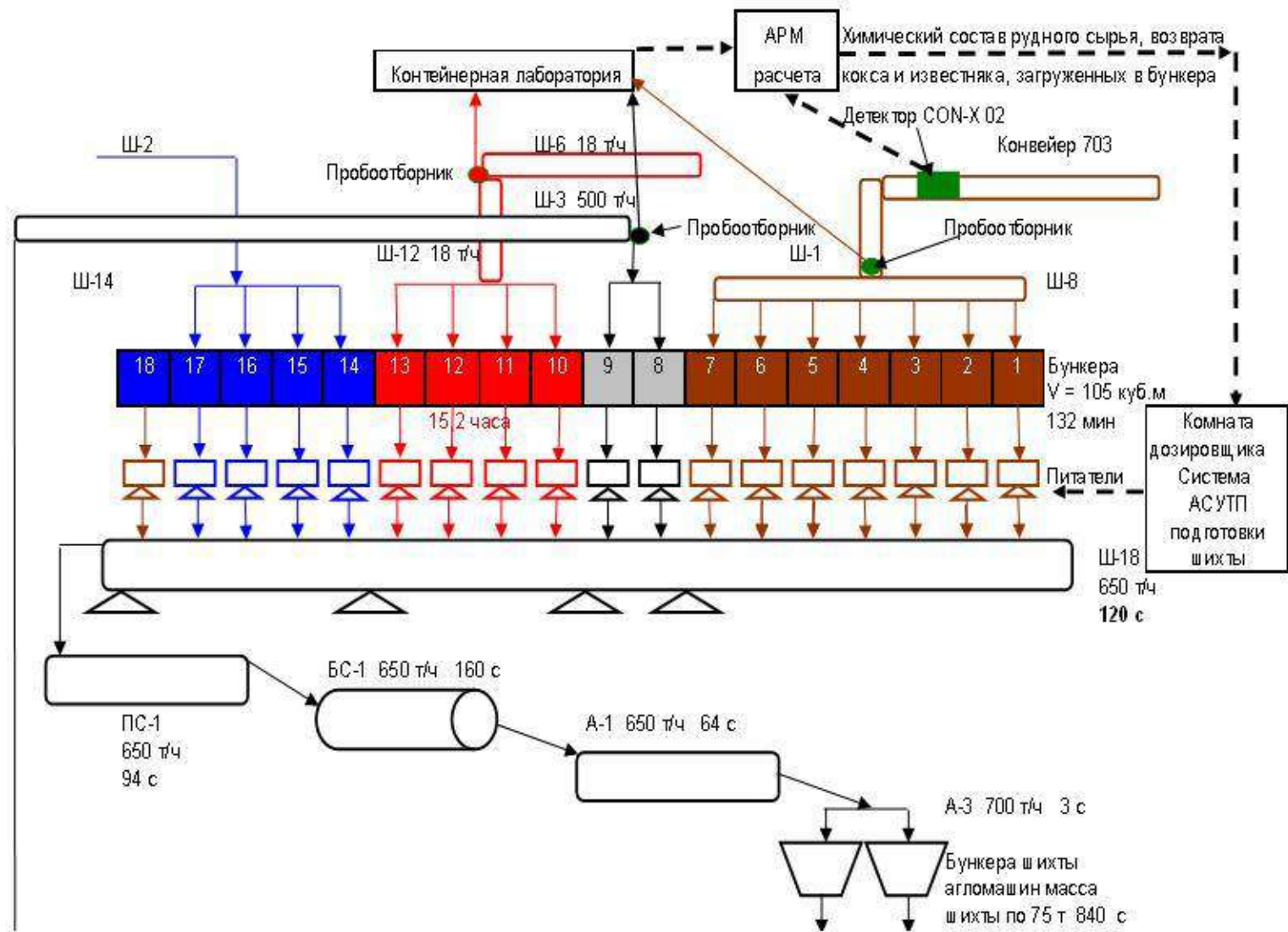


Рис. 3.29. Схема размещения объектов ПАК аглофабрике № 4 ОАО «ММК»



Показания прибора в составе ПАК усредняли каждые два часа.

На рис. 3.30 - 3.32 приведены результаты химического анализа проб ЖРС за весь период проведения испытаний и соответствующие им по времени показания спектрометра. На рис. 3.33 – 3.35 приведены среднесуточные значения содержания железа, оксида кальция и основности ЖРС за тот за период.

Как видно из графиков, среднесуточные значения результатов анализа намного лучше коррелируют между собой. Значительное расхождение значений двухчасовых проб и усреднённых двухчасовых показаний прибора объясняется меньшей представительностью первых, так как результаты анализа проб ЖРС отражают состав отобранного материала и лишь с определенной вероятностью характеризуют весь анализируемый объект, а показания прибора отображают средний состав прошедшего под ним материала.

До 24.08. имеет место систематическая ошибка, которая была уменьшена после градуировки спектрометра CON X 02.

Полученная информация позволяет определить химический состав выбираемых штабелей и сравнить с паспортными данными (см. рис. 3.35 -3.37). Паспортные значения содержания основных компонентов во всех случаях завышены по отношению к действительному их содержанию в штабеле СК, поэтому при дозировании флюса его расход будет занижен, что отрицательно скажется на точности получения агломерата заданного химического состава.

Для определения расхода известняка данные о его составе получали с участка технического контроля ЦЛК (УТК) ОАО «ММК» один раз в смену. Состав кокса в расчетах следующий (постоянный): CaO 0,7 %, SiO<sub>2</sub> 5,8 %, MgO 0,23 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3,13 %. Технический анализ кокса: зольность 13,5 %, сера 0,5 %, влага 12,5 %, выход летучих 0,6 %, углерод 85,4 %.

Для расчёта расхода известняка применяли методику, основанную не только на использовании данных о составе исходных материалов, но и учитывающую результаты анализа ранее испеченного агломерата. Методика направлена на уменьшение разницы между прогнозируемой и фактически

получаемой основностью агломерата за счет использования накопленной информации о составе возврата агломерата.

23.09. было получено несколько браков по основности агломерата. Из анализа следует, что реакция дозировщика на результаты анализа проб агломерата отобранных с 14:00 до 16:00 23.09. основностью 1,60 ед., некорректна. Увеличение расхода известняка с 111 до 119 г/кг руды, произведённая в 19:00 не учитывала реальную ситуацию. Показания ПАК свидетельствовали о том, что расход известняка должен был снизиться. Расчёт расхода известняка, произведённый по показаниям прибора, позволяет лучше реагировать на колебания состава ЖРС.

Рекомендуется следующая методика расчета флюса.

Расход флюса рассчитывается на основании усредненных за два часа показаний спектрометра по известной [3.21] формуле и корректируется при поступлении результатов химического анализа возврата полученного из этой порции аглошихты.

Если расчетный расход флюса отличается от фактического (за предыдущие два часа), то рассчитывается поправочный коэффициент

$$\alpha = \frac{G_{\text{флюса}}^{\text{факт}}}{G_{\text{флюса}}^{\text{расчетн.}}}, \quad (3.21)$$

а расход флюса остается  $G_{\text{флюса}}^{\text{факт}}$  (как в предыдущем периоде).

По окончании следующих двух часов ПАК выдает второй усредненный химический состав ЖРС, по которому рассчитывается  $G_{\text{флюса}_2}^{\text{теор}}$ . Фактический расход устанавливается по формуле

$$G_{\text{флюса}_2}^{\text{факт}} = G_{\text{флюса}_1}^{\text{факт}} + \left( \frac{-G_{\text{флюса}_1}^{\text{факт}} + G_{\text{флюса}_2}^{\text{теор}} \cdot \alpha_1}{2} \right) = (G_{\text{флюса}_1}^{\text{факт}} + G_{\text{флюса}_2}^{\text{теор}} \cdot \alpha_1) \cdot 0,5 \quad (3.22)$$

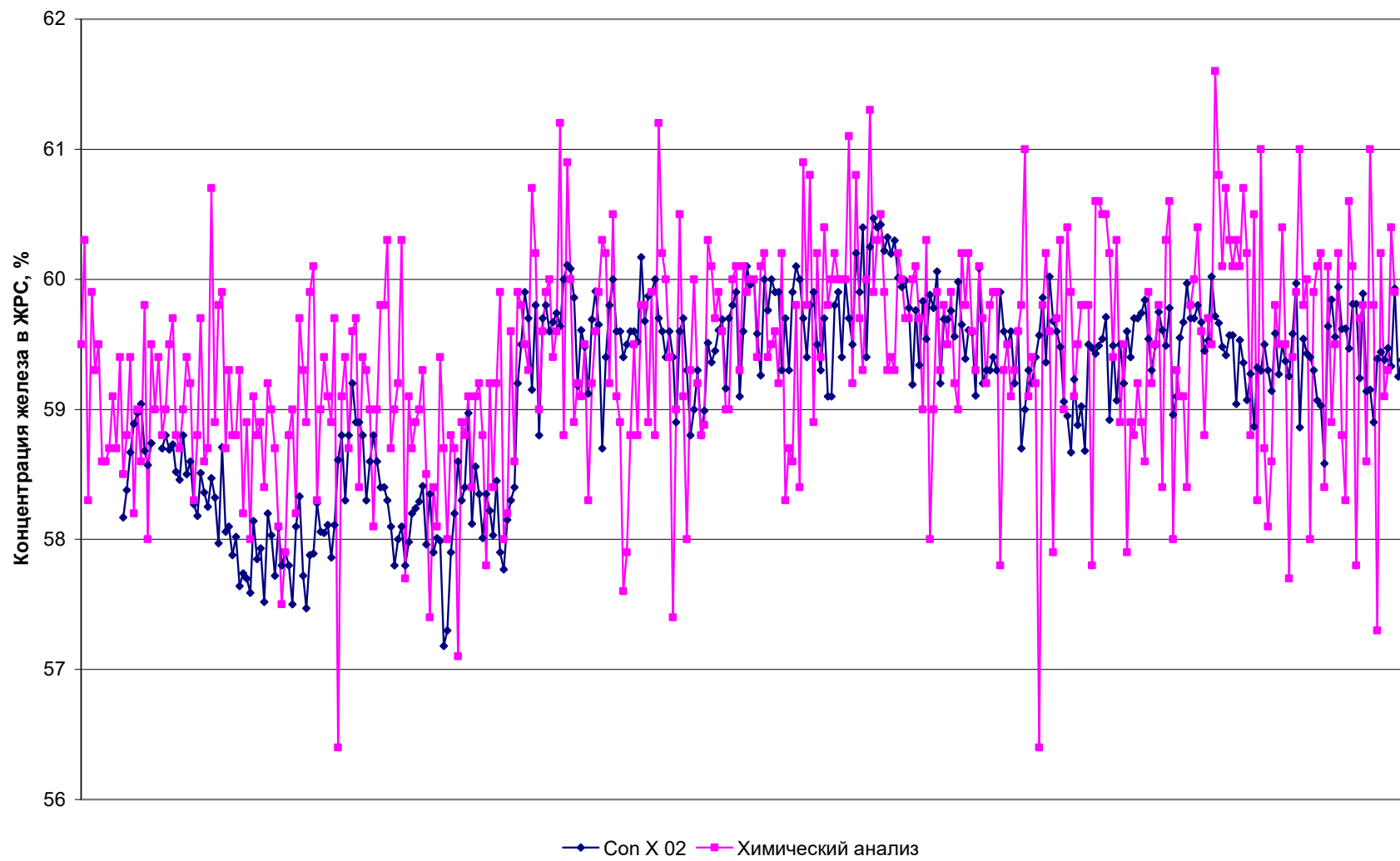


Рис. 3.30 – Концентрация железа в ЖРС за период с 14.08. по 14.09.

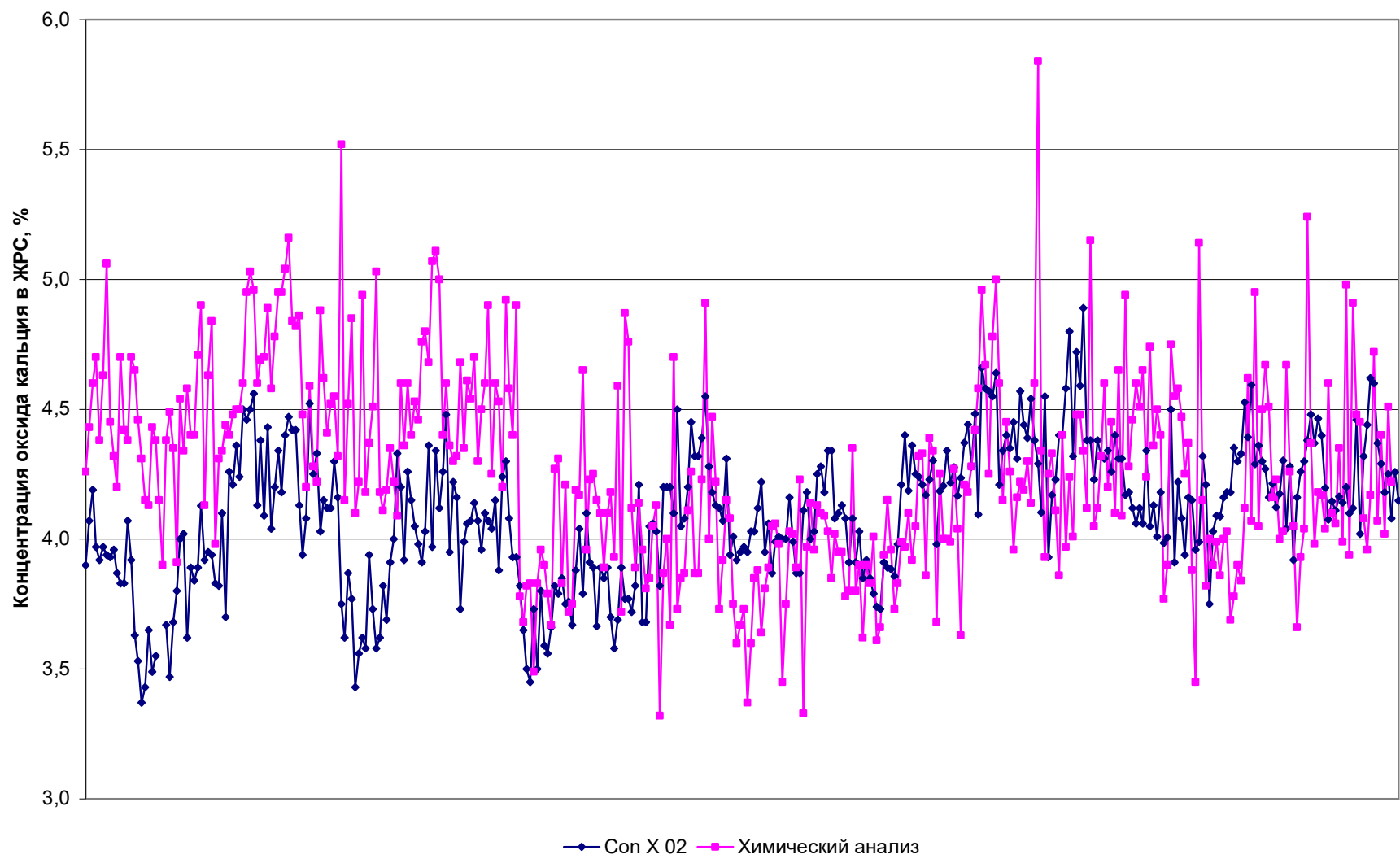


Рис. 3.31 – Концентрация оксида кальция в ЖРС за период с 14.08. по 14.09.

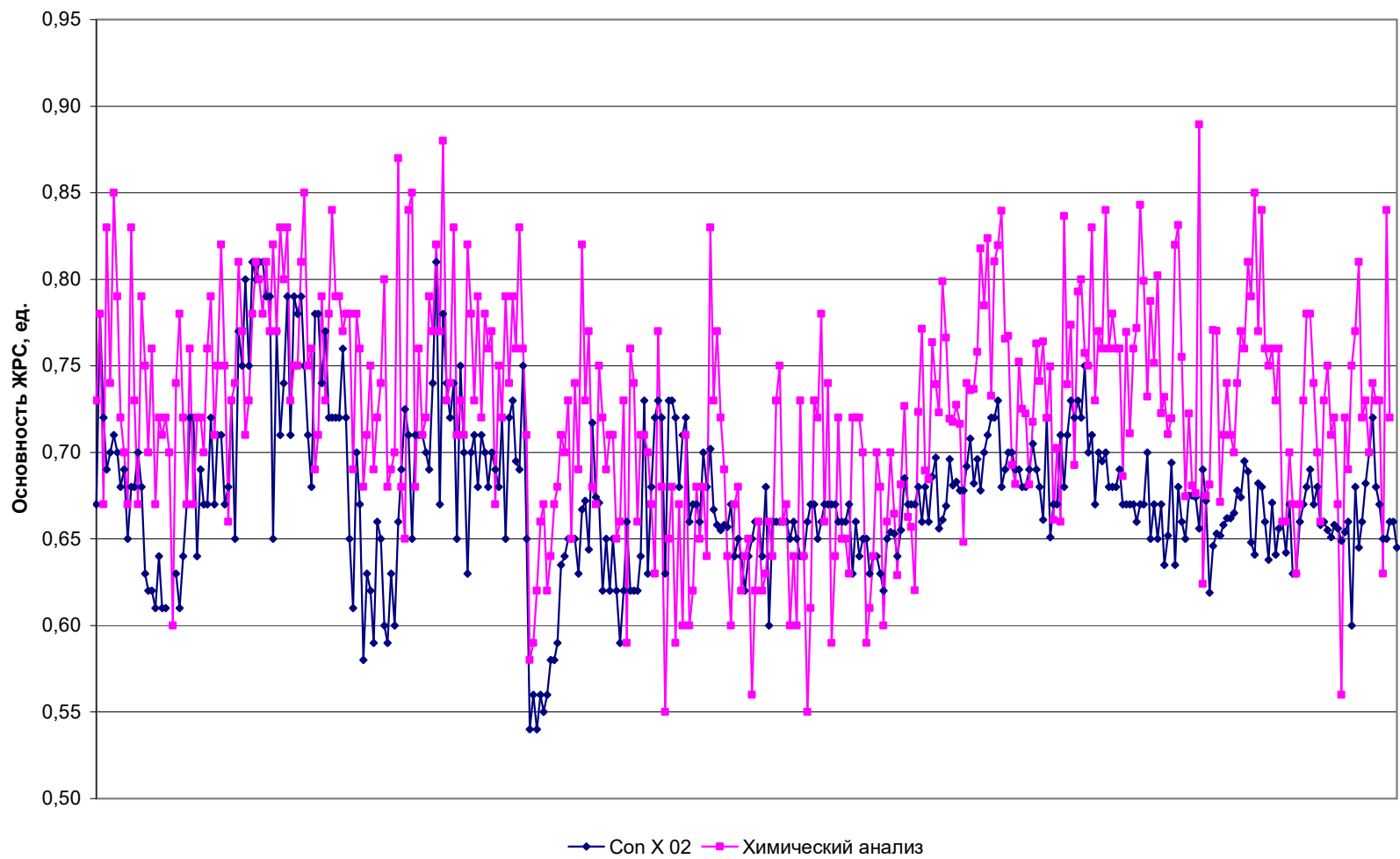


Рис. 3.32 –Основность ЖРС за период с 14.08. по 14.09.

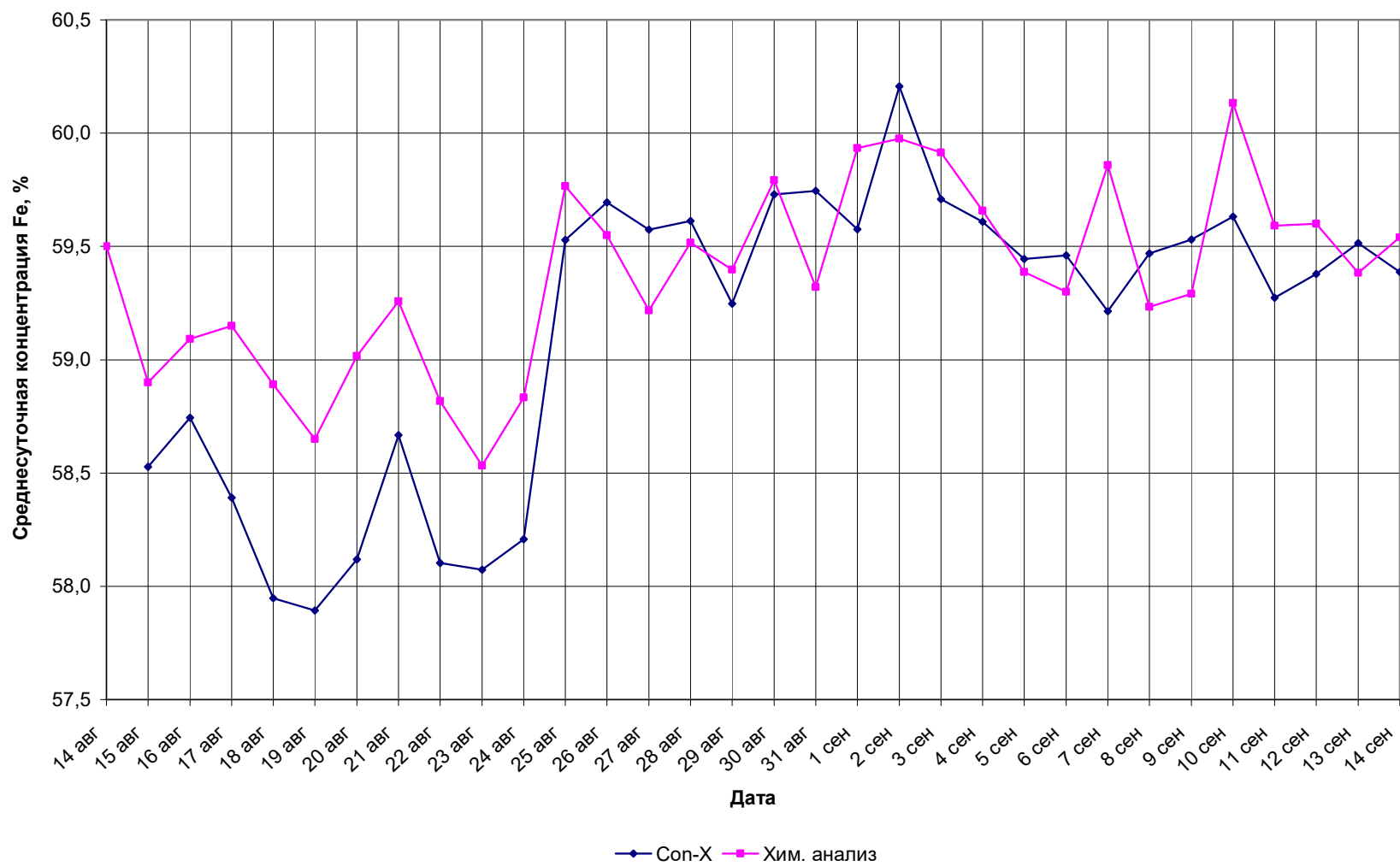


Рис. 3.33 – Среднесуточная концентрация железа в ЖРС

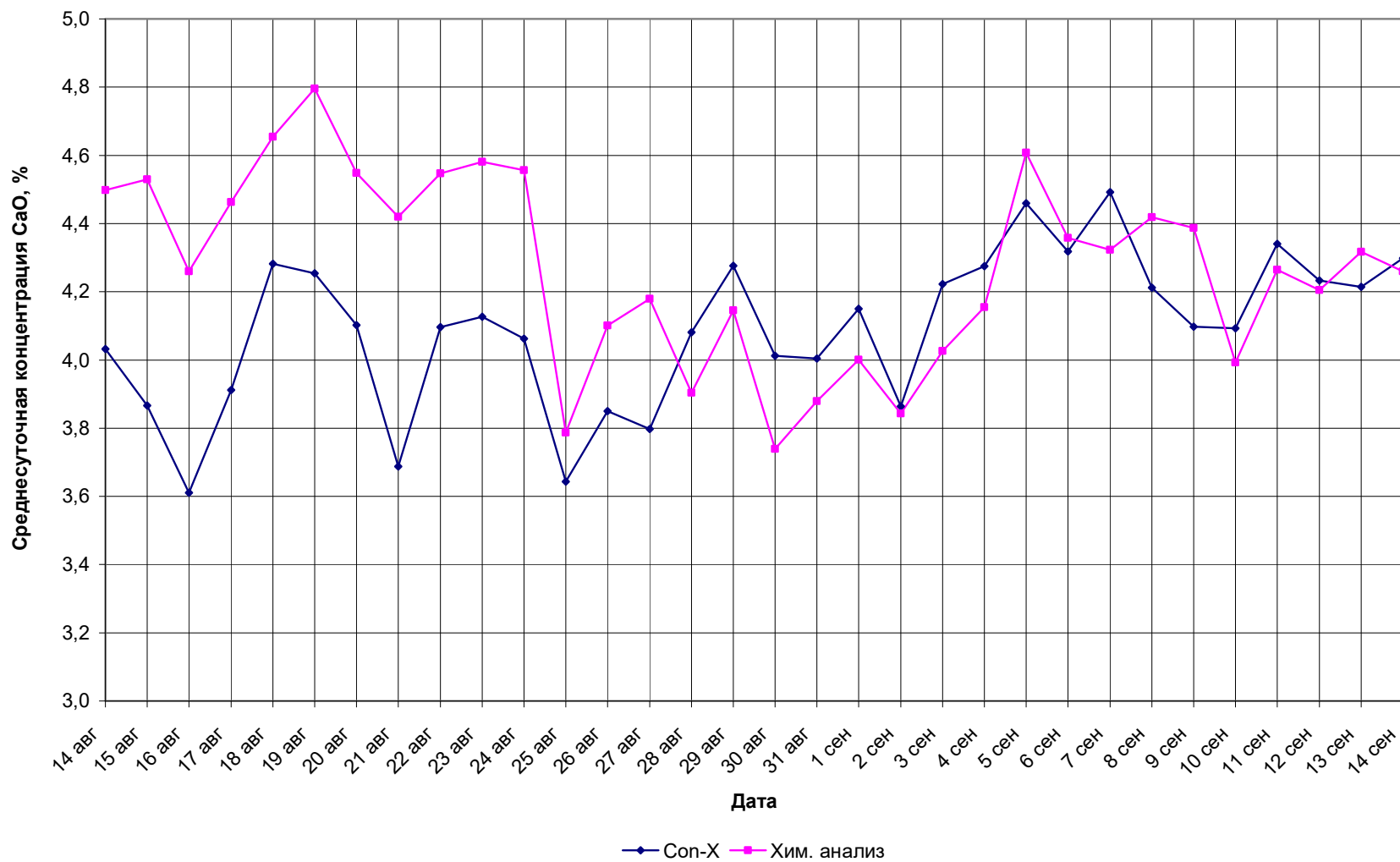


Рис. 3.34 – Среднесуточная концентрация оксида кальция в ЖРС

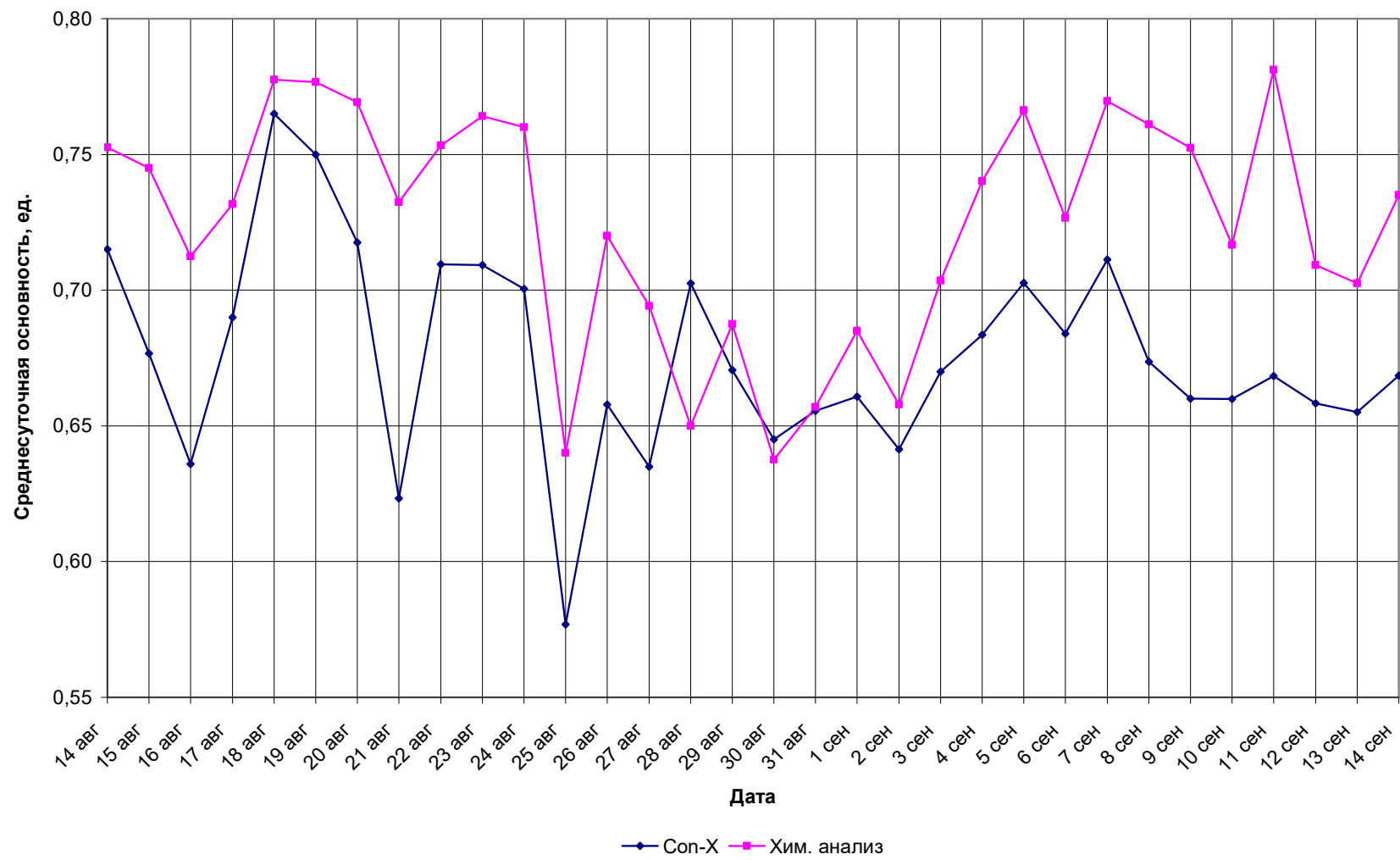


Рис. 4.17. – 3.35 - Среднесуточная основность ЖРС



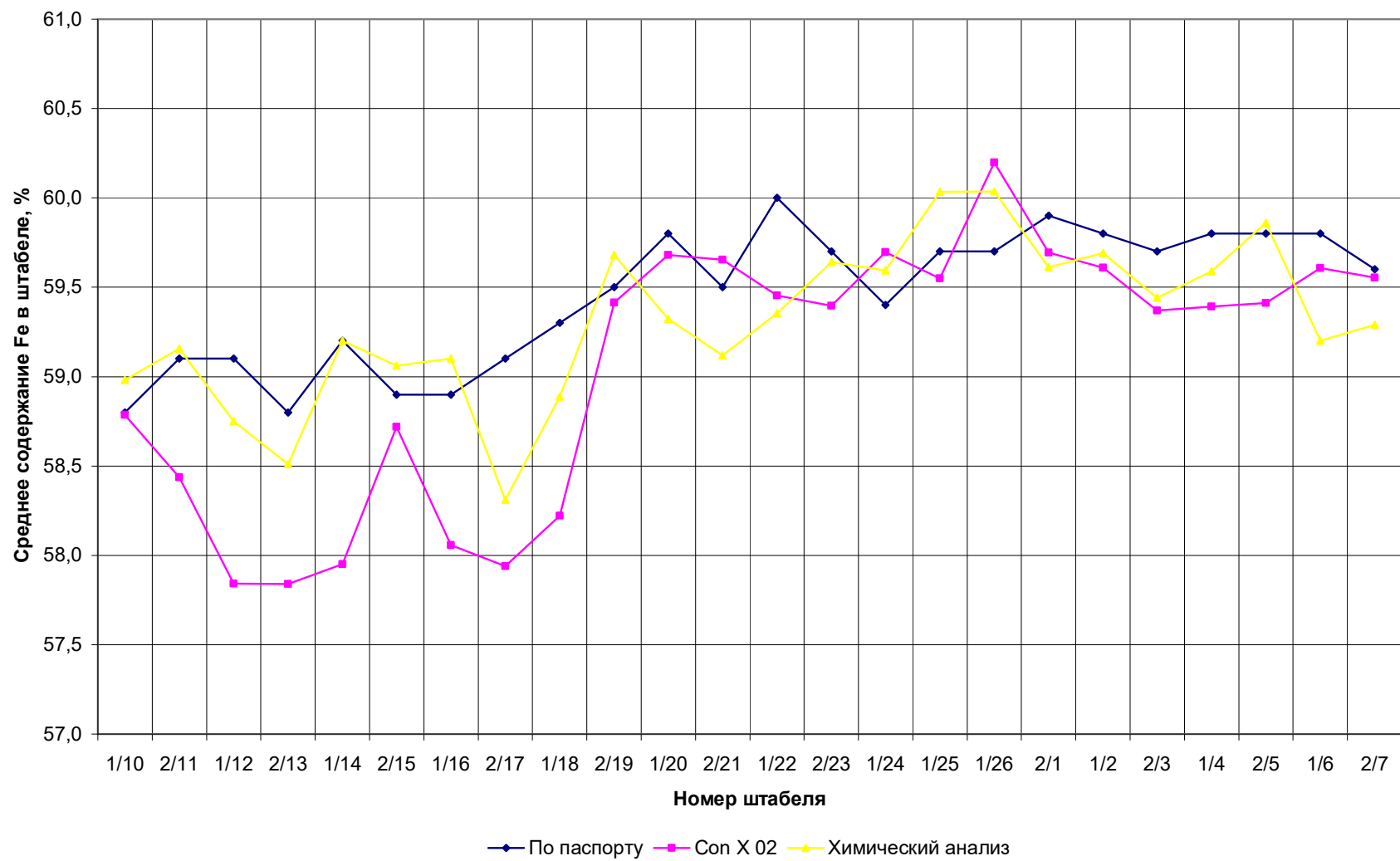


Рис. 3.36 – Содержание железа в выбираемых штабелях

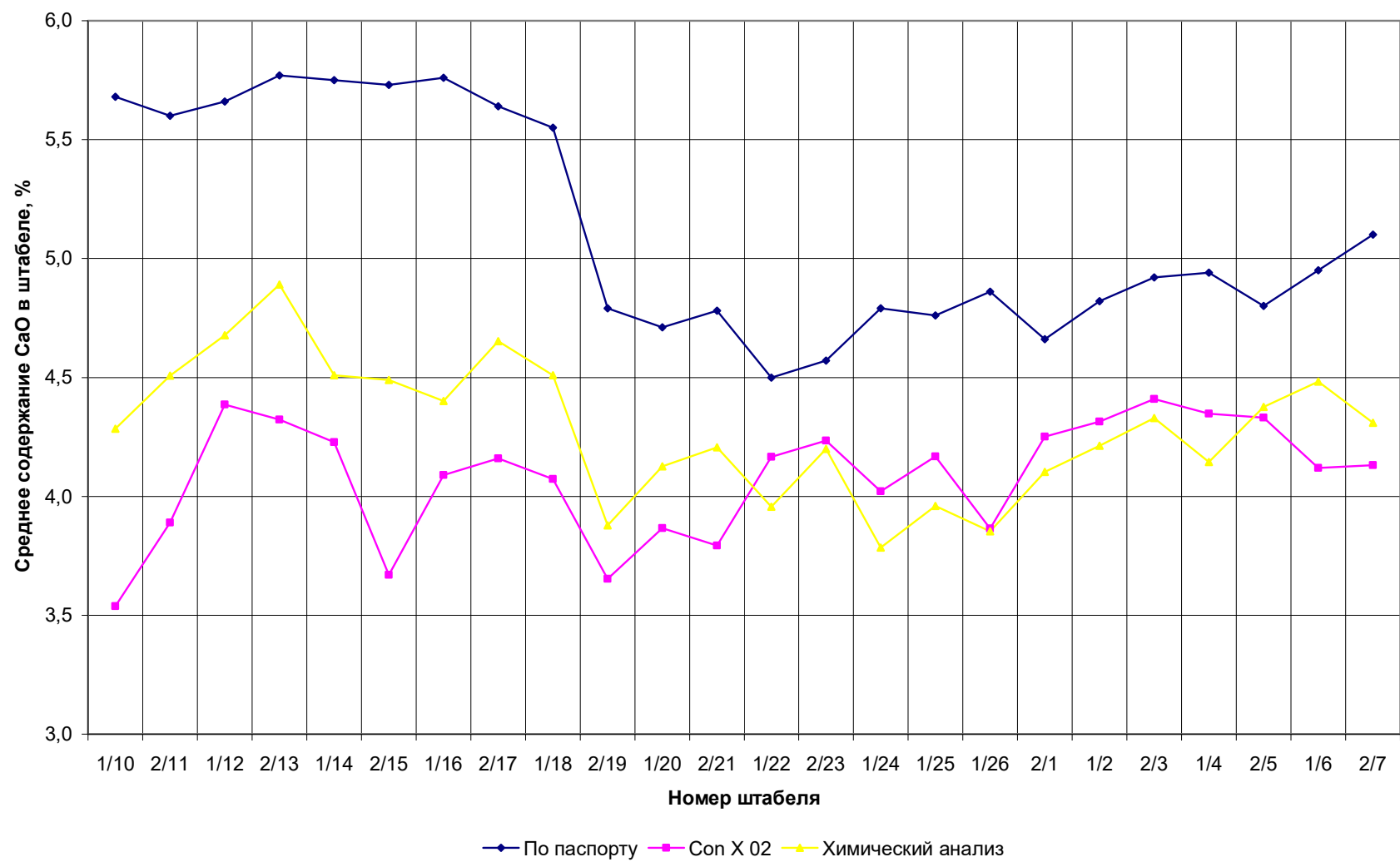


Рис. 3.37 – Содержание оксида кальция в штабелях

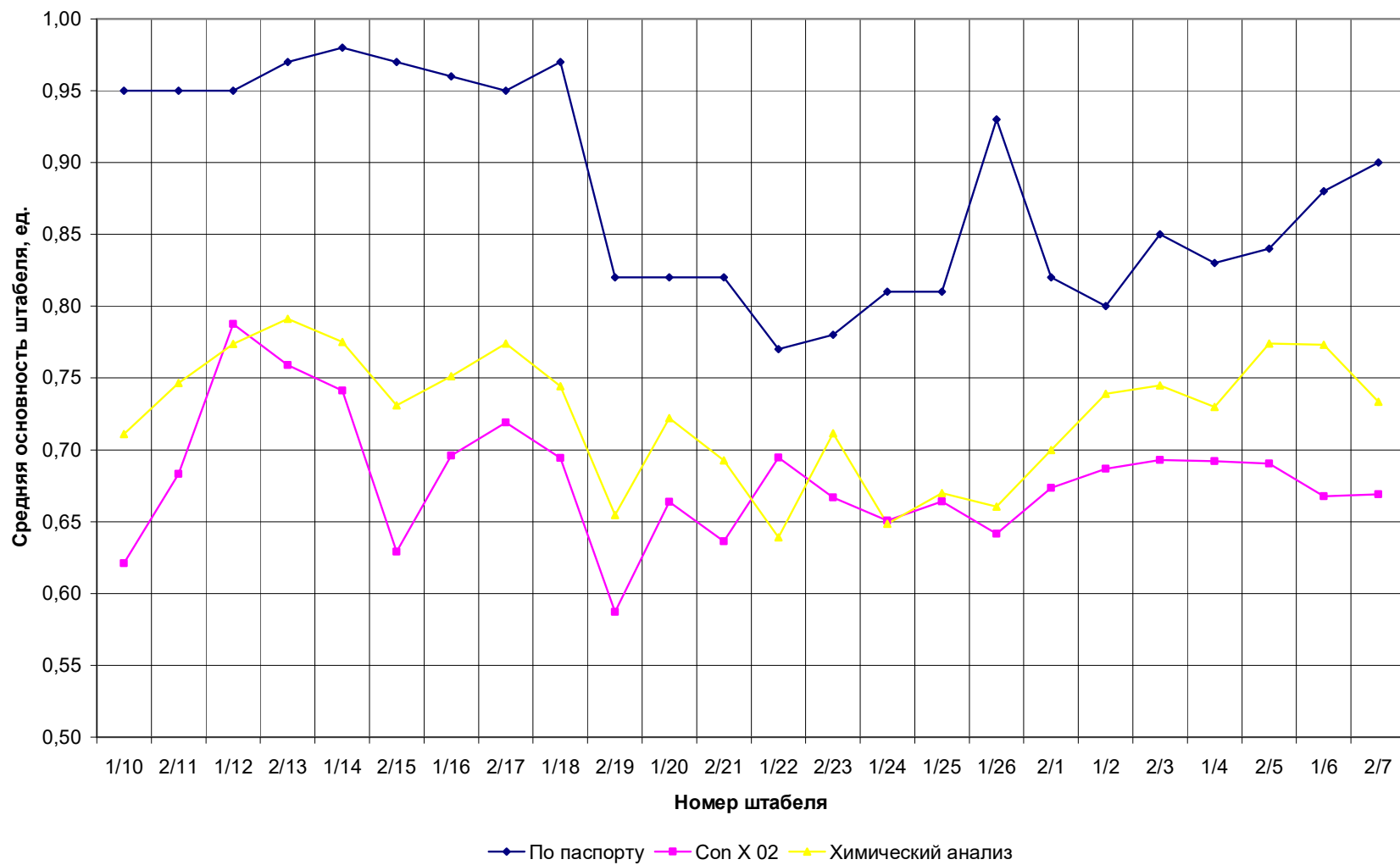


Рис. 3.38 – Основность штабелей

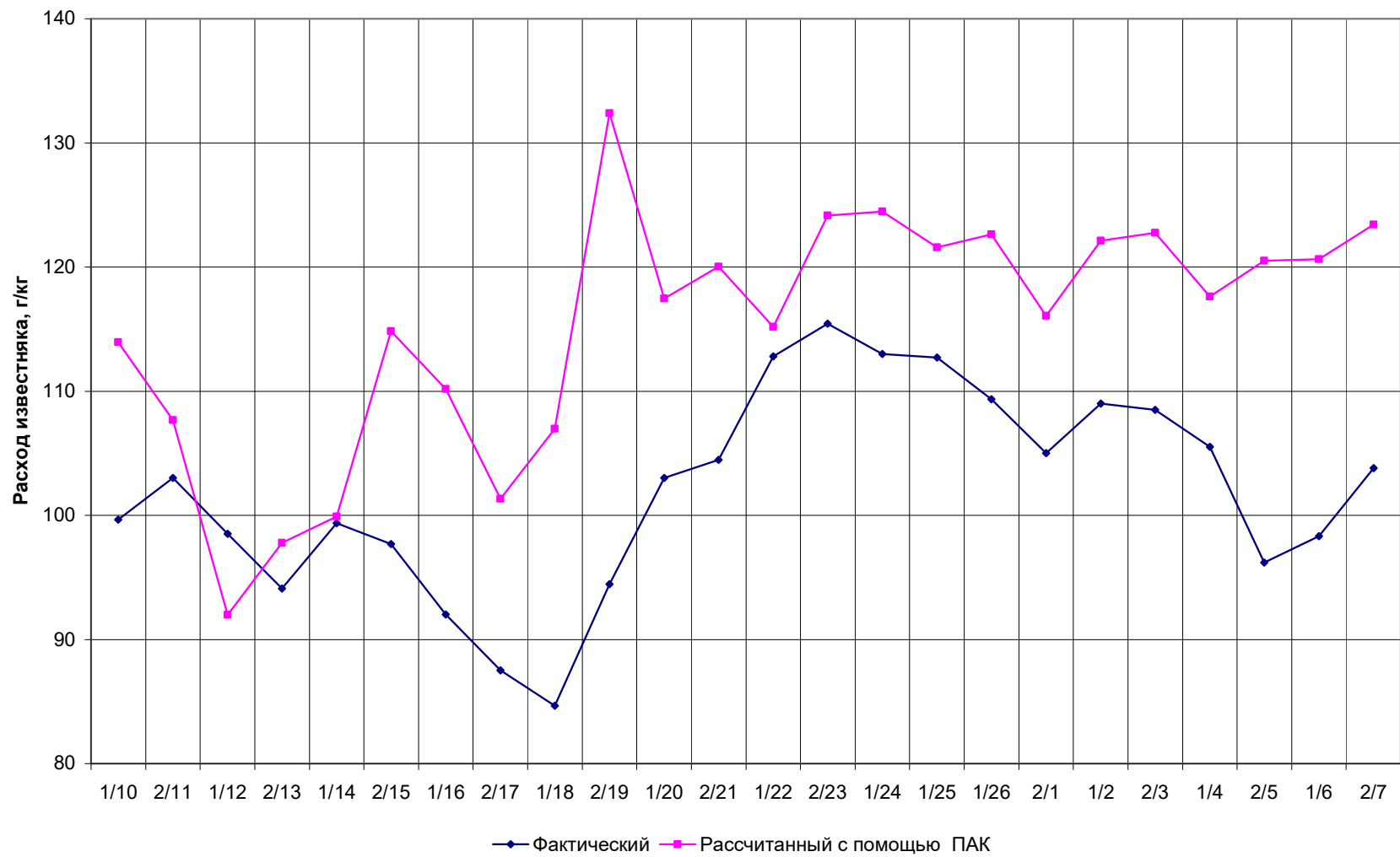


Рис. 3.39 Расход известняка

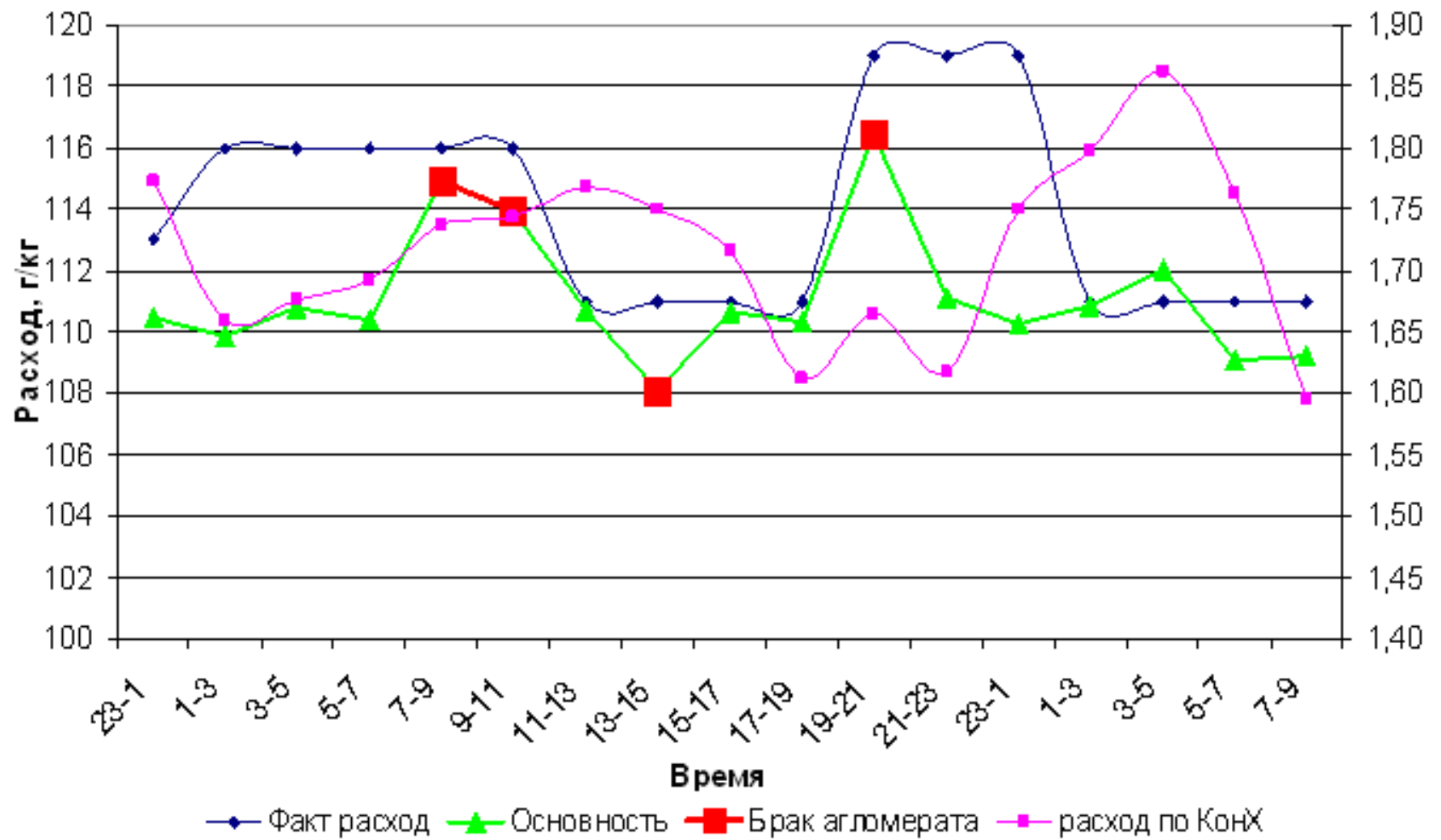


Рис. 3.40 Расход известняка и основность агломерата 23-24.09..

По окончании третьей пары часов ПАК выдает третий усредненный химический состав ЖРС, по которому рассчитывается  $G_{\text{флюса}_3}^{\text{теор}}$ . Фактический расход устанавливается по формуле:

$$G_{\text{флюса}_2}^{\text{факт}} = (G_{\text{флюса}_1}^{\text{факт}} + G_{\text{флюса}_3}^{\text{теор}} \cdot \alpha_1) \cdot 0,5 \quad (3.23)$$

В течение работы следующих двух часов приходят результаты анализа возврата, полученного из ЖРС первых двух часов. По программе рассчитывается теоретический состав агломерата и делается корректировка поправочного коэффициента

$$\alpha_2 = \frac{B_{\text{базы}}}{B_{\text{возврата}_1}} \quad (3.24)$$

По окончании третьих двух часов ПАК выдает четвертый усредненный химический состав ЖРС, по которому рассчитывается  $G_{\text{флюса}_4}^{\text{теор}}$ .

В течение работы следующих двух часов приходят результаты анализа возврата, полученного из ЖРС второго периода работы. Выполняется следующая корректировка поправочного коэффициента

$$\alpha_3 = \alpha_2 \cdot \frac{B_{\text{базы}}}{B_{\text{возврата}_2}} \quad (3.25)$$

Аналогично по окончании третьих двух часов ПАК выдает четвертый усредненный химический состав ЖРС, по которому рассчитывается

$$G_{\text{флюса}_4}^{\text{факт}} = (G_{\text{флюса}_2}^{\text{факт}} + G_{\text{флюса}_5}^{\text{теор}} \cdot \alpha_3) \cdot 0,5 \quad (3.26)$$

На рис. 3.41 приведены результаты расчета расхода флюса по данной методике в сравнении с фактическим расходом известняка. Фактический расход известняка занижен по сравнению с расчетным. В критической ситуации это может привести к получению агломерата с основностью, не входящей в допустимые пределы.

Промышленные испытания показали (см. приложение 3.1, 3.2), что ПАК позволяет оперативно и с высокой точностью получать информацию о среднем составе ЖРС. Точность определения содержания железа составляет 0,3 %, оксида кальция – 0,1 % и основности – 0,07 ед.

По результатам испытаний ПАК принят в промышленное использование на аглофабрике № 4 ГОП ОАО «ММК» в режиме советчика дозировщика.

## ВЫВОДЫ ПО ЭТАПУ

1. В рамках первого направления исследований разработана методика определения оптимальных значений уставок параметров регулирования электрического контура дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП) различного класса и мощности. В основе методики лежит использование математических моделей электрических контуров ДСП и УКП, а также моделей систем автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов, на основании которых определяются оптимальные несимметричные режимы горения дуг с максимальным тепловым КПД для различных стадий плавки в ДСП и обработки металла в УКП. Применение методики обеспечивает реализацию оптимальных электрических режимов ДСП и УКП с достижением максимального технического эффекта по снижению удельного расхода электроэнергии, времени под током и цикла плавки, а также снижение расхода электродов.

2. Разработан усовершенствованный способ и алгоритмы автоматического управления режимами работы газокислородного оборудования (стенные горелки, комбинированные фурмы-горелки – РСВ) ДСП с использованием информации о текущем коэффициенте шлака, рассчитываемом на основании высших гармоник токов дуг. В отличие от существующих алгоритмов управления РСВ-горелками, в которых изменение уставки на расход газа, первичного и вторичного кислорода, а также переключение между режимами горелки кислородной фурмы в процессе плавки, осуществляется по жесткой программе (профилю) в зависимости от времени под током, расхода электроэнергии или расхода кислорода, в усовершенствованных алгоритмах изменение режимов работы РСВ-горелок осуществляется в зависимости от изменения коэффициента шлака. Применение усовершенствованных алгоритмов управления режимами работы РСВ-горелок обеспечивает улучшение временных и энергетических режимов работы ДСП (снижение удельного расхода электроэнергии, расхода газа и кислорода, снижение времени работы под током).

3. Разработан усовершенствованный алгоритм автоматического управле-

ния инжекторами углесодержащего материала (УСМ) для вспенивания шлака в ДСП на стадии доводки металла. В отличие от известных алгоритмов управления инжекторами УСМ, реализованных в системах управления ArCOS, Melt Expert, Simelt, HI-REG и Q-REG зарубежных компаний Primetals Technologies (в прошлом Siemens VAI) и Danieli, где управление углевдуванием осуществляется на основании анализа текущего значения коэффициента шлака, рассчитываемым с использованием информации о высших гармониках токов дуг, в новом алгоритме в качестве контролируемого параметра используется расчет коэффициента шлака с использованием гармоник напряжений дуг, что повышает точность определения степени экранирования дуг. Помимо этого, в новой предусмотрен дополнительный блок контроля, который в случае низкого качества УСМ и недостаточного образования вспененного шлака адаптирует электрический режим путём сокращения длины электрической дуги. Кроме того, в усовершенствованном алгоритме управления предусмотрена возможность одновременной динамической адаптации длин электрических дуг в зависимости от уровня коэффициента шлака, для улучшения степени их экранирования и увеличения теплового КПД. Применение усовершенствованного алгоритма управления инжекторами УСМ обеспечивает дополнительное улучшение временных и энергетических характеристик ДСП (удельного расхода электроэнергии и времени работы под током) за счет увеличения скорости нагрева жидкой стали с максимальным КПД дуг.

4. На базе действующих электросталеплавильных агрегатов, функционирующих на Череповецком металлургическом комбинате ПАО «Северсталь» (г. Череповец Вологодской области) и АО «Уральская Сталь» (г. Новотроицк Оренбургской области) проведено внедрение разработанных опытных образцов усовершенствованных систем автоматического управления электрическими и технологическими режимами ДСП и УКП в промышленную эксплуатацию. В результате анализа эффективности разработанных систем автоматического управления в условиях действующего производства был выявлен положительный технический эффект, заключающийся в снижении удельного расхода элек-



троэнергии, времени под током и снижения расхода электродов на исследуемых ДСП и УПК.

**5. В рамках второго направления исследований** на основе исследований экспериментальных данных, полученных при изучении способов по нанесению покрытий, разработаны математические модели формирования параметров шероховатости на поверхностях трения деталей металлургических машин. Исследованы технологические процессы и разработаны способы, позволяющие сформировать микрорельеф контактирующих поверхностей: выглаживание с применением смазочных материалов, ультразвуковая обработка поверхности и нанесение покрытий на поверхности трения методом фрикционного плакирования. Доказано, что наиболее эффективным методом нанесения покрытий по критерию износостойкости и производительности оказался метод фрикционного плакирования гибким инструментом.

6. Разработаны способ и устройство нанесения покрытия гибким инструментом на резьбовые соединения, которые отличаются способом подачи материала-донора, управлением источником электрического тока, в случае применения импульсного источника при обработке, а также использованием оригинальной конструкции щетки, позволяющей эффективнее наносить покрытия на внешние и внутренние поверхности.

7. Получены акты об успешном проведении промышленных испытаний покрытий, нанесенных на резьбовые соединения нефтегазовых, насосно-компрессорных и обсадных труб методом фрикционного плакирования гибким инструментом на ОАО «Уральский трубный завод». Получены акты промышленного испытания ножей горячей резки металла и лупперов, обработанных методом фрикционного плакирования, на сортовых станах 170, 370 и 450 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**8. В рамках третьего направления исследований** проведено промышленное испытание установки для экспресс-определения элементного состава методом поточного РФА на ПАО «Гайский ГОК». Доказано, что при применении разработанного программно-аппаратного комплекса (ПАК) для анализа

сульфидных медно-цинковых руд погрешность определения химических элементов Fe, Cu и Zn по сравнению с химическим анализом не превышает (абс %): 0,5, 0,1 и 0,05 соответственно. Программно-аппаратный комплекс рекомендован к внедрению.

9. В условиях АО «Учалинский ГОК» промышленные испытания разработанного ПАК показали, что при поточном анализе товарного медного концентрата, результаты РФА по определению S, Fe, Cu, Zn, As, Pb входят в доверительный интервал и могут быть использованы при экспресс-анализе для контроля технологического процесса обогащения и регулировки реагентного режима медного цикла флотации.

10. Разработан ПАК для определения химического состава движущейся на ленте конвейера железорудной смеси в режиме реального времени, подаваемой в бункеры аглофабрики. Точность определения содержания железа составила 0,3 %, оксида кальция – 0,1 % и основности – 0,07 ед. Работоспособность ПАК проверена в ходе испытаний на аглофабрике ПАО «ММК».

Результаты исследований по 3 этапу проекта опубликованы в 19 научных статьях в журналах и сборниках научных трудов конференций, индексируемых наукометрической системой Scopus, из них 11 статей в журналах с квартилем Q1,2, также дополнительно в 10 научных статьях в изданиях, входящих в ядро РИНЦ. По результатам исследований опубликована 3 рецензируемые монографии и получены 2 патент РФ на изобретение, а также 9 свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ. Научные результаты апробированы на 15 научно-технических конференциях международного и национального уровня. По результатам работы защищено 3 кандидатские диссертации (Буланов М.В., Масалимов А.В., Латыпов О.Р.).

Таким образом, основные задачи 3 этапа научного проекта в соответствии с техническим заданием выполнены в полном объеме.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

### Список использованных источников для раздела 1

1.1. Nikolaev, A.A. Improved Methodology for Optimising the Electrical Operation of a Shaft-Type Arc Steelmaking Furnace / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, S.S. Ryzhevol // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).– 2022. – pp. 706-711. – doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787257 (Scopus, ID: 2-s2.0-85133140723).

1.2. Bowman, B. Arc Furnace Physics /B. Bowman, K. Krüger // Verlag Stahleisen GmbH. – Düsseldorf. –2009.

1.3. 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.

1.4. Boulet, B. Modeling and control of an electric arc furnace / Boulet, B.; Lalli, G.; Ajerschv, M. // presented at the American Control Conference, Denver, CO, USA, Jun. 4-6, 2000.

1.5. 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

1.6. Schliephake, H.; Timm, K.; Bandusch, L. Computer controlled optimization of the productivity of ISPAT-Hamburger Stahlwerke's AC-UHP-EAF // 5th European Electric Steel Congress, June 19-23, 1995

1.7. 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.

1.8. Hay, T., Hernandez, J.; Roberts S.; Echterhof T. Calculation of view factors in electric arc furnace process modeling // Steel Research International, July 2020.

1.9. Миронов, Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках: Монография / Ю.М. Миронов. – Чебоксары: изд. Чуваш. Ун-та, 2013. – 290 с.

1.10. Макаров, А.Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках / А.Н. Макаров. – Тверь: изд. Тверск. госуд. техн. ун-та, 2012. – 164 с.

1.11. Нехамин, С.М. Создание и внедрение энергоэффективных дуговых и шлаковых электропечных комплексов с использованием постоянного тока и тока пониженной частоты: дис. докт. техн. наук. – Московский энергетический институт, Москва. – 2015.

1.12. Свенчанский, А.Д. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин [и др.] // под общ. ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.

1.13. Krüger, K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces) / Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. – Reihe 6, Nr. 382. – VDI-Verlag, Düsseldorf. – 1998.

1.14. Николаев, А.А. Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа/ Николаев А.А., Тулупов П.Г., Омельченко Е.Я.// Электротехнические системы и комплексы. 2018. №4 (41). С.63-72

1.15. Николаев, А.А. Повышение эффективности электродуговых печей за счет алгоритмов управления электрическими режимами с анализом гармонического состава напряжений и токов дуг / А. А. Николаев, В. С. Ивекеев, П. Г. Тулупов [и др.]. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – 444 с. – ISBN 978-5-9967-2473-4.

1.16. Николаев, А.А. Разработка усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами установок ковш-печь с анализом гармонического состава токов дуг / А. А. Николаев, В. С. Ивекеев, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 62-75. – DOI 10.14529/power220307.

1.17. Nikolaev, A.A. Method of Switching Point Determination for Control System of Electric Arc Furnace Based on Data about Harmonics of Arc Currents and Voltages / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, E.B. Agapitov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2020, pp. 1-5

1.18. Nikolaev, A.A. Development of an improved automatic control algorithm for combined RCB burners and carbonaceous material injectors of a flexible modular furnace / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, S.S. Ryzhevov // Chernye Metally. №10. 2022. – pp.67-72. – doi: 10.17580/chm.2022.07.12 (**Scopus Q2**, ID:2-s2.0-8514136925).

1.19. Nikolaev, A.A. Development of an Automatic Control Algorithm for the Combined RCB-Burners and Carbon Material Injectors of the Flexible Modular Furnace / A.A. Nikolaev, P. G. Tulupov, S. S. Ryzhevov, S. A. Linkov // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2022. – pp. 644-648.– doi: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896242 (**Scopus**, ID: 2-s2.0-85140887729).

1.20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669247 Российская Федерация. Программа для управления RCB-горелками дуговой сталеплавильной печи с использованием информации о гармоническом составе токов дуг : № 20222668625 : заявл. 13.10.2022 : опублик. 19.10.2022 / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

1.21. Jansen, T. Advanced Foaming Slag Control / Jansen T., Krüger K., Schliephake H. et al. // 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz. – 25-28 Sep., 2012. – pp.385-390

1.22. Сериков, В.А Акустические и вибрационные характеристики сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечей: дисс. канд. техн. наук / Сериков Виктор Андреевич – Новосибирск. – 2016. – 147 с.

1.23. Николаев, А.А. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок

ковш-печь / Николаев А.А, Тулупов П.Г., Ивекеев В.С. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. Т. 20. №3. С. 52-64. – doi: 10.14529/power200306.

1.24. Ye, Xiao-Mei The Harmonic Detection based on Wavelet Transform and FFT for Electric Arc Furnaces / Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He// Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding. China. IEEE. – 2009. – pp. 408-412. – DOI: 10.1109/ICWAPR. 2009.5207486.

1.25. Simulation Research of Harmonics in Electric System of Arc Furnace / Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun // Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE. – 2004. – Vol.1. – pp. 902-906. – DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122.

1.26. Николаев, А.А. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления инжекторами углеродосодержащего материала дуговой сталеплавильной печи / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол, В. С. Ивекеев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т. 20. – № 2. – С. 120-132. – DOI 10.18503/1995-2732-2022-20-2-120-132

1.27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669269 Российская Федерация. Программа для управления инжекторами углеродсодержащего материала дуговой сталеплавильной печи с использованием информации о гармоническом составе токов дуг : № 20222668645 : заявл. 13.10.2022 : опубл. 19.10.2022 / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

1.28. Dorndorf M., Wichert W., Schubert M. Holistic Control of EAF's Energy and Material Flows // 3rd International Steel Conference on Developments in Metallurgical Process Technologies. – Düsseldorf, June 11-15, 2007. – P. 513-520.

1.29. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев,

Ж.Ж. Руссо, В. Сцымански, П.Г. Тулупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – №3. – С. 106-120.

1.30. Nikolaev, A.A. Diagnostics of the charge melting stage by arc current and voltage higher harmonics for EAF and LF of various classes / A.A. Nikolaev, G.P. Kornilov, P.G. Tulupov, S.S. Ryzhevov // Chernye Metally. №7. 2022. pp. 71-78. – doi:10.17580/chm.2022.07.12 (**Scopus Q2**, ID:2-s2.0-85136982853).

1.31. Оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Ануфриев А.В. и др. // Сталь, №4, 2014, С. 37-47.

1.32. Nikolaev, A.A. Development of a Methodology for Selecting Optimum Asymmetric Arc Combustion Modes in Ladle-Furnace Installations under Different Argon Purging Regimes / A.A. Nikolaev, P. G. Tulupov, S. S. Ryzhevov, I. A. Lozhkin // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2022. – pp. 353-358.– doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906772

1.33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669478 Российская Федерация. Программа для определения оптимальных несимметричных режимов горения дуг для двухпозиционной установки ковш-печь : № 20222668595 : заявл. 13.10.2022 : опубл. 20.10.2022 / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, М. В. Буланов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

1.34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669065 Российская Федерация. Программа для определения оптимальных несимметричных режимов горения дуг для однопозиционной установки ковш-печь : № 20222668511 : заявл. 12.10.2022 : опубл. 17.10.2022 / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, И. А. Гришин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

1.35. Миронов Ю.М. Закономерности электрических режимов дуговых сталеплавильных печей // *Электричество*. – № 6. – 2006. – С. 56 – 62.

1.36. Пат. 176106 Российская Федерация, МПК Н 05 В 7/148. Система управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.В. Ануфриев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»; №2017120504; заявл. 13.06.2017; опубл. 09.01.2018, Бюл. №1.

1.37. Nikolaev, A.A. Optimal Adjustment Methodology for the Electric Mode Control System Non-Linear Regulator of Electric Arc Furnace / A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov, S. S. Ryzhevol // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2022. – pp. 712-716.– doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787224 (**Scopus**, ID: 2-s2.0-85133139258).

1.38. Николаев, А.А. Методика оценки изменения удельного расхода электроэнергии и электродов при коррекции электрических режимов дуговых сталеплавильных печей / А. А. Николаев, В. С. Ивекеев, П. Г. Тулупов, М. В. Буланов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 45-55. – DOI 10.14529/power220205.

1.39. Nikolaev, A.A. Improved Methodology for Optimizing the Electrical Operation of a Shaft-Type Arc Steelmaking Furnace / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, S.S. Ryzhevol // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).– 2022.

### **Список использованных источников для раздела 2**

2.1. Анцупов, В.П. Математическая модель расчета энергосиловых параметров процесса обработки деталей металлическими щетками / В.П. Анцупов, Л.С. Белевский, Е.Ю. Мелентьева // *Известия вузов. Машиностроение*. – 1988. –№ 9. – С. 139-143.

2.2. Белевский, Л.С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом / Л.С. Белевский. – Магнитогорск: Лицей РАН, 1996. – 231с.



2.3. Актуальные проблемы прочности / А.В. Алифанов [и др.]; под ред. В.В. Рубаника // Глава 22. Плакирование гибким инструментом / К.В. Григорович, С.И. Платов, Р.Р. Дёма, П.А. Витязь, В.Л. Басинюк, М.А. Леванцевич. – Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2022. – 540 с. – ISBN 978-985-880-240-0.

2.4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680650 Российская Федерация. Расчет параметров формирующих высотные характеристики микротопографии контактирующих поверхностей: № 2022668984: заявл. 17.10.2022: опубл. 03.11.2022 / А.А. Николаев, Р.Р. Дема, М.В. Харченко [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

2.5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669937 Российская Федерация. Расчет технологических параметров процесса формирования износостойких функциональных покрытий на контактирующих поверхностях тяжело нагруженных узлов трения: № 2022668978: заявл. 17.10.2022: опубл. 26.10.2022 / Р.Р. Дема, М.В. Харченко, Р.Н. Амиров [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

2.6. Патент № 2771085 Российская Федерация, МПК С10М 137/10, С10М 133/12, С10М 117/04, С10М 149/18, С10М 157/04, С10М 157/08, С10М 161/00, С10М 169/06. Пластичная смазка: № 2021120946; заявл. 15.07.2021; опубл. 26.04.2022 / М.В. Харченко, С.И. Платов, С.П. Нефедьев, Р.Р. Дёма, Р.Н. Амиров, О.Р. Латыпов, Д.Р. Ганин; заявитель МГТУ им. Г.И. Носова. – 6 с.

2.7. Суслов, А.Г. инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др. М.: Машиностроение. 2008. – 320с.

2.8. Авторское свидетельство № 1543768 СССР, МПК В24В39/00. Способ упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: №

4376356/27; заявл. 04.01.1988; опубл. 10.08.1991 / Е.М. Макушок, Д.И. Дмитриевич, Т.В. Калиновская и др. – 2 с.

2.9. Патент № 2458777 Российская Федерация, МПК В 24 В 39/00, В82В 3/00. Способ упрочняющей обработки поверхностей деталей выглаживанием: № 2010145610/02; заявл. 09.11.2010; опубл. 20.08.2012 / В.П. Кузнецов, А.В. Макаров, А.Е. Киряков; заявитель УрО РАН, ООО "Предприятие "Сенсор". – 5 с.

2.10. Андреюк, Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев // Сталь. – 1972. – №6. – С.825-828.

2.11. Бакли, Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли. – М.: Машиностроение, 1986. – 360с.

2.12. Ахматов, А.С. Молекулярная химия граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472с.

2.13. Марков, А.И. Ультразвуковое алмазное выглаживание деталей и режущего инструмента / А.И. Марков, И.Д. Устинов. – М.: Машиностроение, 1979. – 54 с.

2.14. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.

2.15. Холопов, Ю.В. Машиностроение: ультразвук: УЗС, БУФО, ГЕО / Ю. В. Холопов. – Санкт-Петербург: Береста, 2008. – 327 с.

2.16. Патент № 2282525 Российская Федерация, МПК В24В 39/00, В23К 20/10, С23С 26/00. Устройство для ультразвуковой обработки материалов: № 2004139170/02; заявл. 31.12.2004; опубл. 27.08.2006 / Ю.В. Холопов; заявитель Ю.В. Холопов. – Бюл. № 14. – 7 с.

2.17. Патент № 2317187 РФ, МПК В24В 39/00. Устройство для безабразивной ультразвуковой финишной обработки и чистового точения поверхно-

стей сложной формы: № 2006100175/02; заявл. 10.01.2006; опубл. 20.07.2007 / Ю.В. Холопов; заявитель Ю.В. Холопов. – Бюл. № 5. – 7 с.

2.18. Холопов, Ю.В. Использование техники и технологии мощного ультразвука в технологии машиностроения // Промышленное оборудование. – С.-Петербург. – 2004. – № 11.

2.19. Патент № 210646 Российская Федерация, МПК В24В 39/02. Устройство для ультразвукового выглаживания крупногабаритной внутренней упорной резьбы: № 2021133094; заявл. 15.11.2021; опубл. 25.04.2022 / О.С. Железков, Е.М. Мартынов, Р.Р. Дема; заявитель МГТУ им. Г.И. Носова. – 6 с.

2.20. Железков, О.С. Прогнозирование износостойкости гайки нажимного устройства прокатной клетки / О.С. Железков, Р.Р. Дема, М.В. Харченко, И.И. Кинзина, Е.М. Мартынов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2022. – № 6. – С. 24-28. eLIBRARY ID: 49367234.

2.21. Железков О.С. Рациональные режимы выглаживания поверхности с использованием ультразвуковой финишной обработки / О.С. Железков, П.А. Дьяков, Е.М. Мартынов, С.П. Нефедьев, М.В. Харченко // Вестник машиностроения. – 2022. – № 6. – С. 84-88. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-6-84-88

2.22. Журавлев, А.В. Применение комбинированных покрытий для повышения износостойкости главного вала и эксцентриковой втулки дробилки sandvik / А.В. Журавлев, Е.Ф. Романенко, В.В. Горожанкин, Д.Н. Романенко, М.В. Харченко, Р.Р. Дема // Вестник машиностроения. – 2022. – № 5. – С. 51-56. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-5-51-56.

2.23. Zhuravlev, A.V. Improving the Wear Resistance of Key Components in a Sandvik Crusher by Applying a Hybrid Coating / A.V. Zhuravlev, E.F. Romanenko, V.V. Gorozhankin, D.N. Romanenko, M.V. Kharchenko, R.R. Dema // Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42, pp. 801-806. – doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X22080275>

2.24. Zhelezkov, O.S. Optimizing the Ultrasound Finishing of Surfaces / O.S. Zhelezkov, P.A. D'yakov, E.M. Martynov, S.P. Nefed'ev, M.V. Kharchenko // Rus-

sian Engineering Research. 2022. Vol. 42. pp. 920–924. – doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2209026X>

2.25. Леванцевич, М.А. Повышение эксплуатационных свойств трибосопряжений нанесением покрытий металлическими щетками / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, В.Г. Зольников // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. Навук. – 2005. – № 1. – С. 67-72.

2.26. Белевский, Л.С. Способы модификации поверхностей гибким инструментом и их практическое применение. Часть 1. Пластическое деформирование поверхностного слоя с одновременным нанесением функциональных покрытий вращающимися проволочными щетками / Л.С. Белевский, М.А. Леванцевич, Р.Р. Дема и др. // Вестник машиностроения. – 2020. – № 2. – С. 58-63.

2.27. Белевский Л.С., Леванцевич М.А., Дема Р.Р., Дерябина Л.В., Усатая Т.В., Латыпов О.Р. Способы модификации поверхностей гибким инструментом и их практическое применение. Часть 2. Практическое применение фрикционного плакирования вращающимися проволочными щетками / Л.С. Белевский, М.А. Леванцевич, Р.Р. Дема и др. // Вестник машиностроения. – 2020. – № 3. – С. 61-64.

2.28. Дёма, Р.Р. Повышение эксплуатационных характеристик деталей металлургического оборудования / Р.Р. Дёма, Л.С. Белевский, О.Р. Латыпов, Д.И. Артамонова // Наука и производство Урала. – 2021. – Т. 17. – С. 10-13.

2.29. Dema, R.R. Improving the corrosion resistance of threaded joints of oil and gas pipes through the use of coatings obtained by friction cladding / R.R. Dema, N.A. Devyaterikova, M.A. Levantsevich, R.N. Amirov // Chernye metally. – 2022. – No. 11. – pp. 36–40. doi: 10.17580/chm.2022.11.04

2.30. Levantsevich, M.A. Formation of functional protective coatings based on chrome by friction plated method / M.A. Levantsevich, N.N. Maksimchenko, R.R. Dema, A.N. Shapovalov // Chernye metally. – 2022. – No. 12. – pp. 36–40. doi: 10.17580/chm.2022.12.04

2.31. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С.Я. Грилихес; под ред. П.М. Вячеславова. – Л.: Машиностроение, 1983. – 101 с.

2.32. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

2.33. Алехин В.П., Алехин О.В. Новая нанотехнология поверхностной упрочняющей обработки массивных изделий из конструкционных и инструментальных сталей // Тяжелое машиностроение. – 2008. – № 2. – С. 22-25.

2.34. Панин, А.В. Формирование нанокристаллической структуры в поверхностных слоях стали ЭК-181 в процессе ультразвуковой обработки / А.В. Панин, Е.А. Мельникова, О.П. Перевалова и др. // Физическая мезомеханика. – 2009. – № 2. – С. 83-93.

2.35. Басинюк, В.Л. Исследование влияния способа обработки и микротопографии шероховатых слоев на маслосъемность поверхностей трения / В.Л. Басинюк, П.А. Витязь, М.А. Леванцевич и др. // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 4. – С. 387-399.

2.36. Григорович, К.В. Исследование покрытий, полученных методом фрикционного плакирования гибким инструментом / К.В. Григорович, С.И. Платов, Р.Р. Дёма, А.Я. Григорьев, В.Л. Басинюк А.А. Николаев, М.А. Леванцевич, Р.Н. Амиров, М.В. Харченко. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022 – 104 с. – ISBN 978-5-9967-2715-5.

2.37. Boldyrev, D.A. Influence of brake disc manufacturing technology on residual stresses and vibrations in the “disk – pad” system / D.A. Boldyrev, S.P. Nefedyef, M.V. Kharchenko, R.R. Dema // Chernye Metally. 2022. №5. pp. 27-33. – doi: (Scopus Q2, ID: 2-s2.0-85132545144)

2.38. Platov, S.I. Mathematical Model of the Accelerated Cooling of Metal in Thick-Plate Hot Rolling / S.I. Platov, S.M. Gorbatyuk, M.L. Lobanov, K.B. Maslen-

nikov, N.V. Urtsev, R.R. Dema, E.Yu. Zvyagina // Metallurgist. – 2022. – Vol. 66(3-4). pp. – 462-468. – doi: 10.1007/s11015-022-01348-5 (Scopus Q2, ID: 2-s2.0-85135519257)

2.39. Boldyrev, D. Influence of Fe-Si-Mg-REM-Inoculants on the microstructure of iron castings with vermicular graphite / D. Boldyrev, S. Nefedyef, R. Dema, M. Kharchenko, S. Chernyi, E. Suvorova, E. Mihailov, O. Latypov, R. Yordanova // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2022. – Vol. 57. – № 2. pp. 390-401. (Scopus Q3, ID: 2-s2.0-85125276337)

2.40. Григорович, К.В. Разработка и исследование антизадирных покрытий резьбовых соединений труб нефтегазового сортамента / К.В. Григорович, С.И. Платов, Р.Р. Дёма, В.Л. Басинюк, П.А. Витязь, М.А. Леванцевич, А.Я. Григорьев, О.Р. Латыпов, Р.Н. Амиров. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022 – 77 с. – ISBN 978-5-9967-2633-2.

2.41. Дема, Р.Р. Повышение коррозионной стойкости резьбовых соединений труб нефтегазового сортамента за счет применения покрытий, полученных фрикционным плакированием / Р.Р. Дема, Н.А. Девятирикова, М.А. Леванцевич, Р.Н. Амиров // Черные металлы. – 2022. – № 11. – С. 36-40. doi: 10.17580/chm.2022.11.04.

2.42. Григорович, К.В. Модификация рабочих поверхностей инструментов изготовления метизов методом фрикционного плакирования / К.В. Григорович, П.А. Витязь, В.Л. Басинюк и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2022. – № 7. – С. 8-15.

2.43. Болдырев, Д.А. Влияние технологических факторов на остаточные напряжения и вибрации в системе "диск – колодка" / Болдырев Д.А., Нефедьев С.П., Харченко М.В., Дема Р.Р. // Черные металлы. – 2022. – № 5. – С. 27-33. doi: 10.17580/chm.2022.05.05.

2.44. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680057 Российская Федерация. Расчет профиля бочки рабочих валков листовых станов.: № 2022669071: заявл. 18.10.2022: опубл. 27.10.2022 /

В.А. Мустафин, Р.Р. Дема, М.Е. Быков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

2.45. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680649 Российская Федерация. Расчет технологических режимов механической обработки контактирующих поверхностей с целью создания заданного микрорельефа, повышающего износостойкость: № 2022668986: заявл. 17.10.2022: опубл. 03.11.2022 / Р.Р. Дема, М.В. Харченко, О.Р. Латыпов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

2.46. Болдырев, Д.А. Влияние технологических факторов на остаточные напряжения и вибрации в системе "диск – колодка" / Болдырев Д.А., Нefeldьев С.П., Харченко М.В., Дема Р.Р. // Черные металлы. – 2022. – № 5. – С. 27-33. doi: 10.17580/chm.2022.05.05

2.47. Boldyrev, D. The improvement of the operational characteristics of the ventilated front brake discs / D. Boldyrev, M. Kharchenko, S. Nefedyev, E. Suvorova // Materials Research Proceedings. 2022 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE) – 2022. – pp. 88-94. – doi: (Scopus, ID: 2-s2.0-85124271810)

2.48. Платов, С.И. Математическая модель процесса ускоренного охлаждения металла при толстолистовой горячей прокатке / С.И. Платов, С.М. Горбатов, М.Л. Лобанов, К.Б. Масленников, Н.В. Урцев, Р.Р. Дема, Е.Ю. Звягина // Metallurg. – 2022. – № 4. – С. 89-93. DOI: 10.52351/00260827\_2022\_04\_89.

2.49. Boldyrev D.A. Synergetic research approach of the inoculants dissolution processes in the cast iron melt / D.A. Boldyrev, S.P. Nefed'ev, R.N. Amirov, M.V. Kharchenko // AIP Conference Proceedings. 2021 International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy (ICIMM) – 2022. – pp. 020004. – doi: <https://doi.org/10.1063/5.0076080> (Scopus, ID: 2-s2.0-85124066734)

2.50. Maslennikov, K. Ensuring Control of the Rolling Technological Process and the Quality of Rolled Products at Mill 5000 / K. Maslennikov, S. Platov, O. Latypov, N. Urtsev, V. Banshchikov, R. Dema // AIP Conference Proceedings. 2021 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE). – 2022. – Vol. 2503. – pp. 070012. – doi: 10.1063/5.0101464 (Scopus, ID: 2-s2.0-85140337671)

2.51. Boldyrev, D. Influence of Fe-Si-Mg-REM-Inoculants on the microstructure of iron castings with vermicular graphite / D. Boldyrev, S. Nefedyef, R. Dema, M. Kharchenko, S. Chernyi, E. Suvorova, E. Mihailov, O. Latypov, R. Yordanova // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2022. – Vol. 57. – № 2. – pp. 390-401. (Scopus Q3, ID: 2-s2.0-85125276337)

### **Список использованных источников для раздела 3**

3.1. Черноруков Н.Г., Нипрук О.В. Теория и практика рентгенофлуоресцентного анализа. Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 57 с.

3.2. Ревенко А.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов.// Новосибирск: «Наука», 1994. 264 с.

3.3. Комплексы для непрерывного мониторинга параметров буровых растворов в процессе бурения / С. В. Лахтионов, И. С. Чумаков, С. Г. Филинков [и др.] // PRОнефть. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 3. – С. 144-151. – DOI 10.51890/2587-7399-2021-6-3-144-151.

3.4. Использование потокового рентгенофлуоресцентного анализа для определения химического состава бурового шлама / С. В. Лахтионов, И. С. Чумаков, С. Г. Филинков [и др.] // PRОнефть. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 4. – С. 147-153. – DOI 10.51890/2587-7399-2021-6-4-147-153.

3.5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664145 Российская Федерация. Excavator Fleet Optimization : № 2022663678 : заявл. 21.07.2022 : опубл. 25.07.2022 / В. С. Великанов, И. А. Гришин, Е. А. Ильина, Д. Я. Арефьева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский



государственный технический университет им. Г.И. Носова».

3.6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664835 Российская Федерация. Rig fleet optimization : № 2022663806 : заявл. 22.07.2022 : опублик. 05.08.2022 / В. С. Великанов, И. А. Гришин, Е. А. Ильина, Д. Я. Арефьева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

3.7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022665461 Российская Федерация. Optimization of the fleet of mining trucks : № 2022663775 : заявл. 22.07.2022 : опублик. 16.08.2022 / В. С. Великанов, И. А. Гришин, Е. А. Ильина, Ю. В. Кочержинская ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

3.8. 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; опублик. 01.11.2021. - 1 с. (12,3 МБ)

3.9. Программа построения калибровочных зависимостей для оптимального определения концентрации элементов сыпучего материала в потоке / Гришин И.А., Мавринский В.В., Нефедьев А.А., Дубских Г.А., Николаев А.А.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; № 2022685585 ; заявл. 16.12.2022; опублик. 26.12.2022. - 1 с. (16 МБ)

3.10. ГОСТ 14180-80 Руды и концентраты цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения влаги

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. ГОСТ 15934.5-80 Концентраты медные. Метод определения железа.

3.13. ГОСТ 15934.7-80 Концентраты медные. Метод определения окисей кальция и магния.

3.14. ГОСТ 15934.7-80 Концентраты медные. Метод определения окисей кальция и магния.

3.15. ГОСТ 15934.8-80 Концентраты медные. Метод определения серы.

3.16. ГОСТ 15934.10-82 Концентраты медные. Метод определения диоксида кремния.

3.17. В. Л. Яковлев, О. Н. Молчанов, А. Т. Марков. Новые алгоритмы в индукционном методе контроля качества железорудного сырья в конвейерных потоках. Физико-химические проблемы разработки полезных ископаемых. 2001, № 2. – с. 78-86.

3.18. З. Г. Салихов, Е. Н. Ишметьев, А. И. Ушеров, Е. В. Ушерова, А. И. Волков. Автоматический комплекс для непрерывного контроля химического состава железорудных смесей на движущейся ленте // Печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии и машиностроении: труды IV международной научно-практической конференции (3 – 4 апреля 2008 г., МИСиС), 2008. - С. 317.

3.19. Ишметьев Е. Н., Салихов З. Г., Соколов А. Д., Ушеров А. И., Ушерова Е. В., Хажеев Д. Д. Автоматический комплекс для контроля химического состава и количества движущихся металлосодержащих смесей: Пат. 2373527 Россия, МКИ С1.

3.20. Grishin, I.A. Implementing a discharge slot width control system in cone crushers / I. A. Grishin, V. S. Bochkov, V. S. Velikanov // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – 2022. – Vol. 20. – No 2. – pp. 13-22. – doi: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-13-22

3.21. Б. Ф. Гончаров. Подготовка шихтовых материалов к доменной плавке. – М.: Металлургия, 1967. – 187 с.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»  
455000 г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38  
ИНН 7414002238, КПП 745601001  
УФК по Челябинской области  
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», л/счет  
20696Х30696)  
Р/счет 40102810645370000062 Отделение Челябинск,  
г. Челябинск; БИК 017501500  
К/сч.доход: 000000000000000130

ПАО «Северсталь»  
Адрес: 162608, г. Череповец, ул. Мира, 30  
ИНН 3528000597, КПП 997550001,  
ОГРН: 1023501236901  
Банк: Ф. ОПЕРУ Банка ВТБ (ПАО) в Санкт-Петербурге  
БИК 044030704  
Корреспондентский счет 3010181020000000704  
Расчетный счет 40702810371000000008

**АКТ № 01**

сдачи-приемки научно-технической продукции  
к договору № 9000118808 от 09.04.2021 г. (тема 2021-15)  
составлен « 16 » мая 2022 г.

**«Установки «Печь-ковш №№1,2» ЭС СП. Корректировка режимов электродугового нагрева и святи с переносом продувочных блоков в динце сталеразливочных ковшей с целью экономии огнеупорных материалов»**

Этап 01

1.1. Знакомство с существующим оборудованием и составе агрегатов, технологическими особенностями и электрическими режимами, алгоритмами программ АСУ ТП задания рабочей кривой в зависимости от стабильности горения дуг, величины продувки аргоном. Знакомство с настройкой нелинейных регуляторов светом автоматического управления перемещением электродов, настройкой вспомогательных блоков регуляторов, а также блоком контроля и ограничения токов дуг. Знакомство с параметрами электрических сетей 35 кВ, нескольких уровней напряжения.

1.2. Приведение смысла по определенно параметров печных контуров агрегатов. Использование экспериментальных данных для расчета электрических характеристик агрегатов типа Р(т) и Q(т) при работе на различных ступенях печного трансформатора и уровней напряжения в сети 35 кВ. Разработка математических моделей электрических контуров и систем автоматического управления перемещением электродов УПК 1,2 ЭС.

1.3. Изучение поведения поверхности жидкого металла и шлака: оценка величины «зеркала» металла без шлака, шлаков и величины брызг металла под ближайшими электродами фаз 1,2 при различных температурах (интервалах температур) металла, интенсивности аргоновой продувки.

1.4. Анализ и выбор оптимальных параметров регулировки (для регулятора АРКЕЛЕК УПК1 ЭС) активное сопротивление дуги, полное сопротивление, напряжение дуги и др.). Разработка электрических режимов для каждой УПК 1,2 ЭС с максимальной суммарной полезной мощностью электрических дуг при различной толщине шлака под каждой из фаз при одавлении металла (поплавлении «зеркала») в процессе продувки аргоном. Для каждой УПК 1,2 ЭС определены области настроек регуляторов и ступеней напряжения печного трансформатора, обеспечивающих минимальное потребление электроэнергии на нагрев металла в фундам стабильности горения электрических дуг, величины аргоновой продувки и температуры металла с учетом возможности поддержания баланса активных мощностей, но с максимальной суммарной полезной мощностью без возрастания расхода электродов, с уменьшением излучения на футеровку шлакового пояса сталеразливочного ковша, с учетом размера «зеркала» и брызг жидкого металла, степени закрытия дуг шлаком. Изменение и последующий анализ настройки нелинейных регуляторов систем автоматического управления перемещением электродов УПК с точки зрения динамических показателей качества регулирования. Изменение и последующий анализ настройки вспомогательных блоков и блока контроля и ограничения токов дуг регуляторов мощности дуги.

1.5. Анализ и уточнение существующей формулы коэффициентов стабильности горения дуг в шлаке по гармоническим составляющим первичных токов. Определение уставок коэффициента стабильности, интервалов температур металла и величины аргоновой продувки для выдачи программных команд на изменение группы параметров регулятору, на появление на экране в форме советника специалисту рекомендаций на переключение ступени напряжения печного трансформатора.

1.6. Выдача рекомендаций по коррекции, изменению алгоритмов программы электрических режимов в АСУ ТП УПК1, 2, а также изменению основных параметров систем автоматического управления перемещением электродов АРКЕЛЕК УПК1 и АrCOS NT Light УПК2, с ориентацией на уменьшение расхода огнеупоров на сталеразливочные ковши за счет уменьшения излучения на шлаковый пояс без увеличения расхода электроэнергии, электродов, времени под током.

Мы, нижеподписавшиеся, представитель ИСПОЛНИТЕЛЯ (проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» *Трунов Олег Иванович*, действующий на основании доверенности 01-0446 от 25.12.2020 г. с одной стороны, и представитель ЗАКАЗЧИКА ПАО «Северсталь» *Млашнев Петр Александрович*, действующий на основании доверенности № 13/66-035-2020-5-113 от 16.07.2020 г., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что научно-техническая продукция удовлетворяет условиям договора и технической заданию и в надлежащем порядке оформлена.

- 1) проведено изучение существующего оборудования в системе УПК1,2 ЭС СП, технологическим оборудованием и электрическими режимами, алгоритмами программы АСУ ТП задания рабочей кривой в зависимости от стабильности горения дуг, величины продувки аргоном;
- 2) выполнены опыты по определению параметров печных контуров УПК1,2 ЭС СП (опыты двухфазного и трехфазного короткого замыкания); разработаны математические модели электрических контуров УПК1,2 ЭС СП и систем автоматического управления электрическими режимами Arcelec (АРКЕЛЕК) и ArCOS NT Light; проанализированы электрические характеристики агрегатов при работе на различных ступенях РПН печных трансформаторов и использовании различных рабочих кривых;
- 3) проведены записи мгновенных значений напряжений и токов на первичной стороне печных трансформаторов УПК1,2 ЭС СП, на основании которых определен характер изменения гармонического состава токов при доливной продувке и условиях нового расположения продувочного блока, а также при продувке с использованием аварийной фурмы;
- 4) проведены экспериментальные исследования поведения поверхности жидкого металла и шлака при различных режимах аргоновой продувки, шлаковых режимах и температурах жидкой стали; исследования выполнены для доливной продувки при новом расположении продувочного блока, а также при использовании аварийной фурмы;
- 5) выполнены разработка усовершенствованных электрических режимов УПК1,2 ЭС СП, обеспечивающих снижение излучения на футеровку шлакового леща стальной ванны и повышение их стойкости без увеличения удельного расхода электроэнергии и электродов; даны рекомендации по изменению параметров систем управления Arcelec (АРКЕЛЕК) и ArCOS NT Light для реализации разработанных режимов;
- 6) разработаны усовершенствованные алгоритмы автоматического переключения рабочих кривых, обеспечивающие автоматическую адаптацию электрических режимов УПК1,2 ЭС СП в зависимости от режима аргоновой продувки и шлакового режима; для усовершенствованных алгоритмов определены новые уставки коэффициентов шлака (коэффициентов стабильности), также предложена усовершенствованная формула расчета коэффициента шлака для нового расположения продувочного блока в дине стальной ванны с использованием информации о гармоническом составе токов на первичной стороне печного трансформатора.

Стоимость работ по договору: [redacted] рублей, НДС не облагается.

Выполнено с начала работы за этапы 01: [redacted] от общей договорной цены [redacted] рублей, НДС не облагается.

Сумма аванса, перечисленная за выполненные этапы: нет.

Следует к перечислению по этапу 01: [redacted] рублей, НДС не облагается.

Работу сдал  
от ИСПОЛНИТЕЛЯ  
Президент по НИИР  
ФГБОУ ВО «МГУ им. Г.И. Носова»

  
М.П. Тузупов  
  
А.А. Николаев



Работу принял  
от ЗАКАЗЧИКА  
Представитель ЦАО «Сверсталь»  
по доверенности

  
П.А. Мищенко  
Доверенность № 33/118-ч/35-2020-2-419 от  
23.05.2020 г.  


**ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»**  
455000 г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38  
ИНН 7414002238, КПП 745601001;  
УФК по Челябинской области (ФГБОУ ВО «МГТУ  
им. Г.И. Носова», л/сч 20696Х30690)  
Номер счета получателя - 03214643000000016900  
Отделение Челябинск Банка России/УФК по  
Челябинской области г. Челябинск;  
БИК 017501500  
Номер счета банка получателя средств -  
40102810645370000062

**АО «Уральская Сталь»**  
462353, г. Новотроицк,  
Оренбургской обл.,  
ул. Заводская, д.1  
Р/счет 40702810900020105927 в  
ПАО «Сбербанк»  
Кор. счет 30101810400000000225  
БИК 044525225, ИНН 5607019523,  
КПП 997550001, ОКПО 13657842

**АКТ № 03**

сдачи-приемки научно-технической продукции  
к договору №УС/21-1153 от 01.04.2021 г. (тема 2021-18)  
составлен « 11 » 07 2022 г.

**«Совершенствование технологических и энергетических режимов ДСП-1  
в ЭСПЦ АО «Уральская Сталь»**

**Этап 03.** Проведение серии тестовых плавов с использованием новых электрических режимов ДСП-1 при измененных параметрах системы управления HI-REG и скорректированных профилях плавов. Проведение гарантийных испытаний усовершенствованных электрических режимов ДСП-1 после изменения настроек системы управления HI-REG и профилей плавов. Оценка фактического технического эффекта изменения временных, энергетических и технологических показателей работы ДСП-1 с использованием специализированной методики, учитывающей влияние неодинаковых значений технологических факторов в базовом и гарантийном периодах.

Мы, нижеподписавшиеся, представитель ИСПОЛНИТЕЛЯ - проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» *Тулунов Олег Николаевич*, действующий на основании доверенности от № 01-4480 от 27.12.2021 г., с одной стороны, и представитель ЗАКАЗЧИКА – технический директор АО «Уральская Сталь» *Куницын Глеб Александрович*, действующий на основании доверенности от № 22-48/УС от 14.03.2022 г., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что научно-техническая продукция **удовлетворяет условиям договора и технического задания** и в надлежащем порядке оформлена.

**Краткое описание научно - технической продукции:**

- 1) проведена реализация усовершенствованного алгоритма управления электрическими режимами ДСП-1 (ГМП-1), обеспечивающего автоматическое переключение ступеней РПН печного трансформатора и рабочих кривых в процессе плавки; созданы профили плавов для автоматического режима для различного состава металлошихты;
- 2) проведена реализация на визуализации сталевара ДСП-1 (ГМП-1) отображения текущего значения коэффициента вспенивания шлака для коррекции ручного управления вдуванием углеродсодержащего материала при работе дуг на жидкую ванну с целью их эффективного экранирования и дополнительного повышения теплового КПД;
- 3) проведены испытания усовершенствованных электрических режимов ДСП-1 после изменения настроек системы управления HI-REG и профилей плавов; выполнена оценка фактического технического эффекта изменения временных, энергетических и технологических показателей работы ДСП-1 (ГМП-1).

Приложение 1.2. Продолжение

При сдаче работы (этапа) с учетом выполнения условий договора установлена надбавка (скидка) к договорной цене в размере \_\_\_\_\_ не предусматривается \_\_\_\_\_

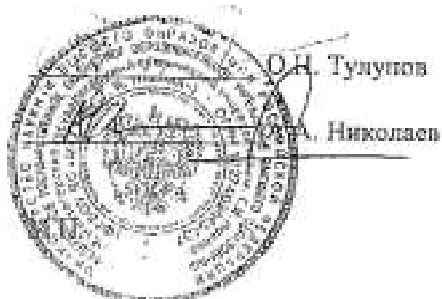
(сумма цифрами, прописью)

Удерживается сумма аванса, перечисленная за выполненные этапы \_\_\_\_\_ нет

Следует к получению по настоящему акту \_\_\_\_\_  
коп., НДС не облагается на основании п.п. 16 п. 3 ст. 149 Налогового кодекса РФ.

Работу сдал:  
от ИСПОЛНИТЕЛЯ

Проректор по НИИР  
ФГБОУ ВО «МГУ им. Г.И. Носова»



Работу принял:  
от ЗАКАЗЧИКА

Технический директор  
АО «Уральская Сеть»



*[Handwritten signature]* А.С. Степанов  
*[Handwritten signature]* М.С. Вудяков

УТВЕРЖДАЮ  
 Директор по техническому  
 развитию и качеству

П.А. Мишнев  
 8 февраля 2021 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской опытно-конструкторской работы  
 «Разработка новых электрических и других режимов шахтных печей №№1,2 ЭС СП в целях экономии графитированных электродов для двух вариантов питания 35 кВ в условиях пониженного напряжения и для двух систем (рабочей и резервной) автоматического управления перемещением электродов» (договор №625НС/9000086306 от 06.12.2018 г., доп. соглашения №№1-3 от 15.05.2019 г. и 11.03.2020

Работа проводится в рамках раздела VI «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика, пункта 4 «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», подпункта 8 «Разработка систем рационального использования энергоресурсов и комплексного использования вторичных энергоресурсов» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 7 ст. 262 ч.2 НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988 (в редакции Постановления Правительства РФ от 6 февраля 2012 г. №96)

#### Краткое описание выполненной работы

Разработаны и внедрены усовершенствованные электрические режимы ШП2 ЭС СП и УПК2, включающие в себя измененные параметры систем автоматического управления перемещением электродов ArcCOS NT, АСУ ЭРП (ШП2 ЭС СП), Simelt (УПК2 КС СП), а также новые алгоритмы автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печного трансформатора, функционирующие на основании анализа гармонического состава токов и напряжений электрических дуг.

Новые настройки систем управления ArcCOS NT (ШП2 ЭС СП) и Simelt (УПК2 КС СП), выполненные по авторским методикам исполнителей НИОКР (Николаев А.А., Тулупов П.Г.), включают в себе измененные таблицы уставок импедансов (активных сопротивлений дуг) для вторичных электрических контуров ШП2 ЭС СП и УПК2 КС СП, измененные коэффициенты нелинейных ПИ-регуляторов и импеданса, а также новые параметры вспомогательных блоков. Для ШП2 ЭС СП был введен в работу режим регулирования импеданса на основных стадиях расплавления металлошихты с оптимальными уставками, обеспечивающими исключение неконтролируемого роста тока на переходных участках между стадией расплавления металлошихты и стадией работы дуг на жидкую ванну из-за изменения гармонического состава токов и напряжений дуг. Для ШП2 ЭС СП дополнительно были изменены настройки системы управления АСУ ЭРП, обеспечивающие устойчивую работу резервного регулятора без сильного ухудшения временных и энергетических показателей работы ШП2 ЭС СП. В случае с УПК2 КС СП изменения таблиц уставок импедансов были направлены на создание оптимальных несимметричных режимов горения дуг с учетом расположения зеркала на поверхности жидкой ванны и режимов аргонной продувки для каждой позиции агрегата.

Скорректированный алгоритм автоматического переключения рабочих кривых на стадии доводки жидкой стали для ШП2 ЭС СП выполняет динамическую адаптацию длин дуг в зависимости от шлакового режима и режимов кислородной продувки. За счет использования оптимальных логических условий переключения рабочих кривых, а также граничных значений коэффициента шлака, были созданы условия для уменьшения средних значений токов дуг на стадии доводки без существенного снижения скорости нагрева жидкой стали, что совместно с введенным режимом регулирования импеданса для основных стадий расплавления металлошихты обеспечивает снижение удельного расхода электродов.

Новый алгоритм автоматического изменения рабочих кривых и ступеней РПН печного трансформатора УПК2 КС СП, построенный на основании анализа коэффициента шлака с использованием информации о гармоническом составе токов дуг, совместно с корректируемыми настройками системы управления Simelt обеспечивает коррекцию электрических режимов агрегата в зависимости от текущего шлакового режима и режима аргоновой продувки. Благодаря динамической адаптации длин электрических дуг в процессе обработки жидкой стали достигается сохранение максимального теплового КПД дуг и оптимальной скорости нагрева стали при минимизации действующих значений токов дуг, благодаря чему достигается снижение удельного расхода электродов.

#### Технический эффект от внедрения результатов НИОКР

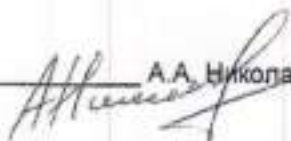
По результатам гарантийных испытаний, проводившихся для ШП2 ЭС СП в период с 26.01.2020 г. по 03.05.2020 г., для УПК2 КС СП – с 25.01.2020 г. по 07.05.2021 г., был достигнут основной технический эффект по снижению удельного расхода электродов при расчете на жидкую сталь на 2,56% (ШП2 ЭС СП) и 3,82% (УПК2 КС СП), а также дополнительный технический эффект по снижению удельного расхода электроэнергии на 1,75% (ШП2 ЭС СП) и 0,97% (УПК2 КС СП), при сопоставлении с утвержденными предгарантийными периодами с 21.10.2019 г. по 20.01.2020 г. (ШП2 ЭС СП) и с 07.09.2019 г. по 15.12.2019 г. (УПК2 КС СП). Оценка технического эффекта выполнялась с использованием разработанной методики, учитывающей влияние разных технологических условий в гарантийном и предгарантийном периодах. Прямая оценка для сравниваемых периодов, показала уменьшение удельного расхода электродов при расчете на жидкую сталь на 1,40 / 0,91% (ШП2 ЭС СП) и 9,26/10,06% (УПК2 КС СП).

**Даты фактического внедрения результатов НИОКР:** ШП2 ЭС СП – 04.05.2020 г.; УПК2 КС СП – 08.05.2020 г.

**Срок полезного использования:** 5 лет.

Научный руководитель НИОКР:

Заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,  
канд. техн. наук, доцент

  
А.А. Николаев

Согласовано  
Начальник ЦТР МП

  
А.В. Краснов





П Н Т З

Акционерное общество «Первоуральский завод трубный»

ОРТНГО – ЦииР (цех №60)

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ЦииР

А.Б.Гизатуллин

« 25.03.2021 г. »

**АКТ-ЗАКЛЮЧЕНИЕ №1-ОРТНГО от 25.03.2021**

Проведение испытаний муфт НКТ с двухслойным сухим твердосмазочным покрытием полученным методом ТДЦ + ПГИ на «свинчивание-развинчивание»

Цель исследования: оценка антизадирных свойств сухого твердосмазочного покрытия, полученного методом ТДЦ (термодиффузионного цинкования) с дополнительным поверхностным слоем из фторполимера, нанесенного методом ПГИ (плакирование гибким инструментом) при проведении операций свинчивания-развинчивания.

Для повышения износостойкости муфт НКТ, одним из перспективных направлений является применение защитных многофункциональных покрытий резьбы. К многофункциональным покрытиям для муфт НКТ предъявляют следующие требования: обеспечение необходимого уровня износостойкости при многократных циклах «свинчивания-развинчивания», и высокая коррозионная стойкость резьбовых поверхностей. Решения поставленной задачи возможно путем применения модифицированного покрытия, сформированного методом ТДЦ (термодиффузионного цинкования) с нанесением дополнительного поверхностного слоя из фторполимера методом ПГИ (плакирование гибким инструментом) в качестве сухого твердосмазочного покрытия.

Ранее в условиях АО «ПНТЗ» (Акт-заключение №13 от 09.12.2019) были проведены исследования по оценке противозадирного твердосмазочного покрытия на основе модифицированного ТДЦ с увеличенным слоем  $\delta$ -фазы с повышенным содержанием цинка и с пропиткой полимерами. При этом нижний слой ( $\delta+\Gamma$ -фазы, обладающий высокой твердостью, обеспечивает улучшенные антизадирные свойства, а зернистые слои  $\delta$ -фазы с повышенным содержанием цинка, пропитанные полимером, обеспечивают твердосмазочные свойства. Лучшие результаты при испытаниях на «свинчивание-развинчивание» показала муфта №6 с тонким слоем жидкотекучих полимеров («условно сухое» покрытие).

В развитие предложенной идеи было решено провести исследования комбинированного двухслойного покрытия, сформированного из слоя ТДЦ с нанесенным наружным слоем из фторопласта марки Ф-4 (ГОСТ 10007-80) толщиной 6-10 мкм. Слой фторопласта был нанесен методом плакирования гибким инструментом (ПГИ). Работа по нанесению покрытий производилась в сотрудничестве

с ООО «Вика-Гал» (ТДЦ - покрытие).

#### **Краткая характеристика покрытия.**

Термодиффузионное цинковое покрытие производства ООО «ВИКА-ГАЛ», предназначенное для использования в качестве твердой смазки, представляет собой покрытие состоящее из наружного мелкозернистого слоя  $\delta$ -фазы и износостойкого текстурованного слоя  $\delta$ -фазы с дисперсными включениями железосодержащей  $\Gamma$ -фазы с повышенной твердостью. Более рыхлый наружный слой с высоким содержанием цинка и более твердый внутренний обеспечивают повышенные износостойкие свойства. Цинкование проводили с использованием смеси изготовленной в соответствии с ТУ 1721-001-51453849-2001 «Смесь насыщающая для термодиффузионного цинкования». Данная смесь поставляется для ТДЦ муфт в АО «ПНТЗ».

Для формирования комбинированного двухслойного покрытия, наружный слой фторопласта марки Ф-4 (ГОСТ 10007-80) был нанесен методом плакирования гибким инструментом (ПГИ), заключающийся в термомеханическом взаимодействии вращающейся проволочной щетки (ВПЩ), к торцевой поверхности которой с определенным усилием прикладывался материал донор (фторопласт). При заданных режимах обработки происходит массоперенос материала донора на подготовленную ювенильную поверхность изделия (муфта), с формированием однородного слоя покрытия толщиной  $6\pm 10$  мкм. Адгезионная прочность сформированного покрытия составляет на уровне  $7\div 12$  МПа.

Экспериментальный вариант покрытия был нанесен на муфты условным размером 73 с резьбовым соединением Т100, изготовленные из материала группы прочности N80Q.

#### **Методы исследования.**

Оценку внешнего вида муфт после нанесения комбинированного двухслойного покрытия производили визуально.

Замеры толщины покрытия производили с помощью толщиномера Константа К5 (без вычитания «нулевого» слоя) по центральной расточке муфты.

Измерение диаметра резьбы и радиального уплотнения проводили приборами типа Gagemaker MRP и Gagemaker MRP-U соответственно.

Контроль профиля резьбы и уплотнительных элементов проводился с использованием слепочного материала на видеоизмерительной установке Micro-Vu Vertex 251HC.

Испытания на «свинчивание-развинчивание» производили на муфтонаверточной машине СКР-500 в условиях Экспериментального участка. Свинчивание производили с патрубками с резьбовым соединением Т100 (без покрытия) из углеродистых марок сталей. Навинчивание муфт производили с использованием муфтонаверточной машины СКР-500 по графику свинчивания, при этом дополнительно производился визуальный контроль правильности сборки соединения. После каждого цикла свинчивания-развинчивания производился осмотр резьбового соединения на предмет наличия повреждений на поверхности резьбы и уплотнения ниппеля и муфты.

#### **Результаты исследования.**

Оценка внешнего вида, толщины покрытия на резьбовой поверхности и параметров резьбы муфт и ниппельных концов приведены в таблице 1.

Контроль параметров проводился по нанесенному покрытию. Внешний вид покрытия приведен на рисунке 1.

Таблица 1. Характеристики опытных муфт и ниппелей.

Номер муфты (М), нипполя (N)	Внешний вид покрытия резьбы	Толщина покрытия <sup>2</sup> , мкм	$d_p$ min/max	$d_f$ min/max
M2A	Покрытие муфты серого цвета, гладкое, блестящее с желтоватым отливом	46,4 (30 - 61)	-0,03/ +0,03	-0,18/ -0,14
M3B	Покрытие муфты серого цвета, гладкое, блестящее с желтоватым отливом	61,2 (52 - 73)	-0,05/ 0	-0,20/ -0,16
N1	Без покрытия	-	-0,01/ +0,01	-0,24/ -0,25
N7	Без покрытия	-	+0,02/ +0,04	-0,22/ -0,25

Примечания:  
 1. Измерения проводились после нанесения покрытия;  
 2. Контроль толщины проводился по внутренней расточки муфт прибором «Константа К6»

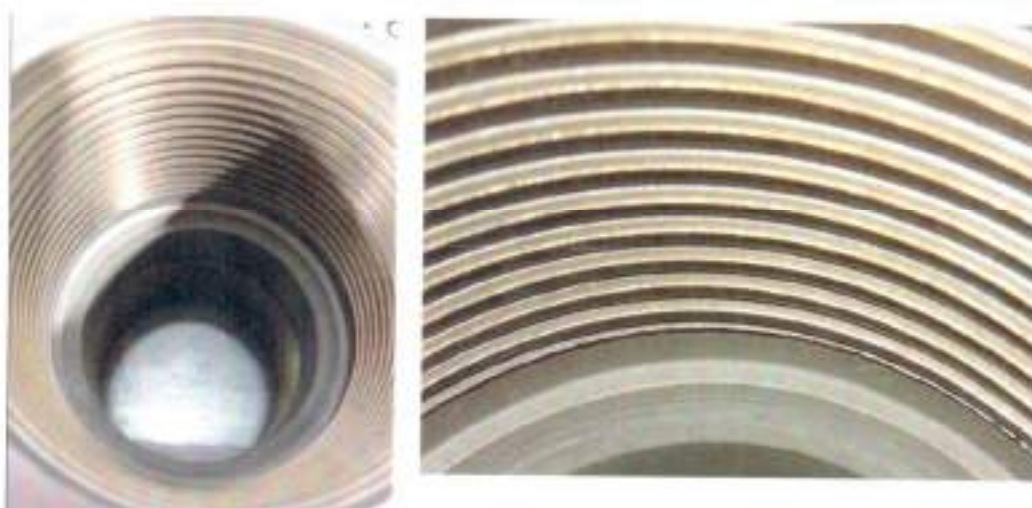


Рисунок 1. Внешний вид резьбовой поверхности муфт НКТ с двухслойным сухим твердосмазочным покрытием полученным методом ТДЦ + ПГИ

Из данных таблицы 1 видно, что покрытие на обеих муфтах отличается значительной неоднородностью по толщине (разбег значений толщин от 21 – до 31мкм). В среднем толщина покрытия на муфтах значительная – от 46 до 61мкм.

Основная толщина обусловлена ТДЦ-покрытием, толщина слоя полимера не превышает 7мкм (по данным ООО «Технологии плакирования»).

Контроль профиля резьбы муфт с нанесенным покрытием выявил уменьшение ширины профиля впадины: отклонение составило 0,02 мм от допустимого предельного значения. Выявленное отклонение не должно влиять на условия сборки соединения, т.к. конструктивно в нем присутствует зазор по направляющим граням резьбы, равный 0,123 мм. Протокол контроля и профиль резьбы приведены на рисунке 2.



Рисунок 2 Профиль резьбы (а) и протокол контроля (б) профиля резьбы муфты

Для уточнения общей толщины покрытия и вклада каждого из видов (ТДЦ, ПГИ) в общую толщину необходимо провести исследование покрытия металлографическим методом на шлифах.

Испытаниям на «свинчивание – развинчивание» подвергали два соединения:

- M2A + N1 (соединение близко к номиналу),
- M3B + N7 (тугое соединение).

Подробные результаты испытаний представлены в таблице 1 Приложения 1.

В ходе испытаний по «свинчивание-развинчивание» выявлено следующее.

1. Резьбовое соединение M2A + N1 (номинальное) **выдержало 11 циклов** «свинчивания-развинчивания». При этом после 8 циклов «свинчивания-развинчивания» во впадинах резьбы на последних контактных витках ниппеля замечены микроцарапины<sup>1</sup>, развивающиеся при последующих циклах. После 11 циклов во впадинах резьбы наблюдались на последних контактных витках небольшие задиры.
2. Резьбовое соединение M3B + N7 (тугое) **выдержало 11 циклов** «свинчивания-развинчивания». При этом после первого цикла на последних витках ниппеля были отмечены микроцарапины<sup>1</sup>, мало изменяющиеся при последующих свинчиваниях. После 8 цикла микроповреждения замечены и на муфте. После 11 циклов существенного развития микроповреждений не наблюдалось.
3. В ходе испытаний наблюдалась приработка покрытия:
  - слабое шелушение покрытия в ходе его приработки;

<sup>1</sup> Зачистка резьбовой поверхности после обнаружения микроповреждений, допускающаяся РЗ 00186619-053-2017, не проводилась.

- образование полосы темного цвета с зеркальным блеском на муфте в местах максимального контакта поверхностей;
  - частичный перенос покрытия на ответную часть (ниппельный конец) в виде полос темного цвета по местам максимального контакта (уплотнение металл-металл);
  - частичное разрушение и перенос покрытия по местам максимальных контактов способствует дополнительному увеличению его противозносных свойств при работе резьбового соединения (эффект «самосмазывания»).
4. При проведении испытаний наблюдалось значительное увеличение момента свинчивания. Так, на МЗВ + N7 (тугое по резьбе и уплотнению) для получения графика с достаточной величиной докрепления момент был увеличен до 9500 Нм, вместо рекомендуемого 3500 Нм для данного типоразмера. Также следует отметить отсутствие стабильности в диаграммах свинчивания от цикла к циклу. Вероятной причиной увеличения момента и нестабильности диаграмм свинчивания может являться значительная неравномерность при нанесении покрытия на резьбу, его высокая толщина и ряд свойств (ТДЦ-покрытие достаточно твердое, плоходеформирующееся). Установить фактическую толщину на каждом элементе резьбового соединения неразрушающими методами контроля не представляется возможным. Для исключения возможных проблем при сборке соединений, необходимо добиться равномерности при нанесении покрытия.
  5. Наблюдалось нагревание резьбового соединения МЗВ + N7 (тугое по резьбе и уплотнению) особенно на 4-6 циклах (до 75°С), что потребовало дополнительного охлаждения муфты. При последующих циклах нагревание стало меньше, очевидно, вследствие приработки покрытия. В целом нанесение полимера методом ПГИ позволило уменьшить склонность резьбового соединения к нагреванию (по сравнению с предыдущими испытаниями ТДЦ покрытий ООО «Вика-Гал» с жидким полимером, акт-заключение №13 от 09.12.2019г).

#### **Подготовка свертки для последующих испытаний на герметичность.**

Муфта МЗ была использована для изготовления свертки для испытаний на герметичность резьбового соединения при действии растягивающих нагрузок и внутренним давлением. При этом сторону МЗВ свинчивали после 11 циклов «свинчивания – развинчивания», сторона МЗА не подвергалась испытаниям на свинчивание. Свинчивание производили с увеличенными моментами, подобранными ранее в ходе испытаний на «свинчивание- развинчивание». Замечаний к моментам сборки соединения и графикам свинчивания нет.

Результаты свинчивания в процессе подготовки свертки приведены в таблице 1 приложения 1.

#### **Выводы по результатам проведения испытаний**

1. Результаты испытаний комбинированного твердосмазочного покрытия системы ТДЦ + ПГИ оказывают положительное влияние на износостойкость резьбового соединения для муфт НКТ. Все испытываемые образцы успешно выдержали 11 циклов свинчивания-развинчивания.
2. При проведении экспериментов на «свинчивание-развинчивание» было установлено, что после 11 циклов, существенного износа покрытия и развития микрповреждений в многослойном покрытии не наблюдалось.
3. При проведении испытаний наблюдалось значительное увеличение момента свинчивания и отсутствие стабильности в диаграммах свинчивания от цикла к циклу.
4. Измерение образцов муфт, а также анализ диаграмм свинчивания показал, что основным направлением доработки данного вида покрытия является необходимость получения покрытий заданной толщины, равномерно распределенных по всем элементам резьбы.

5. Необходимо продолжить работы по исследованию свойств покрытия типа ТДЦ + ПГИ в соответствии с рекомендациями, изложенными в приложении 2.

Начальник ОРТНГО		И.В. Щербаков
Начальник ГРСКП		А.В. Забояркин
Ведущий инженер-исследователь ОРТНГО		Н.А. Девятерикова
Ведущий инженер-исследователь ГРСКП		Ф.А. Богданов

СОГЛАСОВАНО:

Директор ООО «Вика-Гал»

 Р.Г. Галин

Академик РАН, д.т.н., профессор

 К.В. Григорович

д.т.н., профессор

 С.И. Платов

к.т.н., доцент

 Р.Р. Дема


Академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор

 П.А. Витязь

д.т.н., профессор

 В.Л. Басинюк

к.т.н., доцент

 М.А. Леванцевич



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

# УРАЛЬСКИЙ ТРУБНЫЙ ЗАВОД

Адрес: 623107, Свердловская обл., г. Первоуральск, ул. Сапо и Вацетти, 28  
623103, Свердловская обл., г. Первоуральск, ул. Сантехзелений, 34  
(3438) 297-501, 297-502, факс: (3438) 297-530, 297-378  
e-mail: market@trubprom.com, www.ursitrubprom.ru



УТВЕРЖДАЮ:

Исполнительный директор

ОАО «Уральский трубный завод»  
к.т.п. Михалев А.В.



«12» октября 2021 г.

## АКТ ИСПЫТАНИЯ

Резьбовых соединений с покрытиями, полученных методом плакирования гибким инструментом (брашнинг)

### Краткое описание выполненных работ.

Для повышения ресурса резьбовых соединений насосно компрессорных труб (НКТ), производимых ОАО «Уральский трубный завод» проведено исследование о возможности применения различных функциональных покрытий на поверхностях резьбы. Предложено сформировать на поверхностях резьбовых соединений антифрикционное медьсодержащее покрытие (аналог сухого твердосмазочного покрытия). Для нанесения покрытия был применен метод ПГИ (плакирование гибким инструментом - брашнинг).

По технологии «брашнинг» была произведена обработка серии муфт условным размером 73 мм, изготовленных из углеродистых марок сталей. Толщина сформированного покрытия определялась при помощи толщиномера Константа К5.

### Методы исследования.

Испытания на «свинчивание-развинчивание» производили на муфтонаверточной машине СКР-500. Свинчивание производили с патрубками с резьбовым соединением Т100 (без покрытия) из углеродистых марок сталей. После каждого цикла «свинчивания-развинчивания» производился осмотр резьбового соединения на предмет наличия повреждений на поверхности резьбы и уплотнения ниппеля и муфты.

Оценка внешнего вида, толщины покрытия на резьбовой поверхности и параметров резьбы муфт и ниппельных концов приведены в таблице.

Таблица Характеристики опытных муфт и ниппелей

Номер муфты (М), ниппеля (N)	Внешний вид покрытия резьбы	Толщина покрытия, мкм
M2A	Покрытие муфты серого цвета гладкое, блестящее, желтоватым отливом	56,4
M2B	Покрытие муфты серого цвета гладкое, блестящее с желтоватым отливом	65,3
N1	Без покрытия	-
N2	Без покрытия	-



**Результаты исследования.**

1. Резьбовое соединение M2A + N1 выдержало 11 циклов «свинчивания-развинчивания». После 8... 9 циклов «свинчивания-развинчивания» во впадинах резьбы на последних контактных витках ниппеля замечены микроцарапины, развивающиеся при последующих циклах. После 11 циклов во впадинах резьбы наблюдались на последних контактных витках небольшие задиры. Наличие задиров в целом не повлияло на работоспособное состояние резьбовых соединений

2. Резьбовое соединение M2B + N2 выдержало 11 циклов «свинчивания-развинчивания». При этом после первого цикла на последних витках ниппеля были отмечены микроцарапины, мало изменяющиеся при последующих циклах. После 11 циклов существенного развития микроповреждений не наблюдалось.

3. В ходе проведения испытаний наблюдалась приработка покрытия, выраженная в:

- незначительном шелушении покрытия в ходе его приработки;
- образовании полосы темного цвета с зеркальным блеском на муфте в местах максимального контакта поверхностей;
- частичного переноса покрытия на ответную часть (ниппельный конец) в виде полос темного цвета по местам максимального контакта (уплотнение металл-металл);
- частичного разрушения и переноса покрытия по местам максимальных контактов, способствующее дополнительному увеличению его противозносных свойств при работе резьбового соединения (эффект «самосмазывания»).

**Заключение по результатам испытаний**

Технология нанесения функциональных покрытий на муфтовые резьбовые соединения насосно компрессорных труб методом плакирования гибким инструментом (брашнинг) рекомендуется к дальнейшей адаптации к условиям производства и внедрению на ОАО «Уральский трубный завод».






Согласовано:

От предприятия: ОАО «Уральский трубный завод»:

Коммерческий директор, к.т.н.  М.М. Шевелев  
Директор по управлению качеством  И.О. Мочалова  
Заместитель директора по технологиям  Д.В. Гребнев  
Технический директор – главный инженер  А.А. Эргашев

От авторского коллектива:

Научный руководитель,  
д.т.н., профессор  С.И. Платов  
Академик РАН, д.т.н., профессор  К.В. Григорович  
Академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор  Н.А. Витязь  
д.т.н., проф.  В.Л. Баснюк  
к.т.н., доцент  Р.Р. Дема  
к.т.н., доцент  М.А. Леванцевич  
ст. препод.  Е.В. Пилипчук



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
**УРАЛЬСКИЙ ТРУБНЫЙ ЗАВОД**

Адрес: 623107, Свердловская обл., г. Первоуральск, ул. Сахко и Ванцетти, 28  
623103, Свердловская обл., г. Первоуральск, ул. Санголидский, 34

(3436) 297-501, 297-502 факс: (3436) 297-530, 297-376  
e-mail: market@tubzavod.com, www.uraltubzavod.ru



УТВЕРЖДАЮ:

Исполнительный директор  
ОАО «Уральский трубный завод»  
к.т.н. Михалев А.В.



*А.В. Михалев*

«12» октября 2021 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

технологии нанесения функциональных покрытий методом плакирования гибким инструментом (брашинг) на резьбовые соединения муфтовых соединений для насосно компрессорных труб

#### Краткое описание выполненных работ

С целью повышения ресурса резьбовых для муфтовых резьбовых соединений насосно компрессорных труб (НКТ), было предложено использовать в качестве сухого твердосмазочного материала антифрикционное медьсодержащее покрытие. Для нанесения покрытия был использован метод ПГИ (плакирование гибким инструментом - брашинг). Технология нанесения функциональных покрытий была реализована авторским коллективом в составе: академик РАН, д.т.н., проф. К.В. Григорович, проф., д.т.н. С.И. Платов, к.т.н., доцент Р.Р. Дёма, академик НАН Беларуси, д.т.н., проф. П.А. Витязь, проф., д.т.н. В.Л. Басинюк, к.т.н., доцент М.А. Леванцевич, ст. препод. Е.В. Пилипчук.

Кроме того:

1. Подобран материал и разработана технология нанесения износостойких твердосмазочных медьсодержащих покрытий на резьбовые соединения муфт и ниппелей (ниппельных концов).
2. Отработана технология нанесения медьсодержащих износостойких твердосмазочных покрытий на резьбовые соединения муфт и ниппелей (ниппельных концов).

#### Проведены испытания с положительным результатом:

- износостойкости твердосмазочных покрытий на резьбовых соединениях муфт и ниппелей (ниппельных концов). Результаты испытаний показывают увеличение ресурса работы резьбовых соединений не менее чем в два раза;
- коррозионные испытания обработанных муфт и ниппелей (ниппельных концов) по ГОСТ 9.509;
- испытания на герметичность по СТО Газпром 2-4.1-229-2008.

#### Полученные результаты:

1. Все испытываемые образцы успешно выдержали 11 циклов «свинчивания-развинчивания», при рекомендуемых не менее 4-5 циклах. Результаты испытаний показывают увеличение ресурса работы резьбовых соединений не менее чем в два раза.
2. При проведении экспериментов на «свинчивание-развинчивание» было установлено, что после 11 циклов, существенного износа покрытия и развития микрповреждений в многослойном покрытии не наблюдалось.



Адрес: 623107, Свердловская обл., г. Первоуральск, ул. Саака и Венцетти, 28  
 623103, Свердловская обл., с. Первоуральск, ул. Сентехнологий, 34  
 (3439) 297-501, 297-502. Факс: (3439) 297-530, 297-378  
 e-mail: market@tutprom.com, www.uralpipeprom.ru

3. Наблюдались стабильные значения момента свинчивания и стабильность в диаграммах свинчивания от цикла к циклу.

4. Все исследуемые образцы успешно прошли коррозионные испытания по ГОСТ 9.509, а также на герметичность по СТО Газпром 2-4.1-229-2008

Разработанная технология нанесения функциональных покрытий методом плакирования гибким инструментом (брашинг) на резьбовые соединения муфт насосно компрессорных труб внедрена на предприятии ОАО «Уральский трубный завод» с 2020 года.

Фактический экономический эффект с начала применения разработанной технологии нанесения функциональных покрытий муфтовых резьбовых соединений с применением метода плакирования гибким инструментом составил 73 984 000 руб.\*

Согласовано:

Коммерческий директор, к.т.н.

Шевелев М.М.

Директор по управлению качеством

Мочалова Н.О.

Заместитель директора по технологиям


Гребнев Д.В.

Технический директор – главный инженер

Эргашев А.А.

\*Расчет экономической эффективности произведен без взаимных финансовых обязательств

УТВЕРЖДАЮ  
Начальник научно-технического  
центра ПАО «ММК»

 Картунов А.Д.  
« 3 » « 11 » 2022 г.

#### **АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов работ по договору № 248455 от 10 сентября  
2021 г.

по теме: «Разработка технических решений,  
направленных на увеличение надежности и долговечности лезвий ножей  
станов 170, 370 и 450 СЦ ПАО «ММК»

#### **Краткое описание выполненной работы**

В ходе работы выполнены следующие мероприятия:

1. Проведен анализ условий эксплуатации отрезных ножей сортовых станов 170, 370 и 450 ПАО «ММК».
2. Определен характер и вид изнашивания лезвий отрезных ножей. Произведен подбор химического состава стали и выбран материал, применяемый для изготовления новых ножей.
3. Представлено обоснование выбранной технологии изготовления и/или восстановления и/или упрочнения изнашиваемой части лезвий ножей сортовых станов 170, 370 и 450 ПАО «ММК».
4. Проведены лабораторные испытания на ударно-абразивное изнашивание, а также, на абразивное изнашивание при использовании различных абразивов.
5. Проведено математическое моделирование процессов изнашивания восстановленных и упрочненных поверхностей лезвий отрезных ножей.
6. Проведена оценка эксплуатационных свойств защитных покрытий.

#### **Полученный результат**

1. Разработана и передана Заказчику технологическая карта ремонтных работ для восстановления отрезных ножей горячей резки для станов 170, 370 и 450 по технологии плазменно-порошковой наплавки с использованием наплавочных порошков.
2. Разработаны и согласованы с Заказчиком «Технические условия на разработанный состав защитных покрытий».
3. Произведено восстановление и введение в эксплуатацию изношенных ножей горячей резки.

По результатам эксплуатации восстановленных ножей горячей резки зафиксировано повышение стойкости в среднем на 35 %, а именно:

Отрезные ножи горячей резки стана	Стойкость, тыс. тонн
170	35-37
370	32-35
450	38-40

Также зафиксировано снижение выхода брака и НП по дефекту смятые концы и недокат до 15%.

Разработана технология замены режущей части по аналогии с применяемыми фиксаторами на токарных резцах.

**Выявление по результатам НИОКР источника, который может причинить вред здоровью или травмы (не выявлено/выявлено с указанием источника)**

Не выявлено

**Способность к правовой охране полученного результата**

Отсутствует

Дата фактического внедрения «14» июня 2022г.

Срок полезного использования 1,5 месяца

Зам. начальника ЦС

по технологии

Руководителя отдела исполнения ООО «Рнд МГТУ»

Научный руководитель

д.т.н., доцент каф. МИТОДИМ  
ФГБОУ ВО «МГТУ им.г.И. Мосова»

Научный сотрудник

Научный сотрудник


Научный сотрудник

Научный сотрудник


 С.С. Аликулов

 Л.С. Попов

 Р.Р. Дена

 С.П. Нефедьев

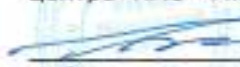
 Р.Н. Амиров

 О.Р. Латыпов

 М.В. Харченко

УТВЕРЖДАЮ

Начальник научно-технического  
центра ПАО «ММК»

 Картунов А.Д.  
« 3 » « 11 » 2022 г.

#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов работ по договору № 248584 от 04 октября 2021 г.  
по теме: «Разработка технических решений, направленных на  
увеличение производительности и повышение качества производимой  
продукции станов 170, 370 и 450 ПАО «ММК»

#### Краткое описание выполненной работы

В ходе работы выполнены следующие мероприятия:

1. Проведен анализ условий эксплуатации лупперов сортовых станов 170, 370 и 450 ПАО «ММК».
2. Определен характер и вид изнашивания лупперов, исследована структура изношенных роликов.
3. Произведен подбор химического состава и выбран материал, применяемый для восстановления лупперов.
4. Проведено испытание на абразивную и гидроабразивную износостойкость исследованных покрытий в сравнении с традиционно применяемыми материалами для восстановления роликов. Разработаны технические условия на разработанный состав защитных покрытий.
5. Представлен анализ силовых факторов эксплуатации петлеобразователей. Произведен кинематический анализ плоского механизма – механизма петлеобразователя сортового стана.
6. Предложен и реализован алгоритм, позволяющий аналитически определять объем изношенной поверхности ролика петлеобразователя (луппера).
7. Представлено обоснование выбранной технологии восстановления и/или упрочнения изнашиваемой части оборудования (лупперов) сортовых станов 170, 370 и 450, направленной на повышение их эксплуатационных характеристик.

#### Полученный результат

1. Разработана и передана Заказчику технологическая карта ремонтных работ для восстановления оборудования (лупперов) для станов 170, 370 и 450 по технологии плазменно-порошковой наплавки с использованием наплавочных порошков.
  2. Разработаны и согласованы с Заказчиком «Технические условия на разработанный состав защитных покрытий».
  3. Произведено восстановление и введение в эксплуатацию изношенного оборудования (лупперов).
- По результатам эксплуатации восстановленного оборудования (лупперов) зафиксировано повышение стойкости в среднем на 25 %, а именно:

Оборудование (лупперов) стана	Стойкость, тыс. тонн
170	15-16
370	15-16
450	25-27

Также зафиксированно снижение выхода брака и НП по дефекту «овальность, закат, плена прокатная и ус» до 15%.

**Выявление по результатам НИОКР источника, который может причинить вред здоровью или травмы (не выявлено/выявлено с указанием источника)**

Не выявлено

**Способность к правовой охране полученного результата**

Отсутствует

Дата фактического внедрения «14» июня 2022г.

Срок полезного использования 1,5 месяца

Зам. начальника СЦ  
по технологии

Руководитель отдела исполнения  
ООО «Рнд МГТУ

Научный руководитель  
д.т.н., доцент каф. МитОДИМ  
ФГБОУ ВО «МГТУ им.г.И. Носова»

Научный сотрудник

Научный сотрудник

Научный сотрудник

Научный сотрудник

 С.С. Артыкулов

 Л.С. Попов

 Р.Р. Дежа

 С.П. Нефедьев

 Р.Н. Амиров

 О.Р. Латыпов

 М.В. Харченко

УТВЕРЖДАЮ  
Главный инженер ОАО «ММК»  
С. Н. Ушаков  
« » 2021 года



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**результатов НИОКР по созданию Производственно-аналитического комплекса (ПАК) на потоке ЖРС аглофабрики № 4 ГОП ОАО «ММК», выполненной по договору № 153208**

#### **Краткое описание выполненной работы:**

На аглофабрике № 4 создан производственно-аналитический комплекс (ПАК) для определения химического состава железорудной смеси в режиме реального времени подаваемой в бункеры аглофабрики. ПАК включает в себя: рентгено-флуоресцентный анализатор CON-X 02, механизированный пробоотборник, систему подвески анализатора над конвейером, систему защиты анализатора от ударов, математическую модель расчета химического состава ЖРС, загружаемой в бункер аглофабрики, математическую модель расчета расхода флюса. В процессе создания ПАК были исследованы стационарный режим работы анализатора и плавающий с различными вариантами системы подвески. Проведены градуировки анализатора в различных режимах работы (в лабораторных условиях со стандартными образцами и в производственных условиях с отбором контрольных проб материалов с конвейера Ш1 механическим пробоотборником). Проведены промышленные испытания работы ПАК. Составлена инструкция по обслуживанию ПАК и подготовлены изменения в технологическую инструкцию «Спекание офлюсованного агломерата на аглофабрике № 4 ГОП» № ТИ-101-ГОП-10-2008 (взамен ТИ-101-ГОП-10-2005) и технологическую инструкцию «Опробование привозного железорудного сырья, агломелочи, флюсов, компонентов шихты и шихты для агломерации в цехах ГОП ОАО «ММК» ТИ -101-ГОП-8-2008 (взамен ТИ -101-ГОП-8-2003).



**Полученный результат:**

Производственно-аналитический комплекс принят в промышленное использование на аглофабрике № 4 ГОП ОАО ММК в режиме советчика дозировщика, что привело к значительному повышению точности определения  $Fe_{общ}$ , CaO и В (основности) в ЖРС. Точность определения содержания железа общего составляет 0,3 %, оксида кальция – 0,1 %, основности – 0,07 ед. До внедрения ПАК среднее содержание компонентов в порции ЖРС равной 1 бункеру определялось по разовым пробам из-под бункеров с точностью для  $Fe_{общ}$  1,2 %, CaO 0,5 %, В 0,2 ед., либо по паспорту штабеля СК с точностью для  $Fe_{общ}$  0,8 %, CaO 2 %, В 0,3 ед. Внедрение ПАК позволило осуществить оперативный контроль за химическим составом ЖРС в режиме реального времени (до внедрения ПАК данные о химическом составе ЖРС по отобраным разовым пробам приходили через 1,5 часа после выработки бункера), повысить ровность агломерата по основности на 1 % (согласно требованиям СТО 2031-2007).

**Дата фактического внедрения:**

сентябрь 2021

**Срок полезного использования:**

не ограничен

Начальник агломерационного цеха

В. Ю. Савинов

Директор по стратегическому развитию

Е. Н. Ишметьев

ЗАО «КонсОМ СКС»

Научный руководитель

А. И. Ушеров

Согласовано:

Главный инженер ГОП

А. П. Гаврилок

Начальник технологического управления

В. В. Галкин

нач. тех. бюро ГОП  
Росси́нск  
18. 11. 2021г.

УТВЕРЖДАЮ  
Главный инженер ЗАО «ММК»  
С. Н. Ушаков  
«    » 2021 года



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ № 0612**  
**результатов работ по договору № 144301**  
**по теме: «Разработка, изготовление и испытание опытной конструкции**  
**механизированного пробоотборника шихтовых материалов»**

Краткое описание выполненной работы: Разработана конструкция, выполнена эскизировка, выдано задание, согласованное с ЗАО «МРК» на изготовление рабочих чертежей опытного образца пробоотборника на конвейере № Ш-1 аглоцеха. Пробоотборник изготовлен и установлен на конвейере № Ш-1 аглофабрики № 4.

**Полученный результат:** Автоматически отбирается накопительная проба материала за период установленный технологами аглоцеха (вместо «точечной» пробы в существующем контроле потоков сырья).

Дата фактического внедрения «15» декабря 2021г.

Срок полезного использования 2 года.

Начальник аглоцеха \_\_\_\_\_  **В.Ю. Савинов**

Научный руководитель \_\_\_\_\_  **А.И. Ушаков**

Согласовано:

Начальник технологического управления \_\_\_\_\_  **В.Л. Носов**

Начальник ГОП \_\_\_\_\_  **В.И. Гладских**