

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ, ТЕХНИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ISSN 2306-8493

Научно-технический журнал

2020. Т. 11. №1

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38)

## Редколлегия:

### Председатель:

проф., д-р техн. наук *О.Н. Тулупов*

### Заместитель председателя:

проф., д-р техн. наук *О.С. Логунова*

### Ответственные редакторы:

доц., д-р техн. наук *С.М. Андреев*

канд. ист. наук *О.А. Голубева*

доц., канд. пед. наук *Н.В. Кузнецова*

доц., канд. ист. наук *Н.Н. Макарова*

доц., канд. пед. наук *Е.А. Москвина*

доц., канд. техн. наук *Е.Г. Нешипоренко*

доц., канд. техн. наук *Н.А. Осинцев*

доц., канд. техн. наук *К.Г. Пивоварова*

### Главный редактор:

канд. техн. наук *С.В. Пыхтунова*

### Редактор: *Н.П. Боярова*

### Технический

редактор: *Т.В. Леонтьева*

© ФГБОУ ВО «МГТУ  
им. Г.И. Носова», 2020

### Адрес редакции:

455000, Челябинская обл.,  
г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».  
Тел. (3519) 29-84-63.  
E-mail: pio@magtu.ru

### Адрес издателя:

455000, Челябинская обл.,  
г. Магнитогорск, пр. К.Маркса, 45/2,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,  
издательский центр.

### Адрес типографии:

455000, Челябинская обл.,  
г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,  
участок оперативной полиграфии.

Сведения о журнале размещаются  
в базах данных РИНЦ, ВИНТИ  
и в сети Интернет.

16+, в соответствии с Федеральным  
законом №436-ФЗ от 29.12.10.

Выход в свет 28.08.2020 г. Заказ 220.  
Тираж 500 экз. Цена свободная.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Гоготин А.А., Тарабаев А.С.**

Разработка технологических схем при совмещении процесса складирования отходов в выработанное пространство карьера и доработки месторождения подземным способом..... 3

**Саймаганбетова Н.К., Серик Ж.С., Андреева О.С., Естауова Ж.К., Дегодя Е.Ю.**

Совершенствование технологии обогащения хромовых руд Южно-Кемпирсайского месторождения ..... 6

**Грушо-Новицкая А.В., Полякова М.А.**

S-образная модель развития технологической системы «производство горячекатаного стального проката»..... 10

**Бигеев В.А., Сычков А.Б., Исаев М.К.**

Сравнительный анализ применения кальциевых материалов для раскисления и легирования стали ..... 17

**Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П., Ляшева Ю.С.**

Повышение эффективности функционирования главных линий широкополосных станов..... 21

**Махоткина Е.С., Шубина М.В.**

Извлечение ванадия из железорудного сырья..... 26

**Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Овчинникова М.В.**

Технология формообразования с применением связующих на водной основе в литье по выплавляемым моделям..... 29

**Рожков Г.К.**

Оптимизация калибровки валков на основе мультипоточного вычислительного эксперимента..... 32

**Смирнов А.Н., Крылова С.А., Сысоев В.И., Жусупова Ж.С., Никифорова В.М.**

Влияние марочной структуры угля на выход и характеристику продуктов полукоксования..... 37

**Сычков А.Б., Атангулова Г.Я., Агутин Г.В.**

Упрочнение фасонного проката на класс прочности 600 МПа ..... 42

**Рубцов В.Ю., Курочкин В.В., Шевченко О.И.**

Критерии отделения перемычки при прокатке шаров ..... 46

**Платов С.И., Дема Р.Р., Латыпов О.Р.**

Нейросетевая модель прогнозирования обжатий в чистой группе клетей на стане 2000 горячей прокатки ..... 49

**Наумов С.В., Панов Д.О., Артемов А.О., Игнатова А.М., Шекшеев М.А.**

Исследование физико-химических процессов получения функциональных материалов на основе минерального сырья Уральского региона и карбида SiC при помощи плазменного гранулирования ..... 53

**Журба А.Г., Наумов С.В., Белинин Д.С., Моргунов В.А., Артемов А.О.**

Ремонт вооружения, военной и специальной техники при помощи сварки под флюсом с использованием сварочных материалов из минерального сырья Уральского региона ..... 59

**Гаврилова И.В.**

Исследование рисков применения нейрокомпьютерных интерфейсов ..... 62

**Леднов А.В., Бараблин А.С.**

Математическая модель и алгоритмы системы учета и измерения веса и длины заготовок на МЗ «Электросталь Тюмени» ..... 65

<b>Иванова А.В., Михайлова У.В., Баранкова И.И.</b> Уязвимости биометрической защиты .....	68
<b>Пишнограев Р.С., Келехсашвили Р.Р., Келехсашвили И.С.</b> Разработка системы детектирования шлака при сливе стали из электродуговой печи.....	73
<b>Шманёв Д.Е., Кокорин И.Д., Рябчикова Е.С., Рябчиков М.Ю.</b> Система автоматического регулирования температуры стальной полосы на выходе отделения охлаждения .....	78
<b>Старкова Е.С., Иванова С.В., Варакина Е.А., Картавец С.В.</b> Исследование повышения эффективности использования природного газа в нагревательных печах стали перед прокаткой .....	82
<b>Дубовик А.О., Газизова О.В.</b> Анализ диагностики и испытаний подстанций 110/10 кВ .....	87
<b>Ефимова В.А., Варганова А.В.</b> Разработка методики определения оптимального места размещения реклоузеров в магистральных распределительных сетях 6-10 кВ .....	91
<b>Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ануфриев А.В.</b> Методика определения граничных значений суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжений дуг для диагностики стадий плавки в дуговой сталеплавильной печи.....	95
<b>Волкова Е.А., Кузьмина Д.В.</b> Переработка строительных отходов .....	99
<b>Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А.</b> Обеспечение заданного уровня качества на примере наружных и внутренних рулевых наконечников автомобиля на стадии проектирования изделия.....	101
<b>Медяник Н.Л., Пономарев А.П., Басков В.А., Кутасевич П.С., Филаретов П.А., Никитина А.Е., Голиков М.А.</b> Применение преобразователей ржавчины отечественного и зарубежного производства для противокоррозионной защиты металлопродукции .....	106
<b>Вайскрובה Е.С., Шагина Е.В., Михеева А.А.</b> Решение проблем качества и безопасности пищевой продукции на основе риск-ориентированного подхода.....	110
<b>Зяблицева М.А., Додонова Н.А.</b> Технологии производства продуктов питания, повышающих адаптивные способности организма во время стресса .....	113
<b>Долматова И.А., Зайцева Т.Н., Рябова В.Ф., Горелик О.В.</b> Биологическая роль витаминов .....	116
<b>Кадченко С.И., Рязанова Л.С., Торшина О.А., Пуршева А.В.</b> Обратные спектральные задачи на геометрических графах .....	120
<b>Абрамова Т.В.</b> Улучшение точности классификации методом обратного распространения параметра по иерархическому нечеткому дереву решений .....	126
<b>Москвина Е.А., Гибадатова Л.Р.</b> К вопросу о необходимости профилактики стрессов у школьников .....	128
<b>Белов В.К.</b> Микротопографические и фрактальные характеристики горизонтальных сечений шероховатых поверхностей .....	130
<b>Давыдов А.П., Злыднева Т.П.</b> Моделирование волновой функции в координатном представлении двух фотонов в запутанном состоянии .....	135

УДК 622.02; 622.23; 622.34; 622.06

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРИ СОВМЕЩЕНИИ ПРОЦЕССА СКЛАДИРОВАНИЯ ОТХОДОВ В ВЫРАБОТАННОЕ ПРОСТРАНСТВО КАРЬЕРА И ДОРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ

Гоготин А.А.<sup>1</sup>, Тарабаев А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

<sup>2</sup>ООО «УралГеоПроект», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Рассмотрены основные моменты совмещения процесса складирования отходов в выработанное пространство карьера и доработки месторождения подземным способом; приведены схемы размещения отходов обогащения в чаше отработанного карьера при различных системах доработки месторождения подземным способом.

**Ключевые слова:** хвосты обогащения, складирование отходов обогащения, схемы размещения отходов в чаше карьера, совмещение доработки месторождения и размещения отходов.

С каждым годом образование отходов горных предприятий существенно растет, при этом отмечается отсутствие свободных земель для размещения отвалов и хвостохранилищ.

В настоящее время площади земли под хвостохранилища только в Уральском регионе занимают более 503,7 га и имеется устойчивая тенденция к их увеличению, при ежегодном приросте текущих отходов до 15 млн т хвостов [1].

Вопрос размещения отходов обогащения руд актуален для месторождений Российской Федерации. Так как емкости существующих хвостохранилищ обогатительных фабрик исчерпаны, а выделение земель под новые хвостохранилища затруднено, назрела острая необходимость изыскания емкостей для размещения отходов обогащения, в качестве которых могут быть использованы пространства отработанных карьеров.

На сегодняшний день существует несколько видов консистенций хвостов обогащения:

1. Текущие хвосты обогащения.
2. В виде кека фильтрации («сухие»).
3. Сгущенные хвосты обогащения в виде пасты («полусухие»).

Помимо проблемы изыскания земель под хвостохранилища на рудниках России после отработки месторождения открытым и подземным способами возникают сложности с обработкой охранных целиков, расположенных на дне карьера.

Данная проблема актуальна для рудников Якутии, к примеру, рудники «Мир», «Айхал», «Удачный», на которых оставлены кимберлитовые «потолочины», разделяющие открытые горные работы от подземных.

В связи с этим предложен ряд схем по размещению отходов обогащения в чаше отработанных карьеров с одновременной обработкой охранных целиков («потолочины») (рис. 1).

Стоит отметить, что данные схемы возможны в случае тщательного расчета параметров и гранулометрического состава пригружаемого материала.

Из рис. 1 видно, что на схеме «а» осуществляется заполнение чаши карьера кеком, охранный целик отрабатывается по восходящей схеме с использованием слоевой системы разработки. На схеме «б» осуществляется заполнение чаши карьера кеком, охранный целик отрабатывается камерной системой разработки с закладкой. На схеме «в» осуществляется заполнение чаши карьера сгущенными хвостами обогащения (паста с содержанием твердого 70%), охранный целик отрабатывается по восходящей схеме с использованием слоевой системы разработки, но с частичным оставлением охранного целика. На схеме «г» осуществляется заполнение чаши карьера сгущенными хвостами обогащения, охранный целик отрабатывается камерной системой разработки с закладкой и частичным оставлением охранного целика. На схеме «д» осуществляется заполнение чаши карьера скальной породой, затем текущими хвостами, при этом происходит постоянная откачка воды по дренажным скважинам в дренажные выработки, охранный целик отрабатывается по восходящей схеме с использованием слоевой системы разработки, но с частичным оставлением охранного целика. На схеме «е» осуществляется заполнение чаши карьера скальной породой, затем текущими хвостами, при этом происходит постоянная откачка воды по дренажным скважинам в дренажные выработки, охранный целик отрабатывается камерной системой разработки с закладкой.

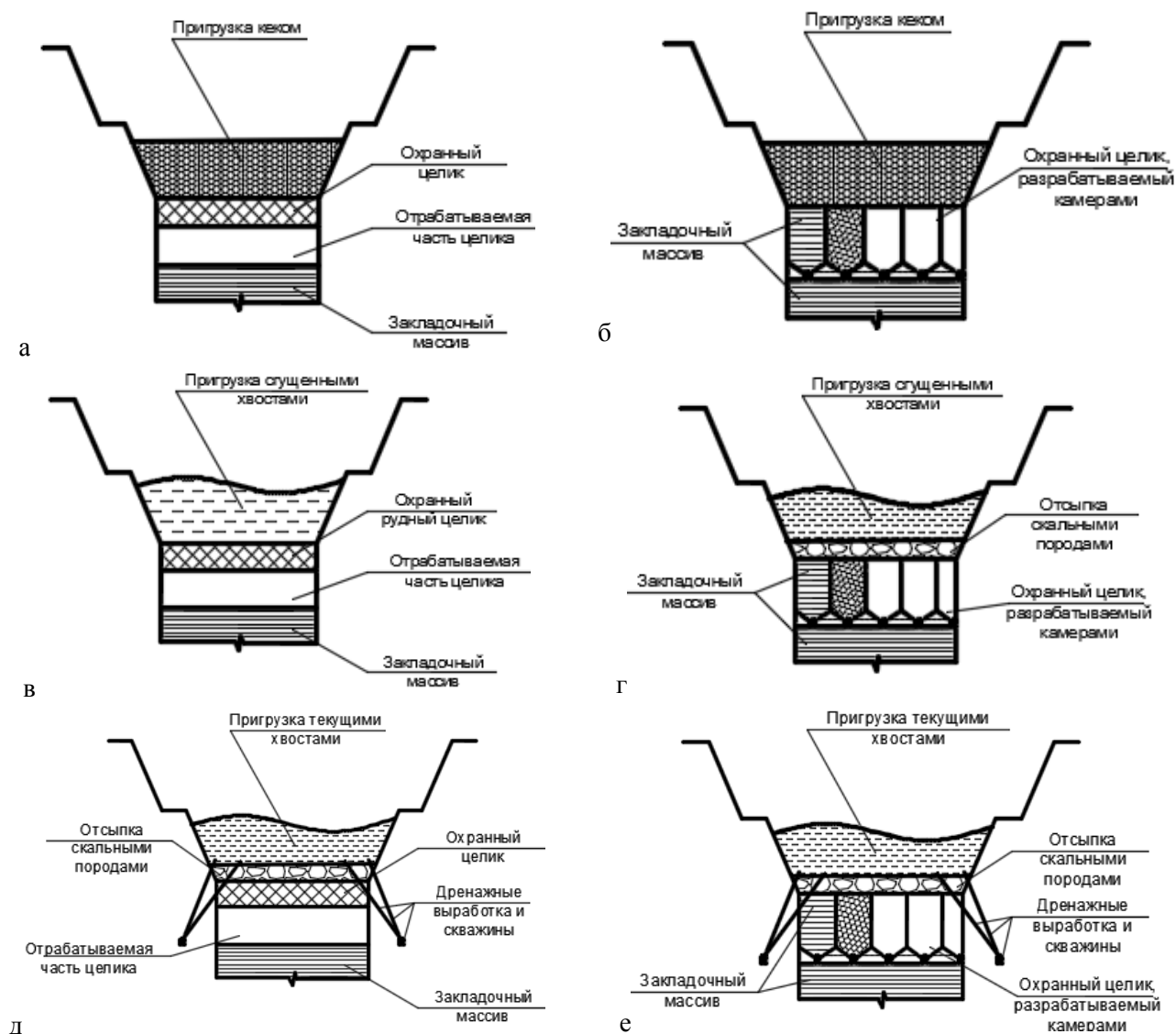


Рис. 1. Технологические схемы отработки охранных целиков в дне карьеров

Применение данных схем возможно в случае обоснования следующих параметров: размеров целика, параметров системы разработки, мощности и грансостава слоя отсева и т.д.

#### Список литературы

1. Зубков А.А. Обоснование параметров технологии формирования техногенных массивов из отходов обогащения в выработанном карьерном пространстве при открыто-подземной разработке медноколчеданных месторождений: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / Зубков Артем Анатольевич. Магнитогорск, 2013. 160 с.
2. Гидрогеологические и геомеханические условия формирования хвостохранилища в Главном карьере Высокогорского ГОКа / В.Т. Зотеев, О.В. Зотеев, Т.К. Костерова, С.Н. Тагильцев, В.В. Осламенко // Известия вузов. Горный журнал. 1995. №5. С.111–121.
3. Разработка технологии закладки Учалинского карьера сгущенными отходами обогатительного производства / О.В. Зотеев, В.Н. Калмыков, А.А. Гоготин, А.Е. Зубков, И.Х. Ахмедьянов, А.А. Зубков, Д.А. Бондаренко // Комплексное освоение месторождений полезных ископаемых: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2013. С.44–47.
4. Формирование охранный целика в дне Учалинского карьера с использованием твердеющей закладки на основе отходов обогащения / В.Н. Калмыков, А.А. Гоготин, И.А. Пыталев, В.А. Ангелов, А.А. Зубков, О.В. Зотеев // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых ученых: 10-я междунар. науч. школа молодых ученых и специалистов. М.: ИПКО РАН, 2013. С.79–81.
5. Калмыков В.Н., Гоготин А.А., Зубков А.А. Обоснование возможности применения сгущенных отходов обогатительного передела для закладки Учалинского карьера // 70-я научно-техническая конференция. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. Т.1. С.100–102.

6. Калмыков В.Н. Опытнo-промышленные испытания технологии закладки выработанного пространства Учалинского карьера отходами обогатительного передела / В.Н. Калмыков, О.В. Зотеев, Ан.А. Зубков, А.А. Гоготин, А.А. Зубков // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 7. С.4–9.

#### Сведения об авторах

**Гоготин Алексей Анатольевич** – канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: gogotin80@mail.ru.

**Тарабаев Андрей Сергеевич** – инженер, ООО «УралГеоПроект», г. Магнитогорск. E-mail: ferrum1992@mail.ru.



УДК 622.788.36:62-784

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ХРОМОВЫХ РУД ЮЖНО-КЕМПИРСАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Саймаганбетова Н.К.<sup>1</sup>, Серик Ж.С.<sup>1</sup>, Андреева О.С.<sup>2</sup>, Естауова Ж.К.<sup>2</sup>, Дегодя Е.Ю.<sup>2</sup><sup>1</sup>Донской ГОК – филиал АО «ТНК „Казхром”», г. Хромтау, Казахстан<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Технология обогащения хромовых руд Южно-Кемпирсайского месторождения на Донском ГОКе предусматривает обогащение крупных и мелких классов по развернутой гравитационной схеме с применением процессов отсадки, тяжелосредной и винтовой сепараций. В настоящее время актуальной задачей на предприятии является дообогащение шламовых хвостов. В статье показана целесообразность применения в технологической схеме процесса гидравлической классификации для эффективного удаления шламистых частиц породы и подготовки материала для дообогащения на концентрационных столах.

**Ключевые слова:** обогащение, хромовые руды, хромит, винтовая сепарация, гидравлическая классификация, концентрация на столах.

В современных условиях технологические процессы на обогатительных фабриках, перерабатывающих руды черных металлов, должны совершенствоваться в направлении сокращения энергозатрат и материалов на производство концентратов, обеспечения наиболее полного использования в производстве всех компонентов сырья, устранения вредного влияния обогатительного производства на окружающую среду [1]. Одновременно повышение эффективности обогатительного производства требует разработки и внедрения новых процессов и оборудования, технологических изысканий, обеспечивающих получение высоких технико-экономических показателей в условиях постепенного снижения качества исходного минерального сырья.

Казахстан активно совершенствует и развивает горную промышленность и занимает вторую позицию в мире по объемам добычи хромовых руд, по масштабам сырьевой базы и является крупным экспортером хромовых руд, продуцентом и поставщиком феррохрома за рубеж [2]. Его вклад в мировое производство товарных хромовых руд составляет 15-20%. В частности, АО «ТНК „Казхром”» является одним из крупнейших мировых производителей хромовой руды и ферросплавов с уникальной ресурсной базой и самым низким уровнем удельных затрат; занимает 2-е место в мире по объемам производства и поставок хромовых сплавов и 1-е место – по качеству хромовой руды (рис.1, 2) [3].

В состав АО «ТНК „Казхром» входит Донской горно-обогатительный комбинат, перерабатываю-

щий хромовые руды Южно-Кемпирсайского месторождения [4].

подавляющая часть запасов хромовых руд в месторождениях Кемпирсайского массива отличаются достаточно высокой массовой долей  $Cr_2O_3$  (до 50%), а массовая доля железа и вредных примесей (фосфора, серы, кремнезема) невелика. Основными рудными минералами являются хромит и магнохромит (группа хромшпинелидов), нерудным – серпентинит. По текстурным особенностям руды представляют вкрапленники зерен хромшпинелидов в серпентините разной густоты.

В настоящее время технология обогащения хромовых руд Южно-Кемпирсайского месторождения на Донском ГОКе предусматривает обогащение крупных и мелких классов по развернутой гравитационной схеме с применением процессов отсадки, тяжелосредной и винтовой сепараций [5]. Практика работы предприятия показала, что по классу 10-160 мм эффективность работы тяжелосредных сепараторов достаточно высокая и составляет более 70%, а эффективность работы отсадочных машин, работающих на руде крупностью 10-0 мм, составляет менее 30%. При этом промпродукт отсадочной машины после обесшламливания поступает на винтовые сепараторы, где после сепарации шламовые хвосты с высокой массовой долей  $Cr_2O_3$  (до 30,0%) транспортируются в хвостохранилище.

Для доизвлечения оксида хрома из богатых шламовых хвостов на предприятии поставлен вопрос доработки и модернизации текущей схемы обогащения с целью повышения производства хромового концентрата с массовой долей  $Cr_2O_3$ , равной 51,0% при одновременном обеднении хвостов.





Рис. 1. Показатели деятельности АО «ТНК „Казхром“»



Рис. 2. Добыча и переработка хромовых руд АО «ТНК „Казхром“»

Основной проблемой обогащения шламовых хвостов является наличие глинисто-слюдистых агрегатов, в которых сконцентрирована основная часть ценного компонента. Гранулометрический и химический анализы хвостов винтовой сепарации (питания гидроклассификатора) представлен в таблице (результаты опробования за 2017 год).

Гранулометрический и химический анализ шламовых хвостов

Класс крупности, мм	питание гидроклассиф. №1				
	γ, %	γ от исх, т/ч	β, %	ε%	Me, т/ч
+1	0,70	<b>0,06</b>	8,0	<b>0,02</b>	0,005
-1+0,5	4,26	<b>0,38</b>	7,1	<b>0,07</b>	0,027
-0,5+0,16	15,00	<b>1,34</b>	11,7	<b>2,01</b>	0,157
-0,16+0,071	23,03	<b>2,06</b>	29,7	<b>29,54</b>	0,613
-0,071	57,01	<b>5,10</b>	44,4	<b>68,36</b>	2,267
<b>Итого</b>	<b>100,0</b>	<b>8,95</b>	<b>34,30</b>	<b>100,0</b>	<b>3,07</b>

+ 0,071 мм	43,0	3,85	20,9	31,6	0,80
- 0,071 мм	57,0	5,10	44,4	68,4	2,27
<b>Итого</b>	<b>100,0</b>	<b>8,95</b>	<b>34,3</b>	<b>100,0</b>	<b>3,07</b>

Результаты гранулометрического и химического анализов шламовых хвостов в таблице показывают высокую массовую долю оксида хрома β=44,4% в классе -0,071 мм. Выявлено, что данный класс крупности -0,071 мм является труднообогатимым, но при этом представляет большой практический интерес и его извлечение позволит получить дополнительный товарный продукт. При этом повышение массовой доли оксида хрома в данном продукте возможно путем удаления шламистых глинисто-слюдяных частиц в хвосты. Крупные классы +0,5 мм содержат менее 10% оксида хрома и их необходимо удалять в хвосты. Частицы крупностью -0,5+0,071 мм требуют дополнительной переработки.

Учитывая особенности минерального состава шламовых хвостов с повышенным содержанием глинисто-слюдистых агрегатов, в технологической схеме предложена целесообразность применения процесса гидравлической классификации для эффективного удаления шламистых частиц породы и подготовки материала для дообогащения на концентрационных столах (рис. 3).

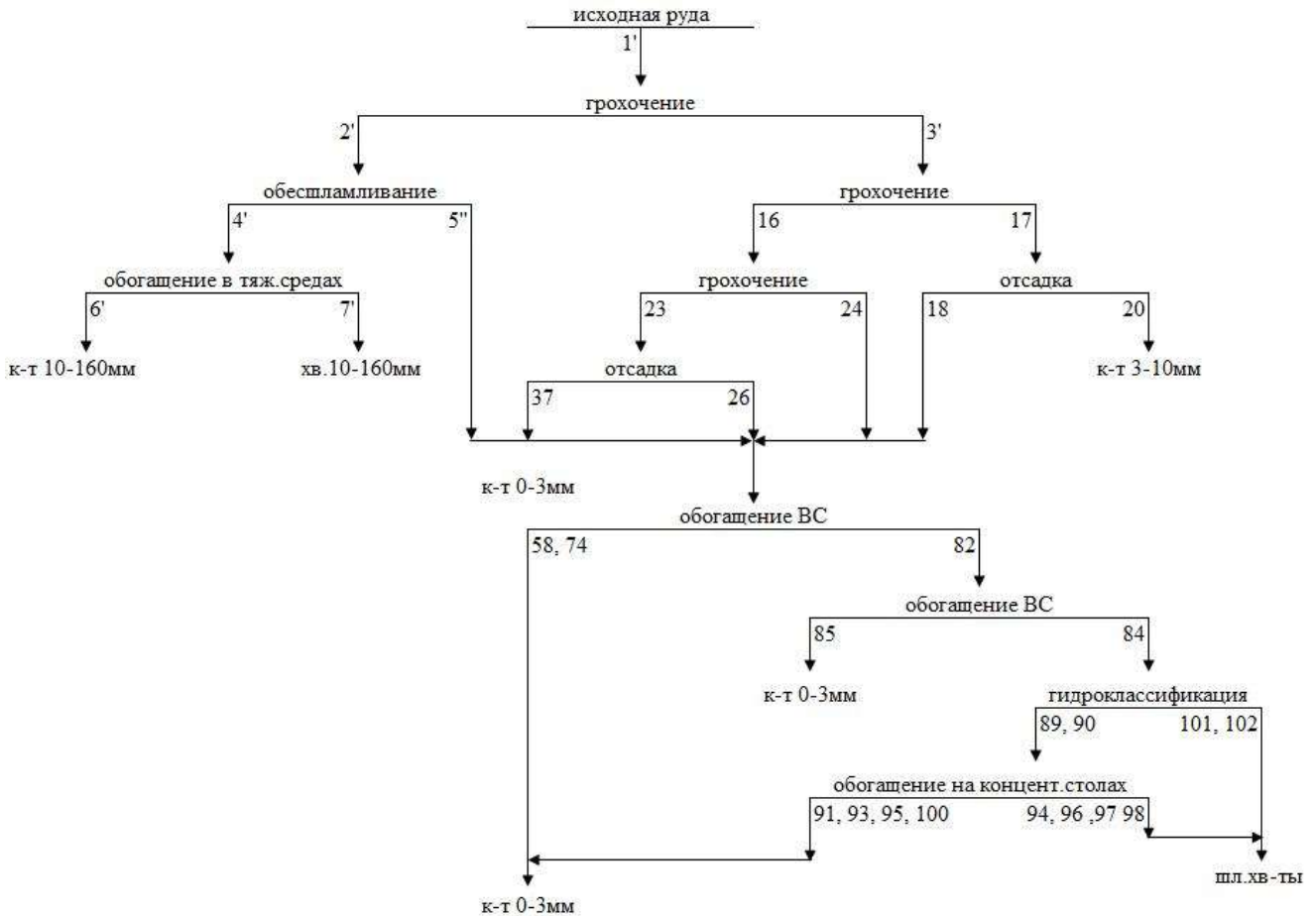


Рис. 3. Принципиальная схема обогащения хромовых руд с дообогащением шламовых хвостов с применением гидравлической классификации и концентрации на столах

Гидравлическая классификация в технологической схеме выступает как самостоятельная обогащательная операция. Процесс осуществляется в восьми последовательно расположенных камерах и позволяет эффективно разделять минералы, отличающиеся друг от друга по форме и плотности, а также крупности. При этом обесшламленный продукт после гидравлической классификации является достаточно богатым по оксиду хрома и однородным по гранулометрическому составу.

Таким образом, применение гидравлической классификации создает благоприятные условия для последующего эффективного разделения обесшламленного продукта на концентрационных столах и получения хромового концентрата с массовой долей оксида хрома 51,0%, отвечающего требованиям для производства окатышей с упрочняющим обжигом.

В результате обогащения шламовых хвостов увеличивается производство концентрата крупностью 0-3 мм на 10-10,5 %.

### Список литературы

1. Гмызина Н.В., Естауова Ж.К., Мигранова Э.Н. Соблюдение технологии производства окатышей – залог экологической безопасности на предприятии АО «ГНК „Казхром“» Донского горно-обогатительного комбината // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. Т.1. С. 67.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2012 году» от 11 апреля 2014 года [Электронный ресурс]. URL: <https://nedradv.ru/nedradv.ru/>
3. Energyprom.kz - проект по мониторингу экономики Казахстана в формате рэнкингов, 10 сентября 2019 г. Режим доступа: <http://www.energyprom.kz/ru/a/monitoring/kazakhstan-vhodit-v-trojku-mirovyh-liderov-po-dobyche-hromitai-zanimaet-1-e-mesto-po-zapasam-rudy>
4. Хромтау. Донской ГОК [Электронный ресурс]: журнал «Глобус», 27 сентября 2019. Режим доступа: <https://www.vneda.ru/glavnaya-tema/hromtau-donskoj-gok-8502/>



5. Дегодя Е.Ю., Шавакулева О.П., Андреева О.С. Повышение эффективности обогащения хромсодержащих руд на ОФ Донского ГОКа // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. Т.1. С. 54.

#### Сведения об авторах

**Саймаганбетова Нурсулу Кармакбаевна** – инженер-исследователь, Донской ГОК – филиал АО «ТНК „Казхром“», г. Хромтау, Казахстан. E-mail: [nurslu.saimaganbetova@erg.kz](mailto:nurslu.saimaganbetova@erg.kz)

**Серик Жайнагуль Сериккызы** – инженер-обогадитель, Донской ГОК – филиал АО «ТНК „Казхром“», г. Хромтау, Казахстан. E-mail: [jaina\\_mg@mail.ru](mailto:jaina_mg@mail.ru)

**Андреева Оксана Сергеевна** – студ. гр. ГД-16-4, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Естауова Жансая Куанышкызы** – студ. гр. ГД-16-4, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Дегодя Елена Юрьевна** – канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [magur@mail.ru](mailto:magur@mail.ru)

УДК 621.771

## S-ОБРАЗНАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ПРОИЗВОДСТВО ГОРЯЧЕКАТАНОГО СТАЛЬНОГО ПРОКАТА»

Грушо-Новицкая А.В., Полякова М.А.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Для анализа развития технологической системы «производство горячекатаного проката» используется концепция жизненного цикла технологий. Это позволяет построить S-образную кривую развития технологического процесса. Проведен анализ исторического развития процесса производства горячекатаного стального проката. На основании исторических данных показаны основные этапы совершенствования конструкции прокатных станов. Приведены численные значения ширины горячекатаного проката, которые можно было получить на каждом этапе исторического развития данной технологии. Отмечены исторические события, которые обусловили появление новых технических и технологических решений в области производства горячекатаного проката. Показано, что развитие процесса горячей прокатки следует описать семейством S-образных кривых. Это является примером появления «технологических разрывов» в процессах, которые имеют многолетнюю историю развития и характеризуются широкой многовариантностью. Отмечается, что современные станы горячей прокатки позволяют получать прокат с особыми эксплуатационными свойствами в зависимости от условий эксплуатации производимой из них металлопродукции. Предлагаемый подход может быть использован для прогнозирования развития технологической системы «производство горячекатаного стального проката», что является необходимым условием для инновационного развития данного вида производства.

**Ключевые слова:** технологическая система, горячекатаный прокат, S-образная кривая, технологический разрыв, стан горячей прокатки.

Технологический процесс производства любого вида продукции является сложной технической системой. Конкурентоспособность продукции на внутреннем и внешнем рынках в значительной степени определяется уровнем эффективности технологического процесса, который можно определить, используя показатели обеспечения качества продукции, показатели, относящиеся к методу производства, используемому оборудованию и инструменту, количеству операций, а также показатели необходимых затрат на осуществление технологического процесса в производственных условиях [1, 2]. С этой точки зрения развитие производительных сил непосредственно связано с уровнем технологических процессов производства продукции.

Как известно, жизненный цикл продукции является концепцией, описывающей совокупность явлений и процессов, повторяющихся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от её замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации [3]. Аналогично данному подходу предложена концепция жизненного цикла техно-

логий (рис. 1) [4]. Это отражает сущность технологического прогресса в ходе смены технологических укладов, инновационного развития техники и технологий, прогрессивного развития производительных сил и производственных отношений.



Рис. 1. Фазы жизненного цикла технологий [4]

S-образная кривая используется для описания развития различных видов систем и объектов в биологии, технике, экономике, инновационных процессах [5]. Данный вид кривой иллюстрирует действие закона убывающей эффективности эволюционного совершенствования систем [6]. Закон

отражает развитие систем на конечной стадии цикла. Когда технологические и эволюционные изменения проникают всюду, то дальнейшее их движение принимает эволюционный характер, а отдача от них все больше приближается к своему нижнему пределу. Со временем каждое последующее поколение, каждая последующая модель начинает приносить все меньшие приросты производительности, а затраты на их внедрение если не возрастают, то и не уменьшаются. В этом заключается некий технологический императив: всякое принципиально новое направление техники не беспредельно, не может дать больше того, что в нем заключено (генетический подход). На этой стадии по мере все более полного использования какого-либо принципа действия совершенствование отдельных технических решений становится экономически неэффективным или даже невозможным, т.е. наступает предел роста результативности систем, использующих определенный принцип деятельности. Складывается объективная необходимость создания систем на новом принципе действия, перехода на следующую S-образную кривую развития. Такие кривые широко применяются при изучении пределов технологического роста, когда «...во временном ходе эволюции прослеживается ряд S-образных кривых» [7].

Постепенное изменение и развитие технических систем во времени можно писать в виде определенной последовательности S-образных кривых (рис. 2) [8]. Это позволяет проследить эволюционное развитие технической системы. Из рис. 2 видны зоны ( $\delta t_{mp1}$ ,  $\delta t_{mp2}$ ,  $\delta t_{mp3}$ ), которые принято называть «технологическими разрывами». Сущность данного понятия заключается в том, что в период, когда существующая технологическая система является достаточно эффективной, уже существуют другие технологические системы, которые по мере своего развития будут более эффективны и будут приносить больший эффект по сравнению с уже существующей технической системой. Решение вопроса о моменте перехода на новые технологические процессы (товары, организации) является важнейшим стратегическим решением, обеспечивающим конкурентоспособность предприятия [8].

Рассмотрим такие закономерности на примере развития технологической системы «производство горячекатаного стального проката». Как известно, технологический процесс производства горячекатаной листовой продукции состоит из следующих основных операций: нагрев сляба в методических печах, сбив окалины, прокатка в черновой и чистой группе клетей, регулируемое охлаждение

на отводящем рольганге, смотка и маркировка. В настоящее время горячекатаный лист может использоваться как полупродукт для последующей холодной прокатки, так и готовой продукцией [9-12]. Отличительной особенностью в обоих случаях будет являться толщина получаемого продукта, которая наряду с технологическими параметрами будет зависеть среди прочих факторов и от конструкции стана горячей прокатки.

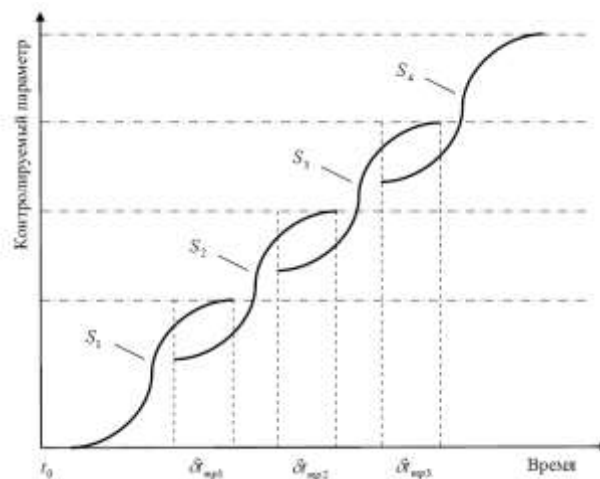


Рис. 2. Цепь технологических разрывов [8]

Технологические перемены в прокатной промышленности позволили удовлетворить спрос на толстолистовую широкоформатную продукцию различного назначения. Чтобы наглядно увидеть результаты изменений с течением времени, обратимся к концепции S-образной кривой, которая описывает зависимость между вложениями ресурсов в технологию или процесс и соответствующей этим вложениям «отдачей» (повышением продуктивности, качества и т. п.) [13]. В анализируемом технологическом процессе ресурсом является время, а именно временные затраты на совершенствование технологии прокатного производства. «Отдачей» служит увеличение размерного диапазона проката в каждый из периодов времени (рис. 3).

На любой S-образной кривой развития технической и технологической системы можно выделить определенные участки (соответствующие периодам времени), каждый из которых характеризует ту или иную стадию развития. На первом участке происходит зарождение логистической кривой. Она характеризуется, например, появлением оборудования, с помощью которого осуществляется та или иная технология.

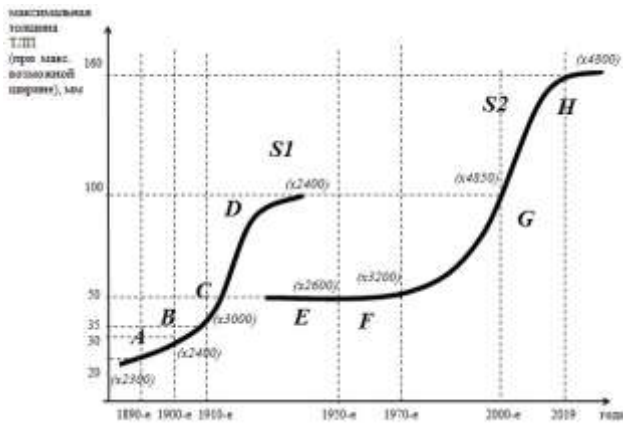


Рис. 3. Логистическая S-образная кривая (в скобках указана максимально возможная ширина горячекатаного проката, мм)

Анализ исторического развития технологии горячей прокатки позволяет определить ключевые этапы развития и совершенствования станов горячей прокатки [14-17]. Такой точкой зарождения S-образной кривой для технологической системы «производство горячекатаного стального проката» является период появления первых прокатных устройств, которыми были резные станы, плющильные машины и катальные станки (точка А, кривая S1) (см. рис. 3). Так называемые резные станы предназначались для производства мелко-сортного железа и представляли собой несложную конструкцию. Стан состоял из рамы высотой 1 ½ аршина, укрепленной в деревянной колоде, и двух квадратных валиков, на которые насаживались резные диски. Валики приводились в движение гидравлическим колесом. Диски делались из железа со стальной наваркой и имели насечку. Валики с насаженными на них дисками действовали как дисковые пилы, разрезая полосу железа в горячем состоянии на прутки заданной ширины. Количество дисков, насаживаемых на валики, определялось размером вырабатываемых прутков.

Почти одновременно с резными станами стали появляться плющильные машины для производства полосового железа, каждая из которых представляла собой примитивный стан дуо с гладкими валиками, приводимые в движение водоналивными колесами. На многих заводах применялись комбинированные резно-плющильные установки, где производственный процесс перемещения полос осуществлялся рабочими. Полосы, подвергавшиеся резке, нагревались в печах, затем рабочий по одной сверху захватывал клещами и выбрасывал их на пол одну за другой. Другой рабочий впускал полосу в плющильные валки. Принимал полосу подмастерье, и он же впускал её в резные валки. Как только прутья выходили из валков, двое рабо-

чих подхватывали крючьями и разносили их на верстаки для правки и связки.

В связи с расширением строительства после войны 1812 г. увеличилось производство листового железа. Применяли как двухколесные листо-прокатные установки, так и одноколесные установки с маховиком. Прокатные устройства состояли из черновой катальной машины, или иначе черновой клетки, и трёх чистовых клеток. Отделка листового железа была важнейшей частью производственного процесса и включала в себя многократный нагрев (по 6-8 раз в течение 5-7 часов) и пробивку пачек (по 45-60 листов) под молотами за 200-300 ударов.

Металлургия в России возникла с появлением первого завода с доменной плавкой, построенного на р. Тулице в 1632 г. Уже к концу XVII века в Тульско-Каширском районе насчитывалось семь заводов. К началу XIX века по всей России существовало 170 металлургических заводов, производивших 150 тыс. т чугуна в год. Особенно интенсивно развитие металлургии шло на Урале, где за столетие было построено около 90 заводов. Возникшие металлургические заводы не обладали четким разделением технологий, а представляли собой единый процесс кричного производства, который включал в себя переработку чугуна в железо и его отковку в необходимый профиль.

В Европе давно началось усовершенствование станов дуо с постоянным направлением движения валков и применение дуо-реверсивных станов, а также появились многоклетьевые станы трио для прокатки мелко- и крупносортового металла, в особенности толстолистового железа. Дальнейшему развитию прокатки в направлении массовой переработки в окончательный продукт способствовало появление массового производства стали бессемеровским и мартеновским способами. Введение блюмингов и слябингов явилось наиболее значительным усовершенствованием конца XIX века.

Следующий этап развития рассматриваемой технологической системы характеризуется увеличением ширины горячекатаного проката до 2400-3000 мм (участок BC, кривая S1 на рис. 3), что стало возможным с использованием станов трио. На данном этапе происходит интенсивное развитие технологии горячей прокатки, совершенствуются конструкции станов. Рассмотрим подробнее некоторые из первых толстолистовых станов, появившиеся в России в конце XIX – начале XX века. В табл. 1 представлены размеры горячекатаного проката, которые можно было получить на первых толстолистовых станах.



Таблица 1

Некоторые характеристики первых толстолистовых станов и размеры горячекатаного проката

Стан	Длина бочки, мм	Материал валков	Число об/мин	Размеры листа		
				Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, м
Трио 820/620/820	2750	Чугун	66	8-20	1000-2300	до 10
Трио 820/550/820	2800	Закаленный чугун	60-70	4-32	1400-2400	до 13
Трио 860/630/860	2800	Закаленный чугун	52	6-30	1200-2400	до 9
Трио 900/650/900	3000	Закаленный чугун	82	6-32	1000-2500	до 12
Трио 920/700/920	2800	Закаленный чугун	75	6-100	1000-2400	до 12
Дуо-реверсивный 980	3540	Сталь	60	12-34	1200-3000	6-12

В 1897 г. был установлен толстолистовой стан системы трио 820/550/820 (диаметр бочки верхних и нижних валков – 820 мм, средних – 550), состоящий из одной рабочей и одной шестеренной клетей. В действие стан приводился с помощью паровой машины мощностью 1200 л.с. В производстве толстолистового железа южная металлургия заняла преобладающее положение, вводя мощные станы трио Лаута. Станы для толсто- и среднелистового проката обладали разным диаметром рабочих валков, от 650/500/650 до 900/750/900 мм, следовательно, и разными характеристиками прокатываемого металла.

Завод им. Дзержинского представлял собой один из крупнейших металлургических заводов юга России, который располагал полным металлургическим циклом. На заводе толстую листовую сталь получали на стане трио Лаута (большое трио) 860/630/860. Стан имел одну рабочую и одну шестеренную клеть, два электромотора фирмы Сименс-Гальске мощностью при постоянном токе 900 л.с. и обслуживался двумя нагревательными методическими печами. Толстолистовой стан 820/620/820 на Металлургическом заводе им. Андреева состоял из двух рабочих и двух шестеренных клетей, расположенных в одну линию. Каждая из рабочих клетей прокатывала листы самостоятельно. Обе клетки приводились от асинхронного электромотора переменного тока мощностью 2000 л.с. Стан обслуживался тремя нагревательными методическими печами. На Днепропетровском металлургическом заводе в 1902 г. был установлен стан трио Лаута 900/650/900, состоящий из одной рабочей клетки и одной шестеренной. Стан приводился в действие электромотором мощностью 2000 л.с., обслуживался тремя нагревательными печами: одна печь Сименса и две методические. На Кировском машиностроительном заводе («Красный путиловец») в 1914 г. был установлен толстолистовой стан 980. Стан дуо-реверсивный имел рабочую клеть и одну шестеренную клеть, приводился в действие от отдельной паровой машины через редуктор мощностью 6000 л.с. Стан обслуживался двумя методическими печами.

Изменения технологии горячей прокатки в России после Октябрьской революции 1917 г. в первую очередь отразились на расширении сортамента горячекатаной продукции: было освоено производство рельсов и профилей военного назначения, затем началось производство кровельного железа. Широко применялись станы дуо и трио, увеличивалось количество клетей, а в действие станы приводили гидротурбины, паровые машины и электромоторы. На данном этапе развития технологии горячей прокатки наблюдается постепенное исчерпание всех имеющихся технических ресурсов, применявшихся в тот период времени станом дуо и три, происходит постепенное замедление развития, стабилизация и снижение эффективности системы. S-образная кривая, описывающая развитие технологии горячей прокатки с момента ее зарождения, достигает верхнего предела (участок CD, кривая S1 на рис. 3).

Дальнейшее развитие производства горячекатаного проката было обусловлено интенсивным развитием тяжелой промышленности России после Второй мировой войны. Этот этап явился мощным стимулом для поиска новых технических и технологических решений в данной области производства проката. Судостроительной и машиностроительной отрасли требовался толстый лист для производства различных резервуаров и корпусов морских судов, труб и различных стальных конструкций. Использование широких толстых листов целесообразно с точки зрения минимизации сварочных работ. Установленные в начале XX века станы не могли в полной мере обеспечить толстым листом необходимой ширины. С этим связано строительство ряда типовых станом кварто 2800. Станы совершенного типа обеспечивают прокатку листов с более высокими обжатиями по сравнению со станами дуо и трио и, соответственно, позволяют получать продукцию с более точными размерами по ширине. Новая S-образная кривая в полной мере описывает этап зарождения новых технологических решений в производстве горячекатаного проката (кривая S2 на рис. 3).

Сравнительная характеристика современных толстолистовых станом приведена в табл. 2.

Таблица 2

## Характеристика современных толстолистовых станов горячей прокатки

Стан	Скорость прокатки, м/с	Размеры листа			Производительность, т/год
		Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, м	
Кварто 2800	до 5	4-50	1500-2600	до 20	800-1000 тыс.
Кварто 3600	до 6	5-50	2000-3200	до 28	1700 тыс.
Кварто 5000	До 5	8-160	2000-4850	до 24	св. 1,5 млн.

Первый стан 2800 был пущен в 1955 г. на Коммунарском металлургическом заводе, а второй – в 1960 г. на Орско-Халиловском металлургическом комбинате. Длина бочки валков у таких станом составляет 2800 мм. Стан кварто 2800 состоит из трех клетей: вертикальной клетки, где происходит обжатие сляба по боковым граням и разламывание окалины на основных широких гранях; горизонтальной черновой клетки, где в реверсивном режиме происходит прокатка до некоторой промежуточной толщины; универсальной чистовой клетки, которая содержит горизонтальные и вертикальные валки, где реверсивной прокаткой формируются окончательные размеры листа. На многих станах, построенных после 1965 г., чистовая клетка содержит только горизонтальные валки, так как идею использования вертикальных валков для получения катаных кромок и сокращения боковой обрезки на листе до конца осуществить не удалось [17].

Максимальная ширина листа достигалась 2600 мм и ограничивалась шириной бочки валков, в то время как в судостроении и машиностроении требовались более широкие листы. Происходит дальнейшее развитие анализируемой технологической системы, которое графически отражено на кривой S2, участок EF (см. рис. 3). В 1973 г. на заводе «Азовсталь» был построен толстолистовой стан 3600, который имеет одну вертикальную клетку и две четырехвалковые клетки с горизонтальными валками [18]. Для нагрева сляба имеются четыре методические печи, а для нагрева слитков – нагревательные колодцы. На стане предусмотрено несколько технологических потоков металла: технологических поток для отделки плит (после прокатки в черновой клетки плиты и толстые листы проходят пролет замедленного охлаждения) и прокатка тонких листов в чистовой клетки [17].

Освоение газо- и нефтяных месторождений в условиях Крайнего Севера, увеличение добычи газа и нефти, увеличение объемов транспортирования и рабочего давления газо- и нефтепроводов явилось основанием для освоения горячей про-

катки стального листа большой ширины. Развитие технологической системы «производство горячекатаного стального проката» характеризует участок GH кривой S2 (см. рис. 3). Первый в СССР Колпинский (Ижорский) стан кварто 5000 был построен в 1985 г. В 2000 г. выкуплен ОАО «Северсталь». Основным предназначением стана стало получение проката для трубной промышленности [19]. Для нагрева заготовки предусмотрено пять видов печей: методические, колодцы, камерные (для тяжелых слитков), электрические (для легированных марок) и индукционные вакуумные (для спечсплавов). Для прокатки листов стан оборудован черновой и чистовой клетью типа кварто. Особенностью стана, помимо внушительных размеров, является реализация трех видов способа прокатки [20]: нормальная прокатка, контролируемая прокатка – нормирующая и контролируемая прокатка – термомеханическая прокатка.

Технологический разрыв (кривые S1 и S2 на рис. 3) обусловлен необходимостью кардинальной перестройки подходов к производству горячекатаного толстолистого проката в целом. Прокатные листовые станы совершенствуются: использование различных типов клетей и их комбинирование позволило появиться на свет станам с оптимальными скоростями и большими степенями обжатий, которые достигаются в несколько проходов. Это позволяет получать горячекатаный прокат с широким спектром эксплуатационных свойств: высокие значения прочности, высокая коррозионная стойкость, хладостойкость, износостойкость и др. Участок GH кривой S2, отражающий развитие системы и достижение ее зрелости, соответствует периоду производства более высококачественного проката и расширению его сортамента. Например, горячекатаный стальной прокат, производимый на современном стане 5000, имеет гарантированные прочностные характеристики, которые приведены в табл. 3.



Таблица 3

Механические свойства различных видов трубных сталей

Виды трубных сталей	Минимальные показатели	
	Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление, Н/мм <sup>2</sup>
PC D (PC A, PC B)	235	400
PC D32 (PC E32, D32)	315	440
PC D40 (PC E40)	390	510
K52	375	510
K55	400	515
K56	430	525
K60	500	565
X60	315	495
X60ME	435	520
X65	450	510
X65ME	470	535
X70	505	545
X70ME	505	570
L450M	460	510
L450ME	470	535
L485M	515	570
L485ME	485	590
АБ2-1 (АБ2-2)	590	640
MAGSTRONG W600	590	650
MAGSTRONG W700	700	750
MAGSTRONG W900	900	950
MAGSTRONG H400	1000	1250
MAGSTRONG H450	1100	1400
MAGSTRONG H500	1200	1500

Таким образом, одним из условий уверенного движения предприятий по пути инновационного развития является анализ эффективности внедрения новых технических и технологических решений, определение временных пределов их практической значимости, чтобы установить тот период времени, когда должен произойти очередной технологический скачок. И если построение S-образной кривой на основании исторического развития технической или технологической системы в общем случае позволяет с достаточной точностью охарактеризовать уровень их совершенства, то прогнозирование дальнейшего развития является сложной теоретической задачей. Однако знание закономерностей развития позволяет определить тот момент времени, когда система в своем развитии достигнет максимума, и переход к новому этапу ее развития станет очевидным и неизбежным.

**Список литературы**

1. Полякова М.А., Харитонов В.А., Петров И.М. Процессный подход к оценке конкурентоспособ-

ности технологического процесса производства металлоизделий // Производство проката. 2019. №4. С. 12-16.

2. Харитонов В.А., Петров И.М. Методика выбора конкурентоспособных производственных процессов // Качество в обработке материалов. 2016. №1(5). С. 25-27.

3. ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с.

4. [http://library.kpi.kharkov.ua/TUF/resource\\_559/t2.htm](http://library.kpi.kharkov.ua/TUF/resource_559/t2.htm). Дата обращения 5 мая 2020 г.

5. Timmons, J. A., Spinelli S. New venture creation: entrepreneurship for the 21st. century. Singapoure: McGraw Hill, 2007. 658 p.

6. Любушкин Н.П., Лещева В.Б., Дьякова В.Г. Анализ финансово-экономической деятельности предприятия. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 471 с.

7. Сахал Д. Технологический процесс: концепции, модели, оценки: пер. с англ / под ред. и вступ. ст. Рывкина А.А. М.: Финансы и статистика, 1985. 366 с.

8. Старцев Ю.Н. S-образные модели развития и технологические разрывы // Вестник Челябинского государственного университета. 2008. №27. С. 52-57.

9. Оценивание качества тонких горячекатаных полос для определения возможности замещения холоднокатаной листовой стали общего назначения / М.И. Румянцев [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 4(20). С. 69-73.

10. Разработка технологии производства горячекатаного тонколистового проката для замещения холоднокатаного проката аналогичного назначения / М.И. Румянцев [и др.] // Производство проката. 2009. № 4. С. 30-34.

11. Производство горячекатаного листового проката для замещения холоднокатаного аналогичного назначения: монография / И.Г. Шубин [и др.]. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 217 с.

12. Румянцев М.И. Некоторые результаты развития и применения методологии улучшения листопрокатных технологических систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №1. С. 45-55.

13. Фостер Линн Э. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. М.: Техносфера, 2008. 352 с.

14. Берзон Е.С., Волобуев В.И. Прокатные станы СССР. М.-Л.: Металлургиздат, 1940. 646 с.

15. Целиков А.И. Прокатные станы. 2-е изд. М.: Металлургиздат, 1958. 432 с.

16. Целиков А.И., Зюзин В.И. Современное развитие прокатных станов. М.: Металлургия, 1972. 399 с.

17. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства: учебное пособие. СПб.: Наука, 2005. 540 с.

18. Технологический процесс прокатки на толстолистовом стане 3600 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://for-engineer.info/rolling/tehnologicheskij-process-prokatki-ne-tolstolistovom-stane-3600.html>. Дата обращения 7.05.2020.

19. Стан 5000 «Северсталь» [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://www.severstal.com/rus/media/news/document3547.phtm>. Дата обращения 7.05.2020.

20. Нухов Д.Ш. Теоретическое исследование и научное обоснование новых способов кузнечной про-

тяжки и прокатки высоких заготовок в условиях интенсивной знакопеременной деформации: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05: утв. 2016. Екатеринбург, 2015. 143 с.

#### Сведения об авторах

**Грушо-Новицкая Анастасия Валерьевна** – магистрант гр. ММЛм-18, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: grushonovitskaya95@gmail.com

**Полякова Марина Андреевна** – д-р техн. наук, доц., проф., каф. технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

УДК 669.18

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КАЛЬЦИЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАСКИСЛЕНИЯ И ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ

Бигеев В.А., Сычков А.Б., Исаев М.К.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В статье приведены сведения об эффективности применения кальцийсодержащего материала при внепечной обработке стали с целью ее раскисления, модифицирования металла при разливке и неметаллических включений. Эти мероприятия обуславливают получение так называемой чистой стали и значительное повышение качества металла.

Проведен также анализ различных порошковых проволок с разными наполнителями. Показана высокая эффективность применения проволоки с фактически 100% содержанием кальция. В этом случае повышается степень усвоения кальция, снижается себестоимость внепечной обработки стали на установке печь-ковш.

**Ключевые слова:** сталь, внепечная обработка, раскисление, рафинирование, модифицирование, неметаллические включения, качество, порошковая проволока, силикокальций, феррокальций, проволока с кальциевым наполнителем.

В металлургической практике достаточно давно применяется обработка стали широкого марочного состава при ее внепечной обработке (преимущественно на установке-агрегате печь-ковш) кальцийсодержащими материалами. Эти материалы выполняют следующие положительные для качества стали функции:

1. Получение белых рафинировочных шлаков при внепечной обработке на установках печь-ковш (УПК или агрегат печь-ковш -АПК) для глубокого раскисления металла, снижения в стали содержания серы и фосфора, перевода неметаллических включений (НВ) в покровной шлак [1-4].

2. Снижение вероятности образования в дозирочных устройствах машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) настывлей, состоящих преимущественно из окислов алюминия –  $Al_2O_3$ , которые (настыли) перекрывают разливочные стаканы (явление их зарастания), что приводит к прекращению процесса непрерывной разливки [3, 5].

3. Модифицирование кристаллизующейся стали при непрерывной разливке и неметаллических включений (НВ). Модифицирование НВ заключается в измельчении этих включений и частичном изменении их химического состава более благоприятного для последующего деформирования стали [1-3, 6, 7].

На сегодняшний день понятие чистоты стали определяется пониженным содержанием в ней вредных химических элементов, таких как серы, фосфора, водорода, а также уровнем загрязненности металла НВ. Степень чистоты стали по выше-

указанным параметрам зависит от требований стандартов, заказчиков, назначения металлопродукции.

Сталь можно рассматривать как композиционный материал, состоящий из стальной матрицы и неметаллических включений. Загрязненность стали НВ зависит от размера, химического состава, формы, распределения включений по сечению, их количества, свойств НВ – деформирующиеся или недеформирующиеся. В сталях, обрабатываемых кальцийсодержащими материалами, образуются различные окислы марганца, кремния, кальция и других элементов, которые при правильной отдаче в сталь кальция измельчаются и коагулируются, что способствует возрастанию скорости их всплывания в шлаковый покров. В процессе продувки и перемешивания их можно полностью удалить из расплава. Кальций является наиболее химически активным элементом по отношению к железу в сравнении с титаном, марганцем, кремнием, серой, фосфором, обогащение которыми границ зерна вызывает межкристаллитное охрупчивание и определяет качество металла [1-3].

Кальций, адсорбируясь по границам зерен, предотвращает и нейтрализует действие вышеуказанных элементов, модифицируя форму соединений этих включений, значительно повышает чистоту стали по неметаллическим включениям [1, 2].

При передозировке отдачи кальция в сталь на УПК возможно образование крупных глобулярных НВ, например, силикатов хрупких в кальциевой оболочке, которые являются недеформирующимися НВ, ухудшающими качество стали и ее деформируемость. Поэтому необходима разработ-

ка эффективной технологии отдачи кальцийсодержащей проволоки на УПК [3].

Введение в сталь, раскисленную алюминием, кальция и его окисление в CaO приводит к появлению алюминатов кальция, чаще всего в глобулярном виде. Алюминаты кальция имеют температуру плавления до 1400°C и находятся в жидком состоянии во время разливки. На этом эффекте основана возможность улучшения разливаемости и качества стали.

В работе [8] автор утверждает о необходимости исключения алюминия из черной металлургии в качестве раскислителя с учетом комплексного негативного действия алюминия на свойства стали относительно сложных недеформирующихся НВ и образовании настывлей при разливке. В работах [1-3] нормируется содержание в стали алюминия в зависимости от содержания кальция для обеспечения удовлетворительной разливаемости стали, особенно при непрерывной разливке.

В настоящее время ферросплавы и добавки необходимых материалов в УПК при внепечной обработке стали осуществляют двумя основными способами. Первый из них – это отдача таких в виде кускового материала различной фракции, коэффициент усвоения при этом составляет, в лучшем случае, 30-40 %; во втором – в виде порошковой проволоки (коэффициент усвоения растет до 90-95 %), подаваемой в расплав в сталеразливочном ковше при помощи тянущих роликов (трайберов). Конструктивно трайб-аппараты для подачи порошковой проволоки могут быть одно-, двух-, трех- и четырехручьевыми. С увеличением количества ручьев обеспечивается вероятностное повышение отдачи нескольких порошковых проволок с различными наполнителями или одновременно, или непосредственно друг за другом.

На основании вышеуказанного можно сделать однозначный вывод о целесообразности применения при внепечной обработке порошковой кальцийсодержащей проволоки. Исторически в первую очередь была освоена проволока, содержащая силикокальцевая порошковая проволока типа SiCa-30 (30 % кальция) со стальной оболочкой из низкоуглеродистой стали типа 08. Диаметр такой проволоки составляет у разных производителей 14-16 мм.

Использование порошковой проволоки позволяет точно определять количество остаточного кальция, исходя из задач технологии. Условия разливаемости обеспечиваются при содержании кальция в промковше на уровне 0,0015 – 0,0025%, эти расчетные данные взяты из научной литературы, на практике для улучшения условий разливаемости содержание кальция в промковше делают немного больше в среднем на 0,0005%.

Среднее содержание кальция после отдачи на АПК по результатам быстрого анализа устанавливается на отметке 0,0045-0,005%, что позволяет

получить содержание кальция при разливке 0,0025-0,0030%. В любом случае необходима отработка технологии отдачи кальция в сталь.

В последнее время наблюдается как в отечественной, так и зарубежной черной металлургии переход на порошковую проволоку с большим содержанием кальция. Например, эффективно используется порошковая кальциевая проволока типа FeCa-40 (40% кальция). Проведено также опытно-промышленное опробование проволоки, содержащей 100% кальция. Кроме преимуществ такой проволоки, существует у нее существенный недостаток – это склонность кальция к взрыву.

Порошковая проволока с наполнителем FeCa, активно используется на ОАО «Северсталь», ПАО «ММК», МЗ Балаково, КМК, Абинский ЭМЗ, Ашинский МЗ и многих других по всему миру.

Как уже указывалось, в порошковой проволоке кальций может присутствовать в разных видах, например: силикокальций марки СК30, кальций гранулированный, кальций инъекционный, а также в виде механической смеси Ca с различными добавками.

Самыми распространенными наполнителями кальцийсодержащей проволоки до сих пор являются Силикокальций СК-30 и Феррокальций (смесь кальция гранулированного со стальной дробью 60/40 или 70/30 соответственно), диаметр проволоки – 14 мм.

Проволока с наполнителем СК-30 обычно используется на трубных марках стали, где нет жесткого ограничения по кремнию или где нужно получать заданное значение кремния. В проволоке феррокальций используется кальций металлический (Ca > 98,5 %) и стальная дробь, её можно использовать на всех сталях за исключением бескальциевых, но при сравнении усвоения этих двух наполнителей с одинаковым содержанием кальция на одной марке стали получается, что проволока с наполнителем СК-30 усваивается лучше. Это объясняется тем, что в СК-30 кальций находится в связанном состоянии с кремнием и во время введения в расплав он имеет меньшую реакционную способность, а также большую температуру плавления, другим объяснением является стальная дробь, которая может являться окислителем, а также при использовании некачественной дроби сталь насыщается вредными примесями. Для производства этих проволок в качестве оболочки используется стальная лента шириной 0,35-0,45 мм из стали 08Ю или 08кп.

Как уже указывалось, технология внепечной обработки стали постоянно совершенствуется. Поэтому в настоящее время находит применение проволока с кальциевым наполнителем.

Например, на смену проволоке с наполнителем феррокальций пришла проволока с наполнителем кальций инъекционный (Ca > 99 %) диа-

метром 11 мм и толщиной стальной оболочки 0,8 мм. Данная проволока имеет коэффициент заполнения от 22 до 27,7% и содержание кальция в 1 погонном метре проволоки варьируется от 69 до 97 грамм в зависимости от производителей. Эта проволока полностью решает вопрос возможного попадания в расплав вредных примесей от стальной дроби, но технология применения такой проволоки пока еще несовершенна. Недостатком этой проволоки является масса и содержание кальция в ее погонном метре. Ввиду низкой массы 1 погонного метра (около 350 г) против 420 г у FeCa (60/40), глубина погружения в расплав кальцевой проволоки уменьшается. Поэтому существует риск кипения кальция в верхних слоях жидкого металла, что может спровоцировать сильный пирроз эффект и, как следствие, выплеск стали из сталеразливочного ковша. Содержание кальция в 1 м проволоки из кальциевого наполнителя на 8-26 г меньше, чем в FeCa (60/40) проволоки, что увеличивает время обработки стали.

Кальций инъекционный – это кальциевый стержень, который закатывают в стальную оболочку. Кальций в виде стержня имеет меньшую площадь реагирования по сравнению с кальцием гранулированным. Поэтому после введения в сталь он (Ca) не может раствориться в одной точке и продолжает движение по мере растворения, а проволока, как известно, при вводе в сталь повторяет траекторию нисходящей параболы. Вследствие указанного после начала растворения в нижней части агрегата ковш-печь кальциевый стержень может продолжить движение и уйдет в шлак, что обусловит низкое усвоение кальция сталью.

После анализа использования проволоки с наполнителем FeCa диаметром 14 мм и порошковой проволоки диаметром 11 мм с Ca металлическим была разработана проволока диаметром 14 мм с наполнителем кальций металлический (Ca > 98,5%) и толщиной стальной оболочки 0,8 мм. Последняя проволока имеет коэффициент заполнения 23-28% и содержит кальция от 105 до 130 г на метр, что больше чем в FeCa (60/40) на 10-15 г, а масса 1 погонного метра проволоки составляет 456 г. Вследствие этого новая проволока глубже погружается в расплав. Все это способствует повышению усвоения кальция и снижению времени внепечной обработки стали. При проведении опытных испытаний на ПАО «ММК» было выявлено, что в процессе использования такой проволоки она не разрывается за счет более толстой оболочки, по сравнению с феррокальциевой проволокой. Усвоение кальция в металле увеличилось на 13% по сравнению с FeCa (60/40) и на 10% по сравнению с порошковой кальциевой проволокой диаметром 11 мм. При этом наблюдается снижение себестоимости готовой продукции.

Проволоки с наполнителем СК-30 тоже модернизировались. Было выявлено, что использование проволоки с новым наполнителем СК40 (кальций гранулированный + ферросилиций 65) по сравнению с СК30 приводит к значительному снижению затрат при внепечной обработке стали. При этом усвоение кальция из нового вида проволоки носит более стабильный характер.

В мировой металлургической практике в настоящее время силикокальциевого порошковая проволока марки СК30 является наиболее широко используемым материалом для ввода кальция в сталь. Это обусловлено тем, что соотношение компонентов в сплаве (30 % Ca и 60 % Si) обеспечивает эффективное сочетание теплофизических параметров в ферросплавном производстве, положительно влияющих на усвоение кальция. Следует отметить, что при производстве силикокальция с содержанием кальция более 30 % резко возрастают расходы и при этом возникают трудности с отделением ферросплава от шлака, поэтому все мировые производители, как правило, ограничиваются изготовлением силикокальция марки СК30. В то же время в последние годы в связи с меняющейся конъюнктурой на рынке ферросплавов и изменением качества сырья появилась тенденция использования в определенных условиях комплексного наполнителя, называемого иногда силикокальций СК40 [2]. Такой материал получается механическим смешением порошков силикокальция и металлического кальция. В процессе ввода проволоки образуется сплав и необходимое содержание кальция в ферросплаве достигается непосредственно при обработке жидкого железоуглеродистого расплава. Такая проволока активно используется на металлургических предприятиях.

Высокая эффективность использования СК40 обусловлена тем, что сплав с содержанием 40 % Ca образуется по мере вхождения порошковой проволоки в жидкий металл. При этом протекает комплекс процессов взаимодействия кальция, свободного кремния и их соединений (нагрев, растворение, испарение, диссоциация, фазовый переход и т.д.) как внутри проволоки, так и в локальном месте ввода наполнителя в расплав, что снижает температуру в зоне реакции. Порошковая проволока с наполнителем СК40 отличается повышенным содержанием кальция в погонном метре и более высоким усвоением кальция (на 15-30%) по сравнению с силикокальцием СК30. Поэтому для достижения заданного содержания кальция в металле расход проволоки СК40 меньше в 1,4-1,6 раза, чем проволоки СК30. Это обуславливает значительную экономию затрат потребителя при закупке порошковой проволоки и целый ряд технологических преимуществ (снижение кранового времени, сокращение вспомога-



тельных технологических операций, уменьшение времени обработки, потерь тепла и пр.).

Как было отмечено, в проволоке СК30 при общем содержании Са 30% некоторая его часть может находиться в виде оксидов, в т.ч. комплексных (иногда до 10-15% абс.). В производственных условиях это установить затруднительно вследствие отсутствия зачастую оборудования для проведения фазового анализа. Такое положение приводит к нестабильным показателям по усвоению кальция при внепечной обработке металла порошковой проволокой как с наполнением СК30, так и СК40. Для повышения усвоения кальция, стабильности технологии и снижения затрат при внепечной обработке авторами были разработаны новые составы порошковых проволок (аналоги СК30 и СК40) с наполнением ферросилицием и кальцием металлическим (содержание кальция металлического в наполнителе не менее 30 и 40% соответственно). Лучшее усвоение новой проволоки обусловлено тем, что температура плавления расплава FeSi65 и кальция металлического (40%), образующегося в процессе введения проволоки в ковш, выше, чем у СК 30, на 150°С. Также дополнительным преимуществом такой проволоки является низкое содержание углерода (до 0,15%), что дает возможность использовать ее при обработке специальных сталей.

При использовании на одном из предприятий при промышленной обработке стали марок типа 32Г2, 13ХФА, 20 нового вида проволоки СК40 в сравнении с традиционно применяемой проволокой (обычный СК40 на базе металлического кальция и силикокальция СК30), при обработке параллельных ковшей одной плавки (выпуск в 2 ковша) показало повышенное усвоение кальция: перед отдачей ковша на разливку на 20-25% отн., по готовому металлу – 15-20% отн.

### Выводы

1. Рассмотрено современное состояние внепечной обработки стали кальцийсодержащей порошковой проволокой с целью повышения качества

стали путем ее глубокого раскисления и модифицирования неметаллических включений, снижения вероятности настылеобразования на стаканах-дозаторах при непрерывной разливке.

2. Рассмотрены различные типы порошковой кальцийсодержащей порошковой проволоки типа СК30, СК40, а также с кальцием металлическим. Проведено их сравнение и доказана эффективность применения новой порошковой проволоки с металлическим кальцием.

### Список литературы

1. Оптимальное содержание кальция в стали / Ф.Е. Долженков, А.А. Казаков, В.И. Новик и др. // Сталь. 1981. № 8. С. 20-25.
2. Дюдкин Д.А. Особенности комплексного воздействия кальция на свойства жидкой и твердой стали // Сталь. 2002. № 10. С. 33-36.
3. Парусов В.В., Сычков А.Б., Парусов Э.В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2012. 376 с.
4. Изменение химического состава неметаллических включений на всех этапах производства стали / Р.В. Старов, И.В. Деревянченко, В.В. Парусов, А.Б. Сычков и др. // Сталь. 2005. № 1. С. 79-82.
5. К вопросу о затягивании каналов стаканов-дозаторов при непрерывной разливке заготовок малых сечений / Р.В. Старов, В.В. Парусов, А.Б. Сычков и др. // Прогрессивные технологии непрерывной разливки стали: XXI век: сб. трудов МНТК. Донецк: ООО Лебедь, 2002. С. 20-21.
6. Модернизация оборудования и совершенствование технологии для производства качественного проката в условиях Молдавского металлургического завода (ММЗ) / А.Б. Сычков, Н.А. Богданов, В.В. Парусов, О.В. Парусов, М.А. Жигарев // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 8-9. С.306-313.
7. Иванов Э.В., Эндерс В.В., Гуляев М.П. Проблемы качества кордовой стали и пути их решения // Сталь. 2002. № 10. С.33-36.
8. Байков А.А. Избранные труды. М.: Металлургиздат, 1961. 328 с.

### Сведения об авторах

**Бигеев Вахит Абдрашитович** – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Сычков Александр Борисович** – д-р техн. наук, доц., проф., каф. литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. [orcid.org/0000-0002-0886-1601](https://orcid.org/0000-0002-0886-1601). E-mail: [absyckov@mail.ru](mailto:absyckov@mail.ru)

**Исаев Михаил Константинович** – студ. ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.



УДК 531.43/46

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЛАВНЫХ ЛИНИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ

Анцупов А.В. (мл.)<sup>1</sup>, Анцупов А.В.<sup>2</sup>, Анцупов В.П.<sup>1</sup>, Ляшева Ю.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

**Аннотация.** В статье при анализе работы действующих широкополосных станов с позиций экономической кибернетики предлагается аналитическая методика прогнозирования и повышения эффективности функционирования оборудования главных линий за счет расчетной оценки и продления ожидаемого ресурса низконадежных деталей и узлов. С этой целью разработаны математические модели процессов формирования постепенных отказов указанных элементов по различным критериям кинетической прочности и износостойкости материалов. Комплексная методика позволяет не только оценивать ожидаемый уровень долговечности ресурсных элементов и соответствующую ему производительность действующих широкополосных станов, но и аналитически исследовать возможные конструктивные решения для увеличения долговечности низконадежных элементов, снижения простоев и обеспечения максимально возможного уровня эффективности функционирования основного оборудования исследуемых станов на стадии их реконструкции.

**Ключевые слова:** главные линии, основное оборудование, широкополосный стан; низконадежные (ресурсные) элементы; проектная оценка (прогнозирование); ожидаемый ресурс; годовая производительность; повышение; эффективность функционирования.

### Постановка задачи

Годовая производительность сложных механических систем, к которым относятся комплексы основного оборудования главных линий (ГЛ) чистовых клетей широкополосных станов (ШС), является одним из основополагающих количественных параметров эффективности их функционирования [1-4]. Его величину определяют произведением практически возможной часовой производительности  $q$ , т/ч, на годовой фонд рабочего времени оборудования  $T_r$ , ч/год [5-6]:

$$Q = q \cdot T_r. \quad (1)$$

В условии (1)

$$T_r = T_K - T_{REM} - T_P = \left( T_{NOM} - \sum_{i=1}^{i=k} T_i \right), \quad (2)$$

где  $T_K$  – календарный годовой фонд времени при 365 днях в году;  $T_{REM} = 27$  сут – суммарные годовые простои стана на планово-предупредительные и капитальные ремонты, устанавливаемые из опыта работы стана;  $T_P$  – простои стана по различным ( $i$ -м) причинам;

$T_{NOM} = T_K - T_{REM} = (365 - 27) \cdot 24 \text{ ч} = 8112 \text{ ч}$  – номинальное число рабочих часов стана в году.

Суммарное время простоев стана  $T_P = \sum_{i=1}^{i=k} T_i$ ,

предназначенное для проведения перевалок рабочих валков ( $i = 1$ ), опорных валков ( $i = 2$ ), профилактических работ по ТО и восстановлению необходимых ресурсных элементов: шарниров УШ, подшипников, зубчатых механизмов ( $i = 3, 4, 5, \dots, m$ ), настроек и перестроек стана ( $i = m + 1$ ), приемок и сдач смен ( $i = m + 2$ ) и других работ ( $i = m + 3, \dots, k$ ), определяют обычно на основе обобщения опыта эксплуатации конкретного стана. Иными словами, значение  $T_P$  на каждом конкретном стане назначают только из опыта эксплуатации имеющегося оборудования и квалификации персонала в диапазоне  $T_P = (0, 7 \dots 1, 3) \cdot T_K = (612 \dots 1138) \text{ ч}$ . Очевидно, что снижение каждого часа простоев  $T_P$  за счет продления ресурса любого  $i$ -го элемента может привести к существенному повышению производительности исследуемого широкополосного стана и экономической эффективности предприятия.

В этом плане актуальной становится народнохозяйственная задача создания научно обоснованного подхода к проектной оценке производитель-

ности ШС в функции суммарных наработок до отказа наименее работоспособных (низконадежных, ресурсных)  $i$ -х деталей и узлов и длительности их годовых простоев в заданных условиях эксплуатации. Далее рассматривается возможный вариант ее аналитического решения.

**Методика прогнозирования и повышения производительности основного оборудования главных линий**

В основу решения озвученной проблемы могут быть положены базовые идеи системного подхода к исследованию, анализу и улучшению технологии и оборудования листовых станов, предложенные в работах [7, 8]. Рассматривая систему «прокатный стан – полоса» с позиций экономической кибернетики [7], автор полагает следующее. Исследуемая система в соответствии с уравнением (1) преобразует годовое рабочее время  $T_r$ , ч/год (как разность номинального количества часов в году и количества часов, затрачиваемых на простои, см. (2)) в количество прокатываемых тонн в год  $Q$ , т/год, умножением его на часовую производительность  $q$ , т/ч (рис. 1, а).

Если, например, рассмотреть первую группу ресурсных элементов – рабочие валки ( $i = 1$ ) и исследовать время  $T_{i=1}$ , затрачиваемое в течение года на их перевалки, то по тому же кибернетическому принципу можно полагать, что количество прокатанных тонн в год  $Q$ , т/год, может быть преобразовано в «отрицательное» годовое время перевалок рабочих валков  $T_{i=1}$ , ч/год, в соответствии с уравнением

$$-T_{i=1} = f \cdot Q, \tag{3}$$

где  $f = T_{i=1} / Q = t_{i=1} / [Q]_{i=1}$  – передаточный коэффициент цепи отрицательной обратной связи (рис. 1, б), который определяет долю времени перевалок рабочих валков на одну тонну проката, ч/т [7];  $t_{i=1}$  – длительность простоя стана на одну перевалку рабочих валков, ч;  $[Q]_{i=1}$  – количество металла, прокатываемого между перевалками, характеризует ресурс рабочих валков в тоннах согласно ГОСТ 27.002 [9].

Совместным решением уравнений (1) и (3) получаем зависимость [7]:

$$Q = \frac{1}{1 + q \cdot f} \cdot q \cdot \left( T_{NOM} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right), \tag{4}$$

которая отражается структурной схемой на рис. 1, в. Эта зависимость описывает взаимодействие двух преобразователей  $q$  и  $f$ , соединенных по схеме отрицательной обратной связи. Учитывая выражение для определения  $f$ , уравнение (4) можно представить в виде искомой зависимости:

$$Q = \frac{Q}{Q + q \cdot T_{i=1}} \cdot q \cdot \left( T_{NOM} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right) = \frac{[Q]_{i=1}}{[Q]_{i=1} + q \cdot t_{i=1}} \cdot q \cdot \left( T_{NOM} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right). \tag{5}$$

Учитывая, что ресурс рабочих валков в часах определяется отношением  $t_{r\ i=1} = [Q]_{i=1} / q$ , зависимость (5) для проектного расчета производительности ШС можно записать в виде

$$Q = \frac{t_{r\ i=1}}{t_{r\ i=1} + t_{i=1}} \cdot q \cdot \left( T_{NOM} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right). \tag{6}$$

Подобный анализ с использованием структурных схем на рис. 1, в и уравнений (4) - (6) можно повторить для других ресурсных элементов: опорных валков ( $i = 2$ ), шарниров универсальных шпинделей ( $i = 3$ ), подшипниковых опор ( $i = 4$ ), зубчатых зацеплений ( $i = 5$ ) и так далее для  $i = 6, \dots, k$ .

Универсальность полученного уравнения (6) при подстановке в него требуемого значения индекса  $i$  (вместо значения  $i = 1$ ) заключается в том, что оно отвечает поставленной цели и связывает эффективность функционирования  $Q$  основного оборудования ШС одновременно с ресурсом  $t_{r\ i}$  исследуемого низконадежного  $i$ -го элемента и длительностью  $t_i$  его единичного простоя для восстановления его работоспособности.

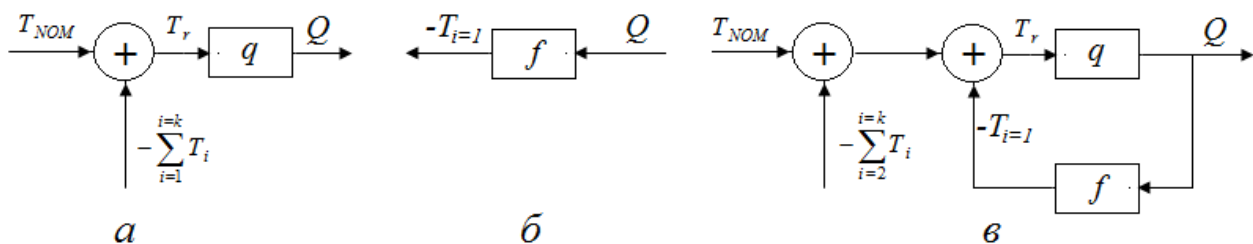


Рис. 1. Схемы преобразования для расчета производительности ШС [7]

Если значения единичных  $t_i$  и годовых  $T_i$  простоев для восстановления (ремонта) тех или иных  $i$ -х низконадежных элементов определяется продолжительностью операций ГОиР [3] и в проектных расчетах производительности  $Q$  по условию (6) выступают в качестве заданных параметров, то проблема аналитического прогнозирования их ресурса  $t_{ri}$  в современной литературе находится в стадии разработки. Ниже представлен авторский вариант ее решения.

**Модели параметрических постепенных отказов низконадежных элементов**

Для проектного расчета ресурса  $t_{ri}$   $i$ -х элементов ГЛ ШС рассмотрим модели их параметрических отказов по критериям прочности и износостойкости материалов. При их построении, на наш взгляд, можно использовать систему базовых уравнений физической теории надежности технических объектов [10-13] в совокупности с основополагающими зависимостями кинетического подхода: термодинамической теории прочности твердых тел и энергомеханической концепции изнашивания узлов трения [14-17].

В этом случае модель процесса формирования постепенных отказов  $i$ -го исследуемого элемента по любому критерию усталостной прочности (при растяжении, сжатии, изгибе, кручении, сложном сопротивлении, контактном взаимодействии и др.) согласно [10, 11, 13] будет включать:

– систему определяющих уравнений для последовательной оценки:

– скорости повреждаемости  $i$ -го элемента при прокатке  $j$ -й партии полос последовательно для  $j = 1, 2, 3, \dots$ :

$$\dot{u}_{ei j} = k_{cmp i} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot T_{ij}}{h} \cdot U'_0(\sigma_{0ij}, T_{ij}) \times \exp\left(-\frac{U'_0(\sigma_{0ij}, T_{ij})}{k \cdot T}\right) \cdot sh\left(\frac{A_{fij}^0}{2 \cdot k \cdot T_{ij}}\right);$$

– текущей плотности дефектов его материала:

$$u_{ei j} = u_{ei 0} + \left(\sum \dot{u}_{ei j} \cdot t_j\right);$$

– ресурса  $i$ -го элемента:

$$t_{pi}^{\Pi} = k_{\Pi} \cdot \left[ \left(\sum t_{j-1}\right) + \frac{u_{ei j} - u_{ei j-1}}{\dot{u}_{ei j}} \right],$$

при  $u_{ei j} \geq u_{ei*}$ ,  $j = j_p^*$ , конец расчета;

– зависимости для расчета входящих в систему (7) параметров, отражающие краевые условия эксплуатации, технологические и конструктивные особенности исследуемой  $i$ -й детали.

Параметры, входящие в уравнения системы (7), определяются согласно [11, 13, 14].

$\dot{u}_{ei j}$  – скорость накопления энергии искажений (дефектов) атомно-молекулярной структуры материала наиболее напряженного локального объема материала  $i$ -й исследуемой детали в процессе прокатки  $j$ -й партии полос.

$u_{ei j}$  – текущая суммарная плотность энергии дефектов, накопленная в локальном наиболее напряженном объеме материала, где действует максимальное расчетное напряжение  $\sigma_{ij}$ , после прокатки партий полос последовательно от первой до текущей  $j$ -й.

$t_j = G_j / (\rho_j \cdot b_j \cdot h_j \cdot V_j)$  – длительность прокатки  $j$ -й партии полос массой  $G_j$  с поперечным сечением  $b_j \cdot h_j$ , плотностью материала  $\rho_j$ , со скоростью прокатки  $V_j$ .

$k_{stri}$  – коэффициент упрочнения структуры материала [11].

$k, h$  – постоянная Больцмана и постоянная Планка.

$u_{ei 0}$  и  $u_{ei*}$  – начальное и критическое значение плотности скрытой энергии дефектов  $u_{ei}$  структуры материала  $i$ -го элемента соответственно [14].

$U'_0(\sigma_{0ij}, T_{ij})$  – энергия активации образования дефектов при температуре  $T_{ij}$  и напряжении  $\sigma_{0ij}$  ( $\sigma_{0ij}$  – среднее напряжение или шаровая часть тензора напряжений;  $T_{ij}$  – текущая ( $j$ -я) средняя по деформируемому объему температура материала элемента) [13, 14].

$A_{Vij}^0$  – работа шарового тензора напряжений (среднего напряжения)  $\sigma_{0ij}$  [13, 14].

$t_{ri}^P$  – расчетный ресурс исследуемого  $i$ -го элемента.

$j_p^*$  – номер партии полос, предшествующей предельной – ( $j_p^* + 1$ )-й, в процессе прокатки которой произойдет отказ  $i$ -го элемента.

$k_{pi}$  – коэффициент, учитывающий время пауз между полосами при прокатке.

Алгоритмизация описанной выше модели отказов определит методику аналитической оценки

ресурса  $t_{ri}^P$  любого исследуемого  $i$ -го элемента ГЛ ШС по требуемому критерию прочности.

Модель процесса формирования отказов наименее работоспособных  $i$ -х узлов трения ГЛ ШС, построенная на базовом уравнении энерго-механической концепции изнашивания трибосопряжений для оценки скорости их изнашивания  $\dot{y}_{ij}$ , будет включать [13, 15]:

– систему определяющих уравнений для последовательного расчета:

$$\left. \begin{aligned} & \text{– скорости изнашивания } i\text{-го элемента} \\ & \text{при прокатке } j\text{-й партии полос} \\ & \text{последовательно для } j = 1, 2, 3, \dots: \\ & \dot{y}_{ij} = \frac{\alpha_i^* \cdot v_i \cdot f_{\text{мех}j}^y \cdot P_{ij} \cdot V_{\text{ск}i}}{\Delta H_{\text{Si}} - u_{ei0} - u_{Ti j}}; \\ & \text{– текущего износа сопряжения:} \\ & y_{ij} = \left( \sum \dot{y}_{ij} \cdot t_j \right); \\ & \text{– ресурса } i\text{-го элемента:} \\ & t_{pi}^H = k_{\text{Пi}} \cdot \left[ \left( \sum t_{j-1} \right) + \frac{y_{ij} - y_{i j-1}}{\dot{y}_{ij}} \right], \\ & \text{при } y_{ij} \geq y_{i^*}, \quad j = j^*, \quad \text{конец расчета;} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

– математические выражения для расчета входящих в систему (8) параметров, определяющих краевые условия исследуемого сопряжения при его изнашивании в стационарных условиях трения.

Параметры, входящие в уравнения системы (8), определяются согласно [11, 13, 14, 15, 18].

$\dot{y}_{ij}$  и  $y_{ij}$  – скорость изнашивания исследуемого  $i$ -го сопряжения при прокатке  $j$ -й партии полос и его текущий суммарный износ.

$\alpha_i^*$  и  $v_i$  – коэффициент перекрытия и коэффициент поглощения внешней энергии.

$\alpha_i^* = A_{ai} / A_{Ti}$  – коэффициент перекрытия площади трения  $A_{Ti}$  изнашиваемого трибоэлемента номинальной площадью контакта  $A_{ai}$ .

$v_i$  – коэффициент поглощения внешней энергии трения поверхностным слоем материала изнашиваемого элемента [13, 15, 18].

$f_{\text{мех}j}^y$  – механическая составляющая коэффициента трения, определяемая согласно [13, 15].

$P_{ij}$  – среднее (или максимальное) номинальное давление на контакте, возникающее в сопряжении при прокатке  $j$ -й партии полос.

$V_{\text{ск}i}$  – скорость относительного скольжения элементов  $i$ -го сопряжения.

$u_{ei^*}$  – критическая энергоёмкость материала поверхностного слоя изнашиваемого элемента [14].

$t_{ri}^I$  – расчетный ресурс исследуемого  $i$ -го узла трения.

$J_I^*$  – номер партии полос, предшествующей предельной –  $(j_I^* + 1)$ -й, в процессе прокатки которой произойдет отказ исследуемого узла.

Алгоритмизация описанной выше модели отказа узлов трения определит методику аналитической оценки ресурса  $t_{ri}^I$  любого исследуемого  $i$ -го трибосопряжения ГЛ ШС по критерию его износостойкости.

### Заключение

Обобщая полученные результаты, можно заключить, что совокупность уравнений (6) – (8) и вспомогательных зависимостей позволяет:

– выполнить прогнозную оценку ресурса всех наименее работоспособных элементов главных приводов широкополосных станков и определить соответствующий им уровень эффективности функционирования исследуемого широкополосного стана;

– теоретически исследовать эффективность различных конструктивных и технологических способов продления ресурса  $t_{ri}$  низконадежных деталей и узлов и выбирать на этой основе оптимальные (по критерию максимальной производительности) решения.

### Список литературы

1. Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
2. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: учебник. М.: Логос, 2003. 208 с.
3. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Развитие теории прогнозирования надежности деталей машин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №2. С. 26-32.
4. Надежность в машиностроении: справочник / под общ. ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. СПб.: Политехника, 1992. 719 с.

5. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки: справочник. М.: Металлургия, 1986. 430 с.
6. Прокатное производство: 3-е изд., перераб. и доп. / П.И. Полухин, Н.М. Федосов, А.А. Королев, Ю.М. Матвеев. М.: Металлургия, 1982. 686 с.
7. Заверюха В.Н. Влияние изнашиваемости рабочих валков на производительность станов горячей прокатки // Известия вузов. Черная металлургия. 1976. №9. С. 99-101.
8. Заверюха В.Н., Румянцев М.И., Анцупов В.П. Формализация и классификация кинематических структур способов прокатки // Известия вузов. Черная металлургия. 1983. №5. С. 148-149.
9. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 22 с.
10. Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov A.V., Antsupov V.P. (2016) Estimation and assurance of machine component design lifetime. *Procedia Engineering*. Т. 150:726-733. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.094.
11. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Аналитический метод проектной оценки ресурса элементов металлургических машин // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. №1. С.30-35.
12. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
13. Оценка ресурса деталей и узлов металлургических машин на стадии их проектирования и эксплуатации: учеб. пособие / А.В. Анцупов (мл.), М.Г. Слободянский, В.П. Анцупов, А.В. Анцупов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 211 с.
14. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел / под ред. С.В. Федорова. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. Ч.III. Основы эргодинамики деформируемых тел. 222 с.
15. Energy-Mechanical Concept of the Durability Prediction of Friction Units on the Wear Resistance Criterion of Elements / A.V. Antsupov, A.V. Antsupov, V.P. Antsupov, M.G. Slobodianskii, V.A. Rusanov // *Journal of Friction and Wear*. 2016. Т.37. №5. С.494-499. DOI: 10.3103/S1068366616050032.
16. Выбор износостойких материалов при проектировании узлов трения / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов и др. // Материалы 67-й научно-технической конференции: сб. докл. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. Т. 1. С. 197-200.
17. Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov V.P., Slobodianskii M.G./ (2016) Analytical model of wear-out failures of working rolls at wide-strip rolling mills. *Procedia Engineering*. Т. 150: 411 – 415. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.754.
18. Прогнозирование надежности деталей и узлов металлургического оборудования при их проектировании и эксплуатации: учеб. пособие / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, М.Г. Слободянский. Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 114 с.

#### Сведения об авторах

**Анцупов Алексей Викторович** – канд. техн. наук, доц., каф. ПиЭММО, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Анцупов Александр Викторович** – д-р техн. наук, проф., каф. ТМС, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва.

**Анцупов Виктор Петрович** – д-р техн. наук, проф., каф. ПиЭММО, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск E-mail: antsupov.vp@gmail.com.

**Ляшева Юлия Сергеевна** – аспирант каф. ПиЭММО, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.



УДК 669.292.3 : 669.054.82

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВАНАДИЯ ИЗ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ**

Махоткина Е.С., Шубина М.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Показаны основные современные источники получения ванадия в мире. Даны основные характеристики и запасы титаномагнетитовых руд группы месторождений Южного Урала. Рассмотрены возможные способы извлечения ванадия из рудного материала. Для определения возможности выделения ванадия из указанных руд были проведены предварительные опыты, различающиеся технологией извлечения ценного компонента. Предлагаются меры по повышению степени извлечения ванадия. Рассматриваются перспективы развития технологий извлечения ванадия из титаномагнетитов различного происхождения.

**Ключевые слова:** ванадий, титаномагнетитовая руда, кислотное выщелачивание, обжиг, степень извлечения ванадия, ильменит, магнетит.

**Введение**

В настоящее время для получения ванадия используется несколько источников сырья. Основными являются металлургические ванадийсодержащие шлаки, получаемые в результате переработки рудного сырья при производстве стали (около 71% мирового производства ванадия). Из вторичных продуктов (зола, катализаторы, отходы от сжигания нефтяного топлива, сбросные воды и т.д.) извлекается около 12% ванадия в мире. Из первичной руды в качестве основного продукта получают примерно 17% от мирового производства ванадия [1, 2].

Основным источником сырья для получения феррованадия и других его соединений является широко распространённая на Земле титаномагнетитовая руда. Группа месторождений титаномагнетитовых руд расположена на Урале (Кусинское, Копанское, Медведёвское). Эти руды содержат в среднем от 14,0 до 22,2% железа, в них присутствует титан и ванадий. По оценкам балансовые запасы ильменитовых руд месторождения составляют 428 млн т (среднее содержание  $TiO_2$  – 7,06%, Fe – 14,95%,  $V_2O_5$  – 0,11%). Забалансовые запасы титаномагнетитовых руд оценены в 109,7 млн т (среднее содержание  $TiO_2$  – 6,34%, Fe – 22,20%,  $V_2O_5$  – 0,25%). Суммарные запасы ильменитовых и титаномагнетитовых руд равны 537,7 млн т (среднее содержание Fe – 16,43%,  $V_2O_5$  – 0,14%) [3, 4].

Вкраплённость титаномагнетита в рудах может быть различной. Титанистые железные руды месторождения представляют собой тонкую вкраплённость титаномагнетита во вмещающих породах и содержат от 15 до 17% общего железа.

Ильменит, магнетит и титаномагнетит являются главными рудными минералами Медведёвского месторождения. Текстульная разновидность руды является определяющим фактором при разработке различных технологических схем и способов при переработке руды с целью получения концентратов или извлечения определённых компонентов.

Руды Медведёвского месторождения, расположенного на западном склоне Южного Урала, предполагается вовлечь в основной сырьевой поток для формирования аглошихты ПАО «ММК». Титаномагнетиты, как правило, используют без извлечения ванадия из-за недостатка железорудного сырья на уральских заводах. При этом существует достаточно технологий по извлечению ванадия из рудного материала. Обычно каждый процесс разрабатывается с учётом относительных количеств ванадия, титана, железа и других компонентов.

В данной работе рассматривалась возможность извлечения ванадия из титаномагнетитов Медведёвского месторождения. Был проведён рентгенофлуоресцентный анализ проб руды месторождения, результаты которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования проб  
(полуколичественный метод анализа)

Результаты измерений, %							
Fe <sub>общ.</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
18,0-19,0	37,3-38,1	7,25-7,47	5,51-5,64	4,95-5,37	<b>0,25</b>	0,14-0,16	12,8-13,2

Кроме указанных компонентов в исследуемом материале присутствуют оксиды фосфора (0,06%) и цинка (0,02%).

По содержанию  $TiO_2$  данная разновидность титаномагнетита относится к среднетитанистым



(5–9% оксида титана (IV)) [5]. Ванадий часто связан с титаном, отделяемым в качестве примеси при извлечении ванадия, во время обработки руды. Причём повышение содержания титана в руде затрудняет извлечение ванадия [6, 7].

В настоящее время довольно часто добыча титаномагнетитов связана с извлечением содержащегося в них ванадия (ЮАР, КНР). В целом технология процесса состоит из дробления рудного материала, обжига с добавками, переводящими ванадий в растворимые соединения, выщелачивания растворов и дальнейшее извлечение из них ванадия различными способами [8, 9]. Возможно экстрагирование руды серной или соляной кислотой.

### Материалы и методы исследования

В данной работе для извлечения ванадия применили различные приемы разложения титаномагнетитовой руды [10]. В первой серии экспериментов применили кислотное выщелачивание руды. Из помолотого рудного материала приготовили образцы массой 10 г, которые обработали раствором соляной кислоты – 20 и 30%. После суточной выдержки руды в кислом растворе провели выщелачивание, затем осадки отделили от растворов и отправили на анализ.

Во второй серии опытов применили технологию, включающую обжиг руды с карбонатом натрия [11, 12]. Для проведения эксперимента приготовили навески измельченной руды массой 10 г, добавили к каждой из них по 5 г Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Усредненную пробу нагрели в печи (нагрев 1ч 10 мин) до температуры 850°С и выдержали при этой температуре один час. После остывания обожженный материал отправили на выщелачивание водой. Процесс выщелачивания происходил при средней температуре 55-57°С в течение 1 часа 30 мин. Затем осадки отделили от растворов и отправили на анализ.

### Результаты и их обсуждение

Состав образцов после выщелачивания в первой серии экспериментов представлен в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследования образцов после кислотной обработки

Результаты измерений, %								
Образец	Fe <sub>общ.</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Образец №1 (20%)	16,9	40,0	6,67	3,49	4,94	<b>0,18</b>	0,16	9,26
Образец №2 (30%)	14,5	41,2	8,47	5,01	н.о.	<b>0,20</b>	0,21	12,0

Согласно предварительным расчётам, степень извлечения ванадия в раствор незначительна и составила 28 и 20%.

Состав образцов после обработки во второй серии экспериментов представлен в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследования образцов после водного выщелачивания

Результаты измерений, %								
Образец	Fe <sub>общ.</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Образец №1	17,7	35,5	7,55	3,32	4,88	<b>0,18</b>	0,17	10,2
Образец №2	17,3	35,8	7,66	3,19	4,48	<b>0,18</b>	0,18	10,1

В данном случае степень извлечения ванадия также невелика и составила по первым предварительным расчётам 28%.

В целом результаты экспериментов показали возможность извлечения ванадия из титаномагнетитов Медведёвского месторождения. Вероятными причинами невысокой степени извлечения ванадия могут быть присутствие трудно вскрываемых минералов ванадия; низкое содержание компонента в исходном материале и сопутствующие примеси. Для повышения степени извлечения ванадия в дальнейших экспериментах возможно применение добавок, переводящих ванадий магматических пород из трехвалентного состояния в оксид ванадия (V).

### Заключение

Таким образом, проведённые теоретические и экспериментальные исследования и обработка полученных результатов позволяют сделать вывод о том, что выбранное направление переработки титаномагнетитовой руды Медведёвского месторождения может быть применено при комплексном подходе к освоению месторождения. Повышение степени извлечения ванадия можно достигать, применяя добавки, переводящие ванадий из трехвалентного состояния, в котором он находится в магматических породах, в оксид ванадия (V). Перспективы дальнейшей разработки темы обусловлены большими запасами руд данного типа и актуальностью задачи получения как оксида ванадия (V), так и отечественного феррованадия.

### Список литературы

1. <http://www.ferro-alloy.com/ru/vanadium/vanadium-market-overview/> -Рынок ванадия.
2. Bao S.X. et al. The production, consumption and market analysis of vanadium in the world // S.Bao [et al] /China Mining Magazine. 2009. №7. Pp. 12 – 15.

3. <http://chel-portal.ru/encyclopedia/mestorozhdenie-ilmenitovyh-i-titanomagnetitovyh-rud/t/10350> - Энциклопедия Челябинской области.
4. Чижевский В.Б., Шавакулева О.П., Гмызина Н.В. Обогащение титаномagnetитовых руд Южного Урала // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С. 5 – 7.
5. Комплексное использование титаномagnetитовых руд / Борисенко Л.Ф., Делицын Л.М., Полубабкин В.А., Усков Е.Д. М., 1997. 65 с.
6. <https://www.greatmining.com/vanadium.html> Vanadium Mining.
7. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение титана из шлака процесса прямого восстановления титаномagnetитов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2015. №1. С.255–258.
8. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Экологические ресурсосберегающие аспекты использования техногенного ванадийсодержащего сырья // Черная металлургия. 2018. №3 (1419). С.81–86.
9. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение ванадия из рудного и техногенного сырья Кусинского месторождения титаномagnetитов // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 3 (22). С. 22-25.
10. Makhotkina E.S., Shubina M.V., Shubin I.G. Investigation of Hydrometallurgical Processing of Titanomagnetite Ore Enrichment Waste // Solid State Phenomena. 2020. Т. 299. С. 1115-1120.
11. R. Li, T. Liu, Y. Zhang, J. Huang, C. Xu. Efficient Extraction of Vanadium from Vanadium–Titanium Magnetite Concentrate by Potassium Salt Roasting Additives // Minerals. 2018. 8 (25). Pp.2-14.
12. Шубина М.В., Махоткина Е.С. Исследование влияния режимов выщелачивания на степень извлечения ванадия из металлургических шлаков // Теория и технология металлургического производства. 2019. № 4 (31). С. 13-17.

#### Сведения об авторах

**Махоткина Елена Станиславовна** – канд. техн. наук, доц., каф. металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [lena.makhotkina@yandex.ru](mailto:lena.makhotkina@yandex.ru)

**Шубина Марианна Вячеславовна** – канд. техн. наук, доц., каф. металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [shubina\\_mar@mail.ru](mailto:shubina_mar@mail.ru)

УДК 621.74

## ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЯЗУЮЩИХ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Овчинникова М.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В работе показана возможность использования кремнезольных связующих материалов для изготовления керамических форм для литья по выплавляемым моделям. Кремнезольные связующие являются экологически чистыми материалами, соответствуют всем требованиям по защите окружающей среды, техники безопасности и санитарно-гигиенических норм предприятия, в отличие от использования связующих материалов на основе этилсиликата. Как показывает практика, применение кремнезольных связующих улучшает качество поверхности, позволяет получить отливки с геометрической и размерной точностью. Применение таких связующих для изготовления керамических оболочек в литье по выплавляемым моделям позволяют получить качественные отливки для различных отраслей машиностроения.

**Ключевые слова:** водные связующие, кремнезольные связующие, суспензия, керамическая форма, огнеупорные материалы, отливка, литье по выплавляемым моделям.

В мире стремительно увеличивается производство отливок специальными способами литья, относительно традиционного способа получения отливок в песчано-глинистых формах, за счет ряда преимуществ: повышенное качество, чистота поверхности и точность размеров; улучшенная структура и свойства отливок; получение отливок с минимальными припусками на механическую обработку.

Одним из способов, обеспечивающих высокую точность литых заготовок, является литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) в керамические формы. Отливки, полученные способом литья по выплавляемым моделям, по геометрической точности максимально приближены к готовой детали и в некоторых случаях не требуют механической обработки. Такой способ изготовления отливок имеет несколько операций с использованием различных материалов. Это определяет повышенную себестоимость готовой продукции [1].

От качества керамической формы зависит качество полученных отливок, в частности их геометрическая и размерная точность, а также шероховатость поверхности. Технологические и физико-механические свойства самой керамической формы во многом определяются свойствами связующих материалов и технологией их приготовления [1, 2].

В настоящее время технология изготовления отливок способом ЛВМ требует значительного совершенствования с применением импортоза-

мещающих экологически чистых материалов, обладающих улучшенными свойствами и не повышающие себестоимость полученных отливок.

За рубежом уже отказались от органоминеральных связующих и перешли на кремнезольные, которые выпускаются под различными марками. Применение водного связующего улучшает качество поверхности, исключает образование пригара, что является частым дефектом при получении отливок в этилсиликатных формах. Наряду с повышением качества использование водных связующих сокращает производственные затраты, снижая себестоимость готового изделия по сравнению с процессом на основе этилсиликата. При переходе на водное связующее производство становится пожаро-, взрывобезопасным и экологичным [3].

С целью замены импортных материалов для изготовления керамических форм отечественной промышленностью разработаны кремнезольные связующие на водной основе марки ВТ. Связующие ВТ являются экологически чистыми материалами, технология их использования в ЛВМ не требует применения вредных веществ. Суспензии на основе таких связующих отличаются высокой живучестью, их можно хранить без потери свойств в течение восьми и более месяцев.

Кремнезоли – коллоидные дисперсии двуокиси кремния в воде, стабилизированные гидроокисями щелочных металлов. Они содержат силанольные группы  $\equiv \text{Si} - \text{OH}$ , которые поликонденсируются с образованием прочных силоксановых связей, например  $\equiv \text{Si} - \text{O} - \text{Si} \equiv$ ; перезаряжаются в воде,

подкисленной соляной кислотой. Кремнезоли, разбавленные водой до 3,5-6 %  $\text{SiO}_2$ , в сочетании с водноспиртовыми этилсиликатными связующими при совмещенном способе приготовления суспензий существенно увеличивают прочность оболочек, что позволяет снизить расход ЭТС 40 и исключить органические взрыво- и пожароопасные жидкости (растворители).

Кремнезольями являются устойчивые коллоидные растворы наночастиц  $\text{SiO}_2$  двуокиси аморфного кремния, как правило, в водной среде. Находящиеся в воде аморфные частицы  $\text{SiO}_2$  имеют сферическую форму и отрицательный заряд. Частицы раствора практически не склонны к осаждению. Они находятся в движении за счет воздействия тепловой энергии [3, 4].

Для использования в качестве связующего материала для изготовления керамических форм концентрация  $\text{SiO}_2$  составляет от 22 до 30%, а размер частиц от 7 до 16 нм.

Как правило, наполнителем для приготовления суспензии служат огнеупорные материалы мелкой фракции. В качестве наполнителей для приготовления суспензий выбран белый электрокорунд марки 25А. Электрокорунд – кристаллический оксид алюминия, химически стоек, не образует на поверхности отливок питтинга (включений веществ, содержащих оксиды металла и формы) [5].

Известно, что одним из показателей качества поверхности отливки является качество приготовленной керамической суспензии и нанесения ее на модельный блок. Суспензия должна иметь достаточную плотность для создания прочного каркаса во время формирования керамической оболочки.

Зерна одной фракции или близкие по размерам не смогут обеспечить плотную их упаковку. Для плотной упаковки соотношение между количеством крупной и мелкой фракций должно быть таким, чтобы пустоты между крупными зёрнами были заполнены более мелкими.

Для приготовления суспензии выбраны фракции наполнителя: F1200 и F360.

Перед использованием суспензии в производстве необходимо получить однородную, однородную структуру смеси. Для этого определено время непрерывного перемешивания суспензии в течение не менее 20 ч.

Для получения химически стойкой оболочковой формы желательно применять в качестве ее основы и наполнителя один и тот же огнеупорный материал. Так как материалом наполнителя в суспензии выбран белый электрокорунд, то материалом основы-обсыпки для керамических форм также будет белый электрокорунд марки 25А крупных фракций – шлифзерно фракции F60 – обсыпка первого слоя, F36 – обсыпка второго слоя, F30 – обсыпка третьего и последующих слоев.

Формирование оболочки включает: смачивание суспензией блоков моделей, обсыпку блоков зернистым огнеупором, сушку форм. При проведении работ по нанесению огнеупорного покрытия вязкость суспензии для первого слоя составила 75 с, а последующих слоев – 45 с.

Нанесение суспензии на модельный блок проводилось на автоматической роботизированной линии изготовления керамических форм. Для исследования прочности керамики требовалось нанести 6 слоев огнеупорного покрытия на модельные образцы.

Затвердевание водных связующих систем происходит путем испарения воды и прогрессивной коагуляции частиц  $\text{SiO}_2$ . В состоянии геля они закупоривают огнеупорные частицы, находящиеся в суспензии.

Сушка слоев керамической оболочки проводилась в сушильном помещении, где потоками воздуха от поворотных вентиляторов происходит обдув блока со всех его сторон. Как и относительная влажность, поток воздуха по поверхности влажной оболочковой формы оказывает прямое влияние на скорость сушки. Ввиду чувствительности первых слоев для деликатной сушки различных частей формы необходимо применять лишь умеренные скорости потока воздуха. Скорость вращения вентиляторов составила 40 об/мин. Температура в помещении сушки слоев  $25^\circ\text{C}$ . Сушка каждого слоя керамического покрытия составила 1 ч. Удаление воскового состава проводилось в бойлерклаве при давлении пара 8 бар. Прокалка формы проводилась в печи при температуре  $900^\circ\text{C}$ .

Прочность оболочковых форм оценивают испытанием образцов при статическом изгибе. Значения прочности сырых и прокаленных керамических образцов следующие:

– прочность сырых образцов составляет от 38 до  $50 \text{ кгс/см}^2$ ;

– прочность прокаленных образцов составляет от 55 до  $68 \text{ кгс/см}^2$ .

Отливки, полученные литьем в керамические формы с указанной прочностью, имели шероховатость поверхности от 4 до 6,3 мкм. Удаляемость керамики во время выбивки отливок из форм удовлетворительная. Дефекты в отливках отсутствовали, что говорит о достаточной газопроницаемости керамической формы при выбранных фракциях материала обсыпки.

Таким образом, изготовление керамических форм для литья по выплавляемым моделям из суспензий на основе кремнезольных связующих позволяет получить качественные отливки, а также сокращает производственные затраты, снижая себестоимость готового изделия.

**Список литературы**

1. Иванов И.Н. Экономика промышленного предприятия. М.: Инфра-М, 2018. 320 с.
2. Чуркин Б.С., Чуркин А.Б., Категоренко Ю.И. Специальные способы литья. Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2012. 190 с.
3. Федосов К.С. Материалы на основе кремнезема. М.: БИНОМ, 2010. 147 с.
4. Варлов К.Г., Лазурин С. В. Кинетика формообразования в литье. Череповец: Издательский дом «ПРО», 2010. 18 с.
5. Покровский В.А., Ткачев И.М. Формовочные материалы и смеси. М.: Машиностроение, 2010. 67 с.

**Сведения об авторах**

**Вдовин Константин Николаевич** – д-р техн. наук, проф., каф. литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. Тел.: 29-84-19. E-mail: [Vdovin@magtu.ru](mailto:Vdovin@magtu.ru)

**Феоктистов Николай Александрович** – зав. каф. литейных процессов и материаловедения; канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. Тел.: 29-85-30. E-mail: [fna87@mail.ru](mailto:fna87@mail.ru)

**Овчинникова Марина Вячеславовна** – аспирант гр. МТа-16-3 кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [ovchinnikova\\_m@inbox.ru](mailto:ovchinnikova_m@inbox.ru)



УДК 669:662.9:658.512

## ОПТИМИЗАЦИЯ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИПОТОЧНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рожков Г.К.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В работе приведён пример решения задачи оптимизации калибровки прокатных валков и рассмотрены перспективы развития поиска оптимального решения с использованием усовершенствованного многопоточного алгоритма.

**Ключевые слова:** многопоточность, мультипоточность, OptimPass, дискретизация вычислений, оптимизация, калибровка валков, энергоэффективность.

Одним из основных направлений развития металлургического производства является решение задачи повышения энергоэффективности технологического процесса без модернизации основного механического оборудования. Часто традиционные методы и принципы производства не позволяют добиться максимальной эффективности, и поиск оптимального решения становится сложной задачей [1, 2].

Так, например, поиск оптимального калибра сортопрокатной клетки с точки зрения энергоэффективности заключается в переборе всех возможных решений, количество которых может достигать десятков и сотен тысяч, в зависимости от точности необходимых результатов [3, 4]. Мощности современных ЭВМ могут справляться с подобными задачами при условии наличия грамотно написанного алгоритма [1-4].

Для решения задачи поиска оптимальной формы вытяжных калибров сортовых клетей по критерию максимума вытяжной способности и энергоэффективности на кафедре технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет и м. Г.И. Носова» было разработано программное обеспечение «OptimPass». Блок-схема алгоритма программы представлена на рис. 1, а на рис. 2 представлен пользовательский интерфейс [5].

Первоначальная версия ПО «OptimPass» была написана без использования многопоточных вычислений, предоставляемых современными ЭВМ. Это обстоятельство сильно осложняло работу. Учитывая тот факт, что даже при обеспечении минимальной точности и разбиении четверти калибра на шесть точек, возможных вариантов насчитываются сотни тысяч. При этом расчёт одного оптимального калибра занимал около недели

машинного времени на ЭВМ следующих характеристик [5]:

- ЭВМ типа IBM PC (или совместимая) с операционной системой Microsoft Windows (XP,7,8) разрядностью 64 бит;
- многоядерный ЦП (CPU) с тактовой частотой свыше 3 ГГц;
- объём оперативной памяти, выделяемой для работы программы, не более 64 МБ;
- объём свободного места ПЗУ (HDD или SSD) не менее 16 МБ.

При увеличении числа точек (координатные элементы для построения контура оптимального калибра) достигнуть желаемых результатов не удавалось с течением времени – расчёты занимали до трёх месяцев, а результат по своей точности не соответствовал в тысячи раз. В связи с этими обстоятельствами коллектив авторов в 2014 году выделил основные направления дальнейшей оптимизации программного кода, направленные на улучшение производительности программного продукта [5, 6]:

- использование SIMD-инструкций;
- использование дополнительных регистров и переход на 64-битную платформу и ОС;
- распараллеливание вычислений;
- использование графических ускорителей в расчетах;
- использование языка программирования JAVA для обеспечения высокой кросс-платформенности приложений.

Первоочередной задачей была выбрана идея распараллеленных вычислений. Суть подобной оптимизации программного кода заключается в поиске решения на основе разбиения пространства поиска на несколько частей, каждая из которых выполняется в собственном вычислительном потоке. В данном случае каждому вычислительному потоку выдается определенный объем вычисле-



ний, а именно расчет определенного количества вариантов, что позволяет эффективно утилизировать вычислительную мощность процессора (или, в перспективе, графического процессора), так как нет необходимости в межъядерном обмене информацией. Каждый поток выполняет собственную индивидуальную задачу. И лишь после окончания выполнения своей задачи происходит сравнение результатов всех вычислительных потоков и выбор наилучшего [6, 7].

При этом важно принять во внимание, что при разработке многопоточного приложения наращивание количества ядер и потоков в процессорах не приносит пропорционального роста производительности – это объясняется законом Амдала, который показывает ограничение роста производительности вычислительной способности с ростом количества потоков вычисления при соответствующей доле параллелизма в программном коде (рис. 3).

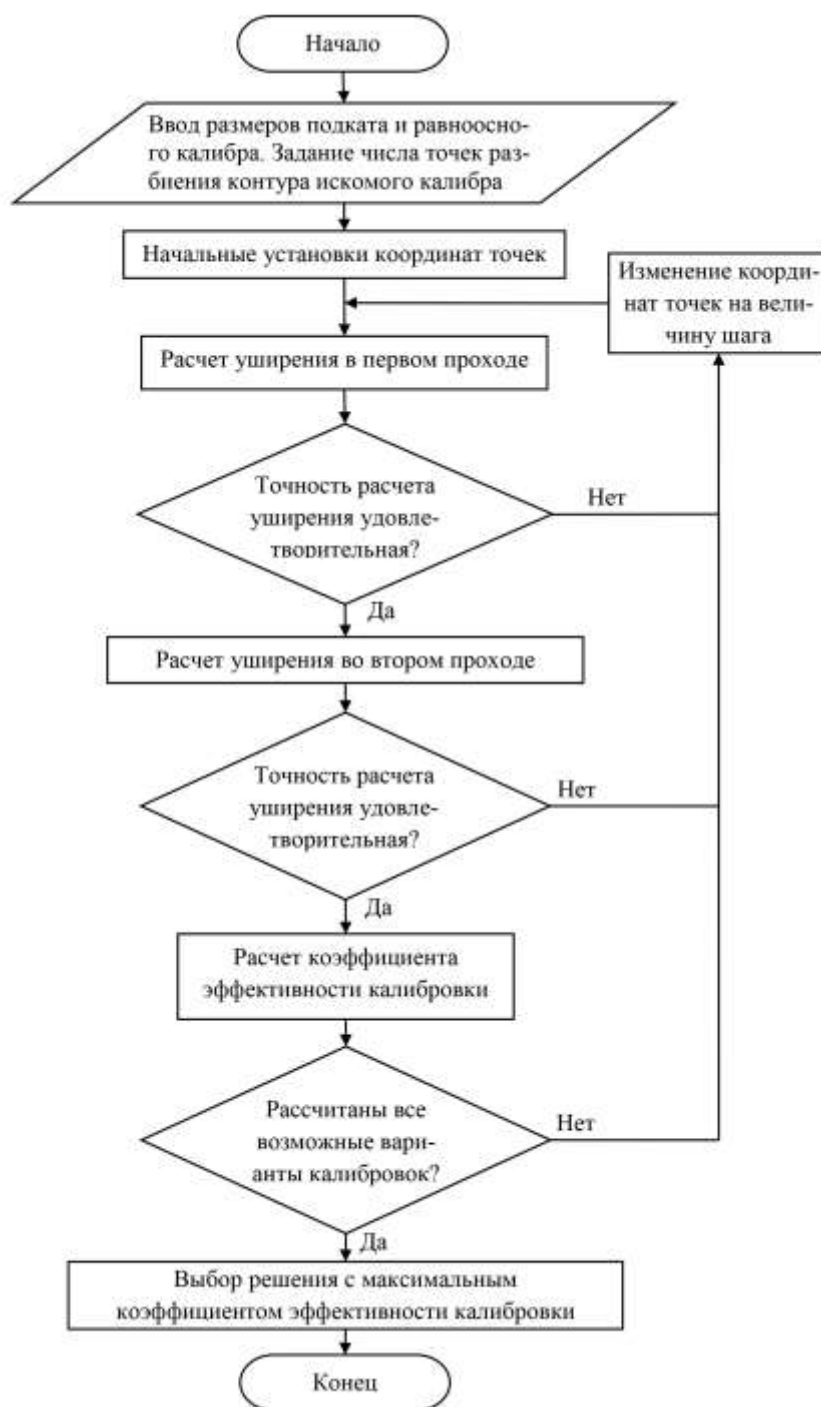


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы «OptimPass»

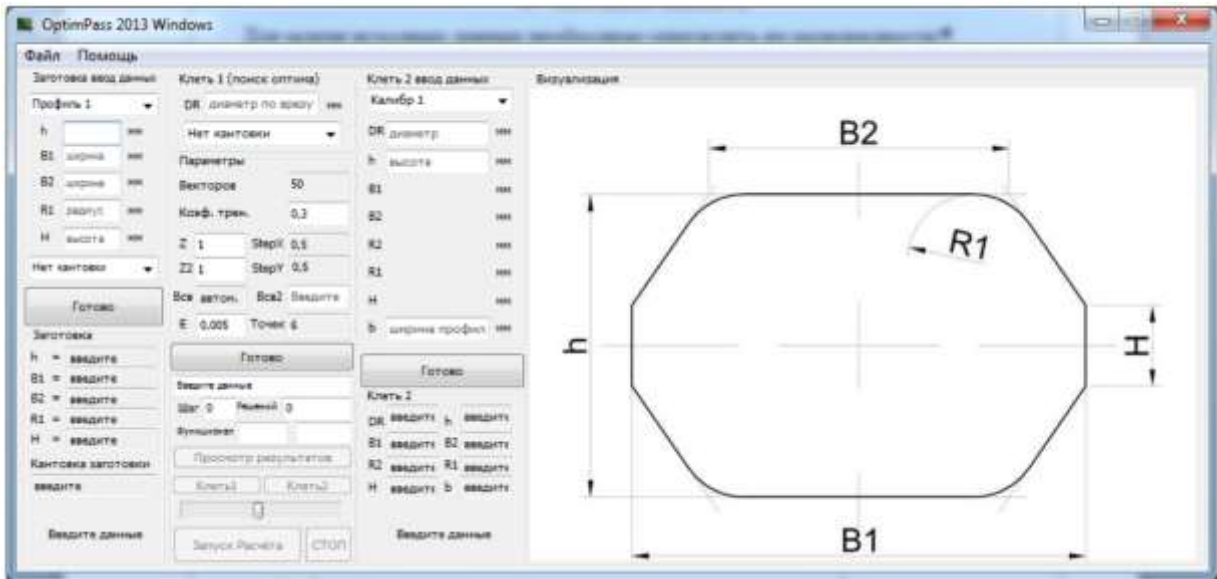


Рис. 2. Интерфейс программы «OptimPass»

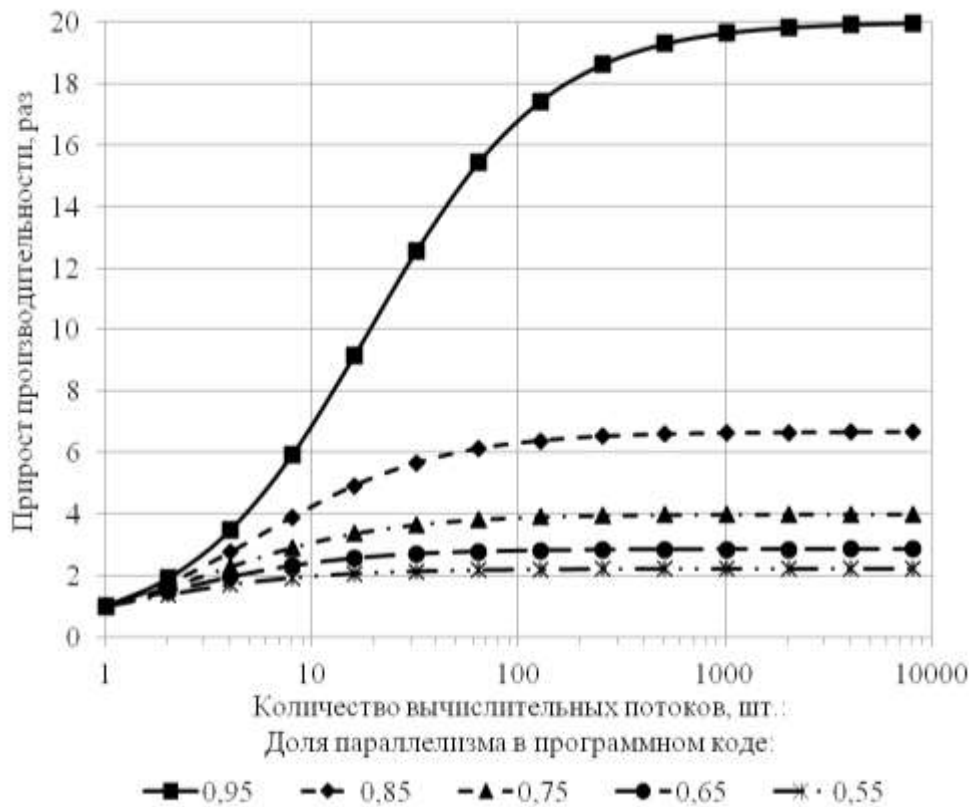


Рис. 3. Закон Амдала

На сегодняшний день в усовершенствованной версии ПО «OptimPass» задействовано до 64 вычислительных потоков (рис. 4), что значительно сокращает время расчета – поиск оптимальной калибровки на 32-поточном сервере происходит в 30 раз быстрее, чем в однопоточном исполнении алгоритма.

Помимо скорости получения результатов оптимизированная программа позволила проводить

и теоретические исследования – поиск всех возможных вариантов калибровки валков для заданных параметров с последующим анализом. Например, в ходе поиска оптимального решения для одного из частных случаев было получено 2 233 014 решений (рис. 5), что позволяет проводить сравнение различных параметров множества вариантов калибровки валков.

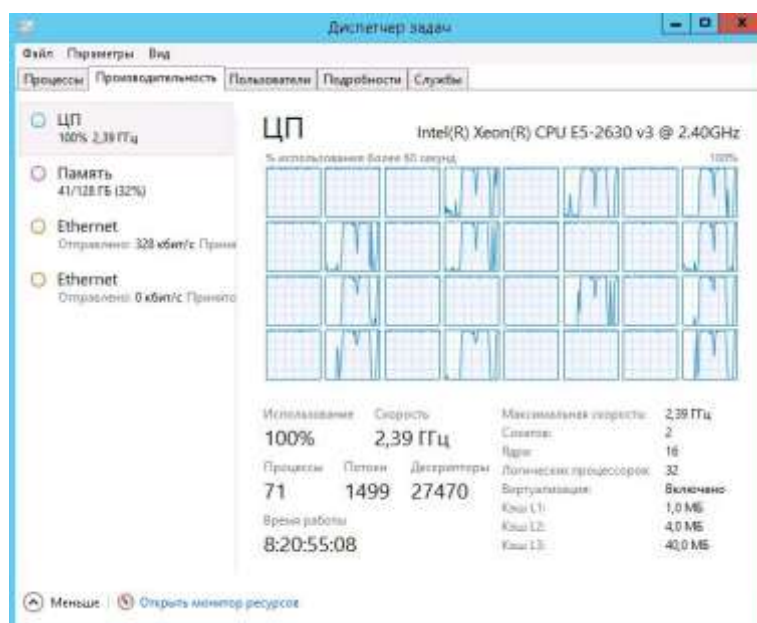


Рис. 4. Утилизация ресурсов центральных процессоров сервера

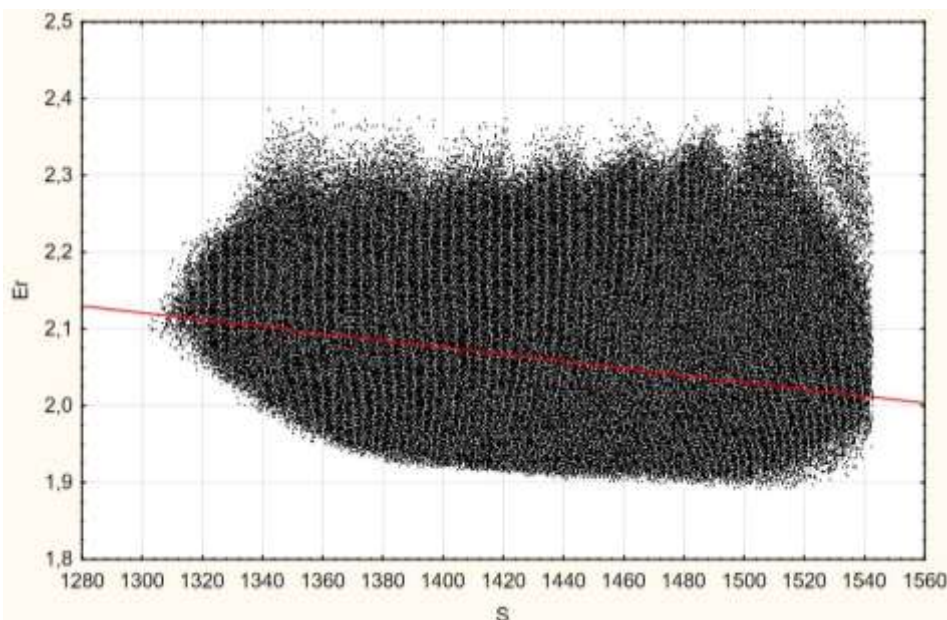


Рис. 5. Зависимость смещенного объема металла в паре калибров от площади неравноосного сечения

В ходе моделирования был получен большой массив данных – свыше 57 Гигабайт, который нуждается в дальнейшем анализе. На данный момент исследователями разрабатывается алгоритм анализа множества решений для формирования «второй волны» решения задачи оптимизации с целью отыскания формы калибра, полностью удовлетворяющего условиям задачи оптимизации и заданной точности.

#### Список литературы

1. Пути оптимизации и перспективы развития программного обеспечения для моделирования техно-
2. логических процессов / С.Ю. Саранча, Д.И. Кинзин, С.А. Левандовский, А.Б. Моллер // Калибровочное бюро. 2014. №4. С. 6-16.
3. Левандовский С.А., Кинзин Д.И., Саранча С.Ю. К вопросу моделирования процессов ОМД: методы оптимизации программного обеспечения // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т.1. С. 76-79.
4. Кинзин Д.И. Постановка и решение задачи оптимизации формы вытяжных калибров // Сталь. 2014. №2. С. 34-38.
5. Кинзин Д.И. Оптимизация формы вытяжных калибров // Электронный научный журнал «Калибровочное бюро». 2013. Выпуск 1. URL: <http://passdesign.ru/numbers> (дата обращения: 10.03.2020).

5. Оценка и повышение эффективности сортопрокатного производства с помощью информационных технологий на примере программного обеспечения «Optimpass» / Д.И. Кинзин, С.А. Левандовский, С.Ю. Саранча, А.Б. Моллер // Калибровочное бюро. 2015. №6. С. 61-65. URL: <http://passdesign.ru/numbers> (дата обращения: 10.03.2020).
6. Саранча С.Ю., Левандовский С.А., Моллер А.Б. Повышение эффективности сортопрокатного производства: вопросы действенности внедряемых информационных технологий // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. Вып. 21. С. 59-65.
7. Саранча С.Ю. К вопросу скорости моделирования процессов ОМД // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2016. Вып. 22. С. 97-106.

#### Сведения об авторе

**Рожков Григорий Константинович** – студент ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: joyloony@gmail.com.

---

УДК 622.7:622.794.42:622.742

## ВЛИЯНИЕ МАРОЧНОЙ СТРУКТУРЫ УГЛЯ НА ВЫХОД И ХАРАКТЕРИСТИКУ ПРОДУКТОВ ПОЛУКОКСОВАНИЯ

Смирнов А.Н., Крылова С.А., Сысоев В.И., Жусупова Ж.С., Никифорова В.М.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В статье представлены результаты лабораторных исследований процесса полукоксования каменных углей Кузнецкого бассейна, данные хроматографического анализа газообразных и жидких продуктов полукоксования. В зависимости от марочной структуры угля с возрастанием степени карбонизации угольной массы увеличивается количество полукокса при уменьшении смоляных и парогазовых продуктов. Данные хроматографического анализа указывают на то, что с ростом генетической зрелости углей в составе их смол полукоксования происходит увеличение доли биароматических углеводородов в виде нафталинов с различными алкильными заместителями и доли конденсированных органических соединений.

**Ключевые слова:** угли Кузнецкого бассейна, марка угля, полукоксование, хроматография, ароматические углеводороды.

### Введение

Определяющим условием для получения качественного доменного кокса является подбор компонентов и их соотношений в угольной шихте для коксования. Марочный состав шихты включает спекающие (ГЖ, Ж), коксующие (КЖ, К, ОС, КО) и отошающие (КС, КСН) компоненты [1]. При составлении угольных шихт необходимо рационально использовать имеющиеся в наличии угольные ресурсы, их спекающий, коксующий, а также химический потенциал. Базовыми компонентами коксовой шихты являются угли марок Ж и К, поскольку именно эти угли являются источником жидких нелетучих продуктов, необходимых для образования пластической массы, влияющей на формирование структуры полукокса и далее – качества кокса.

Полукоксование угля – это способ физико-химического изменения угля нагреванием до 500-550°C без доступа воздуха. Результатом этого процесса являются: полукокс с выходом 50-70% от массы исходного топлива, первичная смола – 5-25%, горючий газ и подсмольная вода. Поскольку в последнее десятилетие на угольном рынке России нарастает дефицит коксующихся марок углей, то возможна ситуация нехватки технологически ценных коксующихся марок углей для производства кокса, что может привести к снижению его качества.

Мы полагаем, что более детальные исследования спекающей способности недефицитных ма-

рок углей (в частности, отошенно-спекающихся – ОС), анализ результатов их изучения позволит рассмотреть возможные пути компенсации негативных последствий ухудшающейся сырьевой базы коксования.

### Материалы и методы

В качестве объектов исследования были использованы марки углей Кузнецкого бассейна различной степени метаморфизма: ОС, КС, К, Ж, а также смеси компонентов КС+КО+КОС и Ж+ГЖ. Известно, что технологическая ценность углей определяется отклонениями их характеристик от значения показателя эталонной шихты [2]. Например, эталонная шихта из углей Кузнецкого бассейна соответствует следующему составу по маркам: Ж – 30%, ГЖ – 9%, К – 18%, КО – 17% и КС – 26%. Эта шихта имеет значения:  $R_0 = 1,158$ ;  $S_R = 0,192\%$ ;  $V_t = 66\%$ ;  $V^{daf} = 26,5\%$ ;  $y = 18$  мм и др. Из базовой эталонной шихты получают в узкокамерных печах при периоде коксования 17 ч кокс с показателями  $M_{25} > 89$ ;  $M_{10} < 7,5$ ;  $CSR > 60$  и  $CRI < 30$  (при мокром тушении кокса). При этом итоговые значения показателей CSR и CRI кокса имеют большое влияние на уровень закупочной цены угольных концентратов, являющихся компонентами этой шихты.

Технический анализ углей проводился стандартными методами (ГОСТ 11022-95, ГОСТ Р 52917-2008, ГОСТ 6382-2001, ГОСТ 1186-87), а определение петрографических параметров проб угля по ГОСТ Р 55662-2013.

Выход продуктов полукоксования определяли весовым методом согласно ГОСТ 3168-93 (ИСО 647:1974). Для этого пробу угля (100 г, фракция



0,25–1 мм) помещали в муфельную печь, где в течение 10–15 мин проводили ее первоначальный нагрев до 250°C. Затем со скоростью 5°C/мин нагревали до 520°C, и выдерживали при этой температуре в течение 10 мин.

Анализ газообразных продуктов проводили методом газодсорбционной хроматографии на газохроматографическом комплексе «Хроматэк Кристалл 5000» с использованием насадочной колонки HayeSepQ длиной 3 × 2 мм для определения CO<sub>2</sub> и насадочной колонки NaX длиной 3 × 2 мм с предколонкой Carboxen длиной 0,5 × 2 мм для определения монооксида углерода. В качестве газаносителя для колонки HayeSepQ использовали гелий (15 мл/мин), для колонок NaX и Carboxen – аргон (20 мл/мин). Объем вводимой газовой пробы составлял 1 мл. Для регистрации выхода компонентов анализируемой газовой смеси использовали детекторы по теплопроводности. Обработку результатов производили при помощи программного обеспечения «ХроматэкАналитик» [3, 4]. Для количественного анализа использовали поверочные градуировочные смеси. Каждое хроматографическое определение выполнялось трижды, а результаты подвергались статистической обработке для устранения промахов и усреднялись.

Анализ жидких продуктов пиролиза каменного угля также проводили на газохроматографическом комплексе «Хроматэк Кристалл 5000», оснащенном капиллярной колонкой ZB5-ms (5% фениларилена / 95% диметилполисилоксана), в режиме линейного нагрева со скоростью 6 °C/мин от 40 до 320°C. В качестве газа-носителя применяли азот ( $P = 100$  кПа). Продолжительность анализа составляла 60 мин.

Количественное определение веществ проводили с использованием метода абсолютной калибровки по стандартной смеси полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Вещества, не входящие в состав стандартной смеси, идентифицировались качественно при помощи систем индексов удерживания. Количественная оценка их содержания выполнялась методом нормализации площадей.

### Результаты и обсуждение

Как было отмечено выше, в последние годы в коксохимической отрасли наблюдается дефицит углей спекающихся марок ГЖ, Ж, КЖ, поэтому актуальны исследования по их замене в шихте, например на нефтяные спекающие добавки типа гудрона [2]. На сохранение стабильного качества кокса негативно влияет не только дефицит жирных и коксовых углей. Коксохимические предприятия получают угольные концентраты, где под

одной маркой проходит широкий спектр углей, зачастую совместно не коксуемых [5]. При этом концентрат может быть составлен так, что его пластометрические показатели и технический анализ будут соответствовать обозначенной марке. В связи с этим также актуальны исследования по оптимизации состава шихты для достижения качества кокса на максимально возможном уровне для заданного компонентного состава шихты [1, 2, 5]. Ранее нами были установлены универсальные химико-петрографические параметры шихты для коксования (показатель отражения витринита  $R_o$ , выход летучих веществ  $V^{daf}$ , сумма отошающих компонент  $\Sigma OK$ , толщина пластического слоя  $Y$ ), значения которых находятся в окрестности оптимума, соответствующего критерию оптимальности по показателю качества кокса M10 (минимизация показателя качества M10, ограничение на стоимость шихты и колебание M10) [6-8].

Получение полукокса является первым шагом к технологиям глубокой термической переработки углей в химические продукты высокой стоимости. Термическое разделение угля на твердый полукоксый остаток и горючие летучие газы для сжигания или дальнейшей комплексной переработки должно быть экономически обосновано [2]. Для оценки возможных рациональных направлений использования продуктов полукоксования нами были выполнены предварительные экспериментальные исследования углей Кузнецкого бассейна. Перечень исследованных марок углей (компонентов) и результаты технического анализа, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты технического анализа

Марка угля, компонент	Технический анализ			X, мм	Y, мм	$R_o$ , %	$\Sigma OK$ , %
	$A^d$ , %	$V^d$ , %	S, %				
OC	8,75	19,71	0,32	24,5	12,0	1,26	42,25
КС+КО+КОС	9,80	19,70	0,40	34,0	11,0	1,16	40,00
КС	9,70	19,73	0,40	32,0	11,0	1,21	41,00
К	9,80	22,10	0,40	0,0	23,0	1,27	16,00
Ж	9,00	34,71	0,50	18,5	30,0	0,90	11,00
Ж+ГЖ	8,50	35,32	0,44	31,0	9,0	0,84	11,00

Как следует из анализа литературных данных, показатель отражения витринита  $R_o$  является наиболее объективным параметром метаморфизма углей, изменения которого в ряду метаморфизма углей связаны, главным образом, с увеличением степени ароматизации органической массы и ростом конденсированности ядер структурных единиц макромолекул угля. Кроме того, из основных классификационных параметров углей

наиболее тесная связь существует между показателями  $R_0$  и  $V^d$  [9, 10]. Показатель отражения витринита, характеризующий степень карбонизации угольной массы, увеличивается в ряду исследованных углей от 0,84 (Ж+ГЖ) до 1,27 (ОС) при соответствующем уменьшении значений выхода летучих веществ ( $V^d$ ) от 35,3 (Ж+ГЖ) до 19,73 (для ОС) (рис.1).

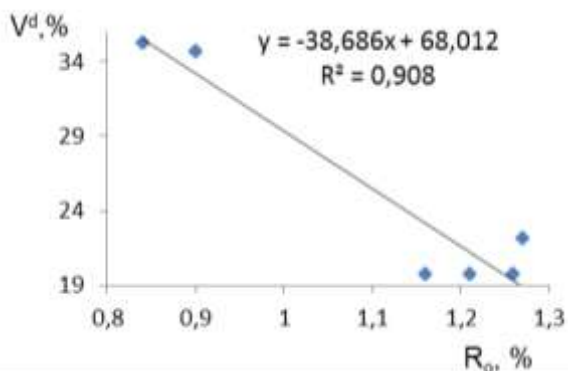


Рис. 1. Зависимость выхода летучих веществ  $V^d$  от показателя отражения витринита  $R_0$

Содержание отощающих (фюзенизированных) компонентов угля ( $\Sigma OK$ ) согласно ГОСТ 25543 - 88 также входит в перечень показателей, определяющих марку каменного угля. С увеличением степени метаморфизма исследуемых углей  $\Sigma OK$  возрастает от 11 (для Ж и Ж+ГЖ) до 42,25 % для марки ОС) (рис. 2).

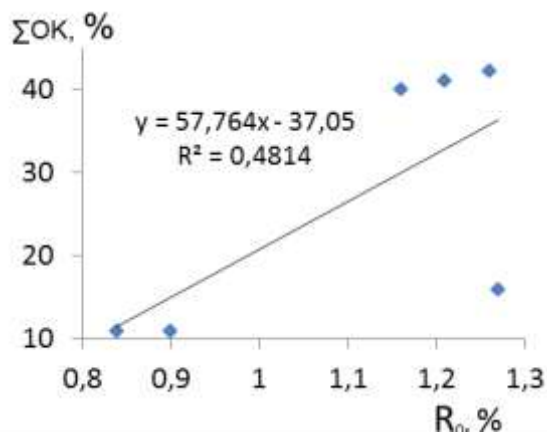


Рис. 2. Зависимость содержания отощающих компонентов  $\Sigma OK$  от степени карбонизации (метаморфизма) угольной массы  $R_0$

Данные о выходе продуктов полукоксования представлены в табл. 2.

Установлено, что с ростом стадии метаморфизма углей увеличивается количество полукоккса (рис. 3) при уменьшении смоляных (рис. 4) и парогазовых продуктов. Наибольшее количество полукоккса соответствует марке угля ОС, а смолы и парогазовых для марки угля Ж+ГЖ. Состав газо-

вой фазы в ряду исследуемых углей меняется незначительно. Для всех марок углей и смесей в составе газообразных продуктов полукоксования преобладает метан (52,56–56,90 об.%). Из остальных газов наибольшее количество характерно для водорода (13,90–20,15 об.%) и этана (9,90–15,02 об.%).

Таблица 2

Выход продуктов полукоксования

Марка угля	$V^d$ , %	$R_0$ , %	Выход продуктов полукоксования, %			
			sK	T <sub>sK</sub>	W <sub>sK</sub>	G <sub>sK</sub>
ОС	19,7	1,26	93,089	0,63	0,625	5,660
КС+КО+КОС	19,7	1,16	91,420	2,33	1,100	5,150
КС	19,7	1,21	92,681	1,09	0,700	5,529
К	22,1	1,27	90,413	3,44	0,900	5,247
Ж+ГЖ	35,3	0,84	86,803	4,08	3,400	6,640

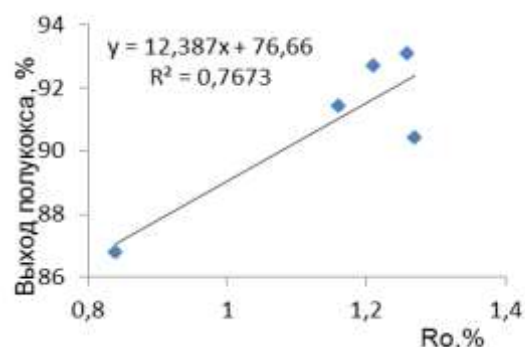


Рис.3. Зависимость выхода полукоккса от показателя отражения витринита  $R_0$

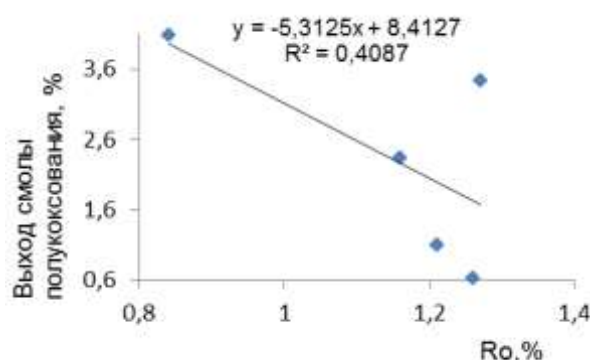


Рис.4. Зависимость выхода смолы полукоксования от показателя отражения витринита  $R_0$

Смола полукоксования представляет собой сложную смесь, в которую входят как индивидуальные углеводороды, так и продукты их взаимодействия. Групповой состав\* смол полукоксования

\* Деление ароматических углеводородов на группы осуществлялось в соответствии с общим количеством ароматических ядер в молекуле.

определяли методом нормировки. Результаты представлены в табл. 3

Таблица 3

## Групповой состав смолы полукоксования

Группа углеводородов	Относительное содержание компонентов в смолах полукоксования, полученных из углей исследованных марок, % к сумме идентифицированных соединений				
	Ж+ГЖ	К	КС	КС+КО+КОС	ОС
Алифатические углеводороды (в том числе циклические)	19,69	16,87	17,33	15,73	18,57
Моноароматические углеводороды	20,08	7,52	4,08	11,38	3,47
Биароматические углеводороды (нафталин и его гомологи)	18,59	31,27	32,69	27,39	32,53
Полиарены, содержащие 3-5 бензольных колец	3,87	8,24	9,26	9,32	7,06
Гетероциклические соединения (фенолы и др.)	37,77	36,09	36,65	36,18	38,36

В состав смол полукоксования входят алифатические углеводороды, среди которых обнаружены *n*-алканы (декан, додекан, ундекан, тридекан и др.), *n*-алкены (нонен и др.) и циклоалканы (этилциклогексан, трет-бутилциклогексан и др.), а также алифатические углеводороды (цис-декалин).

В ряду исследуемых марок углей и их смесей с увеличением  $R_0$  количество алифатических углеводородов снижается.

В составе ароматических углеводородов всех исследованных смол присутствуют моно-, би- и полициклические соединения.

Суммарное содержание моноаренов имеет тенденцию к снижению и изменяется от 20,08 (Ж+ГЖ) до 3,47 (ОС) от суммы всех идентифицированных компонентов. Среди моноаренов обнаружены инданы и их производные, а также тетралин. Биарены представлены нафталином, в том числе с метильными заместителями, бифенилом и

его алкилзамещенными гомологами. Их содержание увеличивается от 18,59 (Ж+ГЖ) до 35,53 (ОС).

Содержание полиаренов, содержащих 3-5 бензольных колец, увеличивается от 3,87 (Ж+ГЖ) до 9,32 (КС+КО+КОС).

**Выводы**

Проведены предварительные экспериментальные исследования процесса полукоксования каменных углей Кузнецкого бассейна. Определены качественные характеристики марок (компонентов) углей и выходы из них продуктов полукоксования. В зависимости от марочной структуры угля увеличивается количество полукокса при уменьшении смоляных и парогазовых продуктов. Наибольшее количество полукокса соответствует марке угля ОС, а смолы и парогазовые для марки угля Ж+ГЖ. Для всех марок углей и смесей в составе газообразных продуктов полукоксования преобладает метан, водород и этан. Данные хроматографического анализа указывают на то, что с ростом генетической зрелости углей в составе их смол происходит увеличение доли биароматических углеводородов в виде нафталинов с различными алкильными заместителями и доли конденсированных органических соединений.

**Список литературы**

1. Филоненко Ю.Я., Кауфман А.А., Филоненко В.Ю. Теоретические основы технологии коксования каменных углей [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2015. 190 с.
2. Козлов В. А., Гарбер В. Полукоксование низкотемпературного коксующегося угля и специальные минеральные добавки, применяемые непосредственно на углеобогащательной фабрике для повышения качества кокса // Уголь. 2018. № 12 (1113).
3. Исследование процесса конверсии каменноугольной смолы в присутствии оксидного железомagneзиального катализатора / Смирнов А.Н., Крылова С.А., Сысоев В.И., Никифорова В.М., Жусупова Ж.С., Емельянов М.Д. // Качество в обработке материалов. 2018. № 1 (9). С. 44-47.
4. Калибровка газохроматографического метода анализа для определения продуктов переработки углеродсодержащих материалов, полученных с использованием железомagneзиального оксидного катализатора / Смирнов А.Н., Сысоев В.И., Крылова С.А., Никифорова В.М., Жусупова Ж.С. // Качество в обработке материалов. 2018. № 2 (10). С. 34-40.
5. Опыт ОАО «Москокс» по оптимизации состава угольных шихт / Чеглакова Н. С. и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. № 9.
6. Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. Исследование влияния независимых параметров на показатели качества кокса  $M_{25}$  и  $M_{10}$  с помощью анализа суще-

- ствующих математических моделей, построенных в ходе активного эксперимента // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 74-й межрегион. науч.-техн. конф. / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. Т. 1. С. 255-258.
7. Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. Сопоставление и анализ адекватности математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса М25 и М10 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. №3 (15). С. 62-67.
8. Алексеев Д.И. Оценка и контроль формирования качества доменного кокса на основе параметра истираемости: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2019. 155 с.
9. Коссинский В.А., Панина Н.Н., Фоменко В.А. Модель зависимости между показателями отражения витринита и углехимическими параметрами // Кокс и химия. 2002. № 1. С. 10–13.
10. Данилов О.С., Михеев В.А., Москаленко Т.В. Взаимосвязь генетических и технологических параметров углей, принятых в классификации, со структурными параметрами их органической массы // ГИАБ. 2011. №8.

#### Сведения об авторах

**Смирнов Андрей Николаевич** – д-р физ.-мат. наук, доц., проф., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. ORCID 0000-0002-7399-9586. E-mail: sman@magtu.ru.

**Крылова Светлана Александровна** – канд. хим. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. ORCID 0000-0002-4323-5454. E-mail: svkryl@mail.ru.

**Сысоев Виктор Иванович** – зав. лабораторией, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. ORCID 0000-0003-3537-7695. E-mail: viktor.sysoev.86@yandex.ru.

**Никифорова Валерия Максимовна** – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: blasphemera@mail.ru.

**Жусупова Жанар Серекпаевна** – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: 79512445186@ya.ru.



УДК 669:621-971

**УПРОЧНЕНИЕ ФАСОННОГО ПРОКАТА НА КЛАСС ПРОЧНОСТИ 600 МПа**Сычков А.Б.<sup>1</sup>, Атангулова Г.Я.<sup>2</sup>, Агутин Г.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск<sup>2</sup>ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования и разработки технологии термического упрочнения фасонного проката с обеспечением класса прочности 600 МПа (по пределу текучести). При этом получена высокоточная адекватная регрессионная зависимость температуры самоотпуска (значения которой и определяют класс прочности металла) от толщины, температуры поверхности проката и времени охлаждения.

Для различных классов прочности получен соответствующий комплекс механических свойств фасонного проката широкого марочного состава, размерного сортамента и назначения. Показано, что обеспечивается класс прочности фасонного проката на уровне 350-590 (600) МПа.

Процесс прерванной закалки при термической обработке обеспечивает эффективную микроструктуру проката (от игольчатого феррита и бейнита, микротвердости HV = 1767-2600, при малых скоростях охлаждения и, соответственно, низком классе прочности до структур отпущенного мартенсита, HV = 2937-3500, при высоких скоростях охлаждения и классе прочности 600 МПа).

**Ключевые слова:** фасонный прокат, термическое упрочнение, прерванная и прерывистая закалка с самоотпуском, класс прочности, уравнение регрессии.

В современных условиях металлургического производства весьма актуально развитие технологии термического упрочнения – термической правки (ТУ-ТП) фасонных профилей, разработка которой была начата еще в 70-е годы двадцатого века [1, 2].

Сейчас эта технология должна быть распространена на новые виды металлопродукции, такие как судовые, трубные профили, профили для вагоностроения и т.п. с обеспечением в прокате повышенных прочностных характеристик за счет формирования соответствующей микроструктуры. Рынок требует поставок эффективного фасонного проката класса прочности до 600 (590) МПа без микролегирования стали дорогостоящими ванадием и/или ниобием. Основные результаты исследований, направленных на решение вышеуказанной задачи, представлены в работах [3-16].

В этих работах проведены математическое и физическое моделирование ускоренного охлаждения на основном сортаменте фасонных профилей, разработан алгоритм расчета параметров (скорости охлаждения, расхода и давления охладителя воды, количества секций охлаждения, порядка их включения и т.п.) термического упрочнения проката.

В настоящей статье разработаны эффективные технологические режимы ускоренного водяного

охлаждения (УВО) фасонного проката (на примере равнополочного уголка 90×90×7 мм) из низколегированной стали 09Г2С. Новые технологические режимы УВО адекватны реальному процессу упрочнения фасонного проката и соответствуют математической модели процесса (рис. 1).

Для обеспечения в фасонном прокате заданного класса прочности необходимо обеспечить требуемую температуру самоотпуска ( $t_{\text{cot}}$ ), которая определяется режимами УВО и зависит от температуры поверхности  $t_{\text{пов}}$  элементов профиля, его толщины  $h$  и времени  $\tau$  интенсивного охлаждения.

Расчетная регрессионная зависимость приведена ниже:

$$t_{\text{cot}} = 176 + 7,8h + 1,01t_{\text{пов}} - 0,75\tau_{\text{охл}}, R^2 = 0,508;$$

$$R = 0,71; F = 67477, n = 61,$$

где  $R^2$  – коэффициент детерминации;  $R$  – коэффициент множественной корреляции;  $F$  – критерий Фишера;  $n$  – объем выборки.

Уравнение адекватно реальному процессу, существенно линейно, коэффициенты при факторах статистически значимы по критерию Стьюдента, вклад факторов в функцию отклика составил: температура поверхности металла после охлаждения  $t_{\text{пов}}$  – 67%, толщина характерного участка профиля  $h$  – 32,6%, время охлаждения  $\tau_{\text{охл}}$  – 0,4%. На основании указанного полученное уравнение регрессии можно использовать в качестве прогно-



зирующего и управляющего ресурса при УВО по технологии закалки с самоотпуском с предпрокатного нагрева (прерванное или прерывистое охлаждение).

На рис. 1 представлена диаграмма, показывающая фактические значения предела текучести фасонного проката (на примере равнополочного уголка 90×90×7 мм из стали 09Г2С) в сравнении с расчетными, а также реальное отклонение факта от расчета.

По пределу текучести металл соответствует классам прочности 350–400 МПа после упрочнения, в горячекатаном состоянии металл отвечает классу прочности 290 МПа. Коэффициент упрочнения равен 1,21–1,38, а отношение  $\sigma_T/\sigma_B = 0,70-0,76$  выше обычного отношения при горячей прокатке – 0,66.

В таблице представлены режимы УВО, механические свойства опытного фасонного проката, отклонение фактических результатов испытаний от расчетных, структура металла.

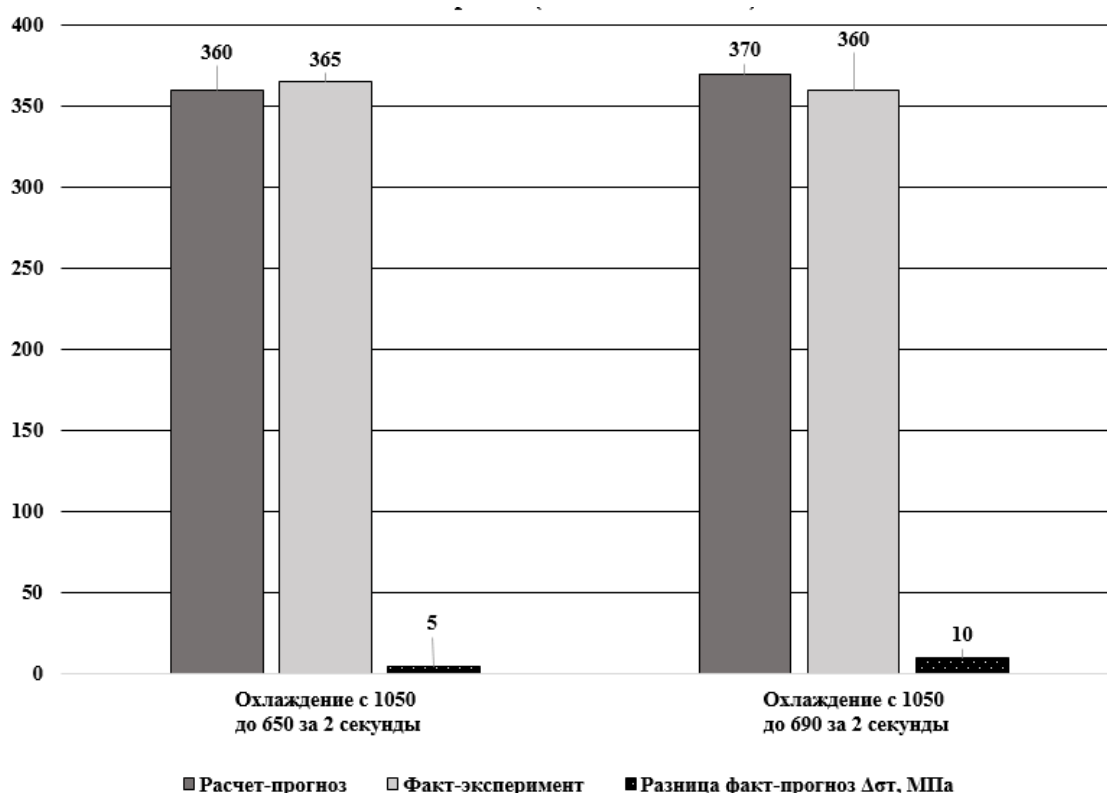


Рис. 1. Сравнительная диаграмма значений предела текучести (МПа) для эксперимента с уголком 90×90×7

Режимы термической обработки, механические свойства фасонного проката

Профилеразмер	Температура, °С			Время охлаждения τ, с	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Разница факт-прогноз $\Delta\sigma_B$ , МПа	Микротвердость, НВ, МПа/структура
	нагрева	≈ поверхности	≈ самоотпуска				
90×90×7	1050	550	700	2	370	-30	2100-Б верх. + Ф игольч
90×90×7	1050	700	750	1,5	350	-20	1837-Б верх. + Ф игольч.
90×90×7	1050	650	650	4	415	+5	2590- Б нижн.(реечн.) +Ф игольч
90×90×7	1050	650	700	2	365	-5	1847-Б верх. + Ф игольч
90×90×7	1050	695	740	2	360	-10	1767-Б верх. + Ф игольч

Примечание. Ф – феррит, Б<sub>нижн.</sub> – нижний бейнит, Б<sub>верх.</sub> – верхний бейнит, Ф<sub>игольч.</sub> – игольчатый феррит.

Для класса прочности 600 МПа (по пределу текучести) температура самоотпуска должна быть на уровне 600-650°C. Тогда можно определить значения температуры поверхности и время охлаждения металла для определенной толщины участка профиля.

Так, для уголка 125×125×16 мм (16 и 28 мм – соответственно толщина полки и примерная толщина вершины уголка) расчетная температура поверхности металла  $t_{\text{пов.ср.}} = 300^\circ\text{C}$  при времени охлаждения  $\tau_{\text{охл.}} = 3-5$  с; а для уголка 40×40×4 мм (4 и 7 мм – соответственно толщины полки и вершины уголка):  $t_{\text{пов.ср.}} = 430^\circ\text{C}$  при том же времени охлаждения металла. На базе расчетов, пример которых представлен выше, составляется режимная карта управления технологическим процессом УВО-упрочнения фасонного проката конкретного размера на заданный класс прочности. При необходимости при наборе определенного количества фактических данных возможно проведение корректировки расчетной регрессионной зависимости по методике, изложенной в работе [17].

На рис. 1 и в таблице представлены технологические режимы упрочнения фасонного проката, механические свойства и микроструктура металла. Разница между фактическими и расчетными значениями механических свойств на примере предела текучести в среднем составила минус 16 МПа (от минус 30 до плюс 5 МПа) или погрешность прогноза составила минус 4,3%. Микротвердость и микроструктура опытного проката соответствуют друг другу и термически упрочненного металла в потоке сортовых станов. В зависимости от класса прочности микротвердость составляет 1767-2590 МПа (с ростом предела текучести увеличиваются значения микротвердости), в микроструктуре наблюдаются следующие составляющие – игольчатый феррит, верхний и нижний бейнит (для более прочного металла соответствует и более напряженная структура – нижний бейнит).

На рис. 1 и в таблице представлены режимы термического упрочнения проката (температура начала водяного охлаждения 1050°C, температура самоотпуска соответствовала 650-750 °C, а температура поверхности 550-700°C, время охлаждения составила 1,5-4 с). Указанные режимы обусловили получение проката класса прочности 350-400 МПа. При этом чем «жестче» режимы упрочнения, тем больше прочность металла.

Для обеспечения свойств фасонного проката класса прочности 600 МПа, как уже здесь отмечалось, температура самоотпуска должна быть, равной примерно 650°C, температура поверхности по расчету 300-430°C в зависимости от геометриче-

ских размеров профиля, время охлаждения должно увеличиться до 3-5 с. В структуре проката (рис. 2) такой прочности начинают преобладать более напряженные составляющие – бейнит нижний и даже отпущенный мартенсит (микротвердость HV 2937-3500) с формированием квазикомпозитной, послойной структуры, соответствующей металлопрокату, упрочненному по схеме прерванной и/или прерывистой закалки с самоотпуском.



Рис. 2. Микроструктура фасонного проката класса прочности 600 МПа

### Выводы

1. В результате физического моделирования разработана технология УВО-фасонного проката для формирования структуры и механических свойств на металле из стали марки 09Г2С, легированной ванадием.

2. Постепенное приближение точности прогноза механических свойств фасонного проката после УВО позволило обеспечить незначительное отклонение прогнозируемых от фактических значений предела текучести (со средним отклонением предела текучести по профилям размерам на уровне - минус 16 МПа или 4 %).

3. Статистической обработкой массива опытной выборки рассчитано адекватное реальному технологическому процессу регрессионное уравнение зависимости температуры самоотпуска от температуры поверхности металлопроката, толщины охлаждаемого участка профиля, времени охлаждения металла в процессе УВО:

$$t_{\text{сот}} = 176 + 7,8h + 1,01t_{\text{пов}} - 0,75\tau_{\text{охл.}}, \\ R^2 = 0,508; R = 0,71; F = 67477, n = 61.$$

### Список литературы

1. Вакула Л.А., Верчиков С.В., Чабаненко В.А. Принцип оптимального проектирования технологии термической правки угловых профилей // Сортопрокатное производство: отраслевой сборник научных трудов. Харьков: УкрНИИМет, 1990. 3 п.л.

2. Термическая обработка мелкосортного углового проката в потоке непрерывного стана 250-2 завода «Криворожсталь» / В.Я. Савенков, Ю.Т. Худик, В.А. Сацкий, В.Т. Худик, М.И. Костюченко, О.В. Филонов, В.Т. Черненко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1977. № 1. С. 36-37.
3. Сычков А.Б., Малашкин С.О. Оборудование и технология для термоправки - термомеханического упрочнения фасонного профиля // *Теория и технология металлургического производства*. 2014. № 2 (15). С. 96-101.
4. Влияние термомеханической обработки на структуру и механические свойства стали типа 10ХН2М / В.Н. Счастливец, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, Л.Ю. Егорова, А.А. Круглова // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2006. № 4. С. 78-82.
5. Концепция построения современных моделей прокатки на сортовых станах / А.Б. Моллер, О.Н. Тулупов, А.С. Лимарев, Д.В. Назаров // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2007. № 1. С. 64-67.
6. Поточная термическая обработка сортового и фасонного проката / А.Б. Сычков, М.А. Шекшеев, С.О. Малашкин, Г.Я. Камалова // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2016. № 2. С. 5-24.
7. Технология термического упрочнения – термической правки фасонных профилей проката / А.Б. Сычков, М.А. Шекшеев, С.О. Малашкин, Г.Я. Камалова // *Литейные процессы*. 2016. № 15. С. 73-88.
8. Завалищин А.Н., Румянцев М.И., Сычков А.Б. Технология термической обработки листового и сортового проката: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2017. 230 с.
9. Технология термической обработки арматурного и фасонного проката (Теория и металлургическая практика): монография / А.Б. Сычков, Э.В. Парусов, А.Б. Моллер, О.Н. Тулупов, М.А. Шекшеев, А.Ю. Столяров, Г.Я. Камалова, Д.В. Назаров, С.О. Малашкин, М.В. Блохин. Palmariumacademicpublishing, 2017. 272 с.
10. Разработка технологии производства сортового проката с повышенными прочностными свойствами на стане 450 ПАО «ММК» / А.Б. Моллер, О.Н. Тулупов, А.Б. Сычков, С.А. Левандовский, Д.И. Кинзин, С.Ю. Саранча, С.Ю. Рожков, Н.А. Баранов, А.С. Колос, Е.С. Кобзева // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: к 80-летию образования кафедры ОМД МГМИ им. Г.И. Носова*. 2017. Вып. 23. С. 53-68.
11. Сычков А.Б., Агутин Г.В., Камалова Г.Я. Ускоренное охлаждение фасонного проката в потоке сортовых станов // *Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXIV УШМТ. Магнитогорск*, 2018. С. 175-177.
12. Моделирование структурообразования в фасонном прокате в процессе его термической обработки / А.Б. Сычков, А.Б. Моллер, Д.В. Назаров, Г.Я. Камалова, С.О. Малашкин // *Металлург*. 2018. № 3. С. 10-17.
13. Разработка и внедрение технологии производства термоупрочненного проката на стане 450 сортового цеха ПАО «ММК» / С.А. Левандовский, А.Б. Моллер, О.Н. Тулупов, А.Б. Сычков, Д.И. Кинзин, С.Ю. Саранча, Г.К. Рожков, Н.А. Баранов, А.С. Колос // *Труды XI конгресса прокатчиков*. 2017-2018. Т.2. С. 183-194.
14. Simulation of Structure Formation in Shaped Rolled Steel in the Process of its Heat Treatment / A.B. Sychkov, A.B. Moller, D.V. Nazarov, G.Ya. Kamalova, S.O. Malashkin. *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. № 3-4. P. 193-202.
15. Сычков А.Б., Агутин Г.В., Камалова Г.Я. Технология термической обработки фасонного проката в потоке сортовых станов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*. 2018. Т. 9. № 1. С. 28-32.
16. Отчет о НИР ГР № (ЦИТИС) 316120610057-8. Разработка ускоренного охлаждения проката на стане 450 для получения комплекса механических свойств по ГОСТ 19281-2014 с возможностью исключения микролегирования стали / Рук. А.Б. Моллер. Магнитогорск, 2016. 237 с.
17. ОСТ 14-1-34-90. Статистический приемочный контроль качества металлопродукции по корреляционной связи между параметрами.

#### Сведения об авторах

**Сычков Александр Борисович** – д-р техн. наук, доц., проф. каф. литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. [orcid.org/0000-0002-0886-1601](https://orcid.org/0000-0002-0886-1601). E-mail: [absyckov@mail.ru](mailto:absyckov@mail.ru)

**Атангулова Гюзель Ягафаровна** – инженер ЦЗЛ ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск.

**Агутин Георгий Владимирович** – аспирант каф. литейных процессов и материаловедения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

УДК 62-436.1

**КРИТЕРИИ ОТДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЫЧКИ ПРИ ПРОКАТКЕ ШАРОВ**Рубцов В.Ю.<sup>1</sup>, Курочкин В.В.<sup>1</sup>, Шевченко О.И.<sup>2</sup><sup>1</sup>АО «ЕВРАЗ-НТМК», г. Нижний Тагил<sup>2</sup>НТИ(ф)УрФУ, г. Нижний Тагил

**Аннотация.** В статье представлена модель прокатки шаров с непрерывноизменяющимся шагом и постоянной шириной реборды, произведённая в программе Deform-3D. Основное внимание уделено формированию первой «половинки» и процессу отделения перемычки. В модели рассмотрены деформации, которые возникают в процессе прокатки и их влияние на образование зоны разряжения. В характере отделения перемычки основополагающим является критерий разрушения. Результаты моделирования имеют высокую степень сходимости с реальными процессами прокатки, вплоть до геометрии полученной половинки. Для чистоты эксперимента опытная прокатка производилась на комплекте валков, изготовленных на 5-координатном обрабатывающем центре из тех же 3D-моделей, по которым производилось моделирование процесса в программе Deform-3D.

**Ключевые слова:** шаропрокатный валок, 3D-модель, Deform-3D, деформации, критерий разрушения, половинка, перемычка.

Учитывая весь объем международных исследований, в большинстве представленных ранее работ по моделированию процесса прокатки шаров отсутствует процесс отделения половинок у шаров, а сама модель представлена в виде «гирлянды» [1-3], поэтому получение реалистичной модели прокатки шаров является актуальным направлением.

В качестве программы для проведения симуляции процесса прокатки шаров была использована программа Deform-3D. В качестве модели валков были использованы 3D-модели, разработанные для опыта [4, 5] с непрерывно изменяющимся шагом согласно выведенной функции для валков с постоянной шириной реборды в программе SolidWorks 2018 Professional, по которым на 5-координатном станке изготавливались сами валки и в дальнейшем производилась прокатка. Настройка параметров расположения валков, для чистоты эксперимента, была выбрана из тех, по которым были достигнуты наилучшие показатели, согласно режимам настройки, во время опытной прокатки [5]:

- вертикальный угол наклона валков  $\beta=3^\circ$ ;
- межосевое расстояние между валками на входе 697 мм;
- межосевое расстояние между валками на выходе 698 мм;
- расстояние между проводками 125 мм;
- скорость прокатки 45 об/мин;
- температура заготовки 1040°C.

Кроме этого, с условием возможности выполнения процесса и для оптимальности времени расчета в связи с потребностью программного обеспечения и возможности компьютера были заданы следующие значения:

- длина заготовки 1 м (вместо 6, используемой при опытной прокатке);
- диаметр заготовки 120 мм (среднее значение из поля допуска на заготовку);
- величина сетки 60000 элементов;
- число шагов 300 (с учетом перестроения сетки суммарное число шагов достигло 391).

В процессе моделирования для определения характера обжатий и процесса отделения перемычки были рассмотрены деформации, возникающие при прокатке шаров (рис. 1).

Согласно рис. 1, А максимальные значения деформаций возникают не со стороны воздействия валков в зоне врезки реборды, а со стороны свободного конца заготовки в первой половинке, что приводит к интенсивной деформации металла в осевом направлении, другим словом, образованная половинка утягивается в сторону перемычки. Максимальные значения свободных деформаций, возникающие в данной зоне, достигают 45,3 мм. Значения минимальных деформаций достигают -44,9 и -41,6 мм, согласно рис. 1, В и С соответственно, данный эффект можно объяснить тем, что в краевой зоне половинки происходит разряжение и вместо обжатий металл испытывает растяжение. После отделения половинки отрицательные значения напряжений составляют порядка 0,05 мм, и это практически объясняет дальнейшее отсутствие разряжений и растягивающих деформаций.



В данном исследовании отделение половинки происходит на 247 шаге (рис. 2, В). Основным критерием для отделения половинки или шаров друг от друга является асимметричность диаметров валков [6] и момент скручивания, которые создают такие условия, при которых происходит разрушение межкристаллических связей металла и рост дислокации с дальнейшим отделением металла. Критерий разрушения, как видно на рис. 2, А, интенсивно растет при утоньшении перемычки и достигает значений 6,43, а при достижении зна-

чения 15,1 (рис. 2, В) происходит отделение половинки.

В качестве модели была выбрана сталь из ряда, предложенного прикладной библиотекой программы (аналог стали 60Г). В реальных условиях для прокатки шаров используются стали Ш-2, Ш-2Х, Ш-3, Ш-3Г, Ш-3Р, имеющие более низкий коэффициент разрушения 6...8. При возможности использования этих сталей в модели отделение половинки произошло бы еще на 245 шаге.

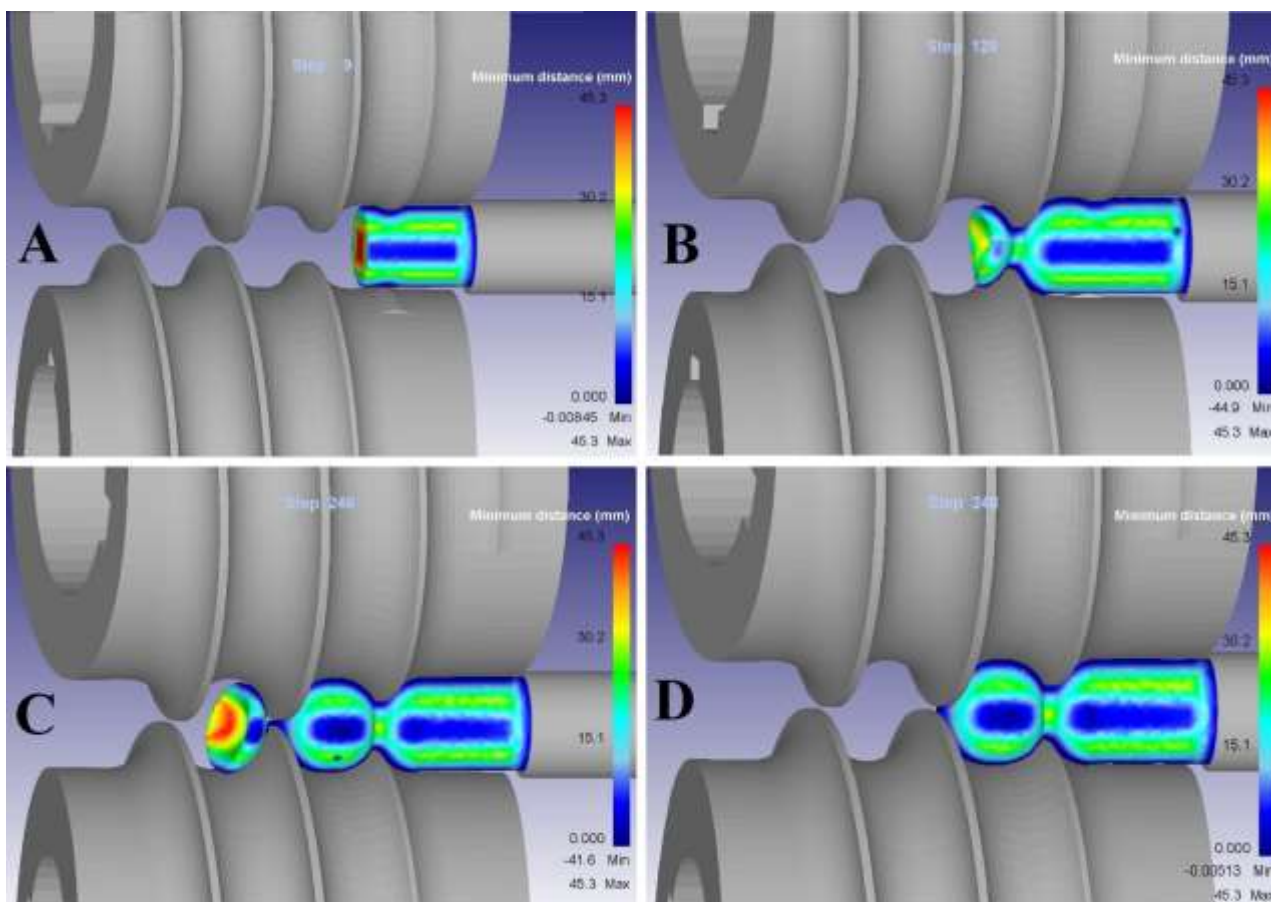


Рис. 1. Деформации, возникающие при прокатке шаров

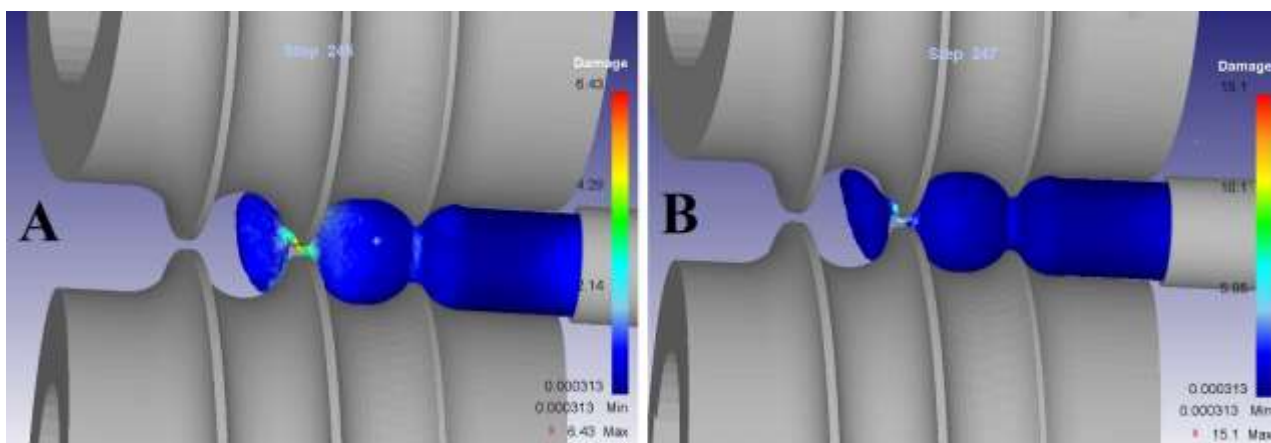


Рис. 2. Критерии разрушения при отделении перемычки



На рис. 3 изображена половинка, полученная опытной прокаткой на валках, изготовленных из тех же 3D-моделей при помощи 5-координатного обрабатывающего центра, по которым производилось моделирование. Как видно, половинка имеет форму вогнутой чаши, что подтверждает сопоставимость с эффектом разряжения осевой полости, при формировании половинки (рис. 1, А, В), а полученная половинка по форме идентична половинке, изображенной на рис. 2, А, полученной на 245 шаге, и доказывает вышеописанный критерий разрушения.

#### Список литературы

1. P. Chyla, Z. Pater, J. Tomczak, P. Chyla Numerical analysis of a rolling process for producing steel balls using helical rolls // Arch. Metall. Mater. Vol. 61. No 2. 2016. P. 485-492.
2. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, Jaroslaw Bartnicki, Tomasz Thermomechanical Analysis of a Helical-Wedge Rolling Process for Producing Balls // Metals, October 2018. P. 1-14.
3. D. Sokhan, V. Makovei, P. Protsenko Modeling ball rolling in spiral rolls // Mechanics and Advanced Technologies. Vol. 83. No 2. 2018. P. 24-30.
4. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И. Калибровка шаропрокатных валков с непрерывно меняющимся шагом // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2018. № 8 (1424). С. 58-63.
5. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И., Загребайлов Н.М. Рабочий диапазон параметров шаропрокатного стана // Молодежь и наука: материалы международной науч.-практ. конф. (25 мая 2018 г.): в 2 т. 2018. Т.1. С. 18-23.
6. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И. Возможность использования асимметричных валков шаропрокатных станов для получения устойчивого режима прокатки // Наука – образование – производство: опыт и перспективы развития: сборник. 2018. С. 106-112.



Рис. 3. Половинка, полученная при опытной прокатке

#### Сведения об авторах

**Рубцов Виталий Юрьевич** – калибровщик рельсобалочного цеха, АО «ЕВРАЗ-Нижнетагильский металлургический комбинат», аспирант Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Нижний Тагил. E-mail: Uriyot@mail.ru, Vitalij.Rubtsov@evraz.com

**Курочкин Вячеслав Валерьевич** – калибровщик крупносортного цеха, АО «ЕВРАЗ-Нижнетагильский металлургический комбинат», г. Нижний Тагил.

**Шевченко Олег Игоревич** – д-р техн. наук, зав. каф. металлургических технологий Нижнетагильского технологического института (филиала) Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Нижний Тагил.

УДК 621.771

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЖАТИЙ В ЧИСТОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ НА СТАНЕ 2000 ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ\*

Платов С.И., Дема Р.Р., Латыпов О.Р.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Проведен статистический анализ изменения деформационных параметров (обжатий) стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК». Определены основные технологические параметры и факторы, влияющие на выбор обжатий в чистой группе стана. На основе цеховой базы учета данных технологических параметров прокатки разработана и обучена искусственная нейронная сеть, позволяющая прогнозировать деформационные параметры горячей прокатки в чистой группе клетей стана.

**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть, горячая прокатка, обжатие, чистовая группа клетей.

### Введение

Широкополосные станы горячей прокатки являются одним из основных средств производства горячекатаного проката. Так, например широкополосный стан горячей прокатки (ШСГП) 2000 ПАО «ММК» за 2019 год произвел 6 млн т горячекатаных полос. На примере данного стана наблюдаются следующие тенденции в производстве: повышение производительности; повышение требований к качеству проката (по геометрии и по механическим свойствам), утонение проката, появление новых высокопрочных марок стали, увеличение разнородности сортамента (по маркам стали и по геометрии полос) в одной прокатной компании (прокатка от завалки и до перевалки рабочих валков в чистой группе клетей стана). Данные тенденции приводят к необходимости нововведений в производстве. Так, в последнее время (с 2000 годов) развивается направление по созданию цифровых двойников производственных процессов [1]. Так, применительно к ШСГП 2000 данная технология позволяет смоделировать в виртуальной среде производственную линию стана, а также запустить предварительную оптимизацию производства. Благодаря этому источники ошибок или сбоев можно выявить и устранить еще до начала реальной эксплуатации. При этом заметно экономится время и закладывается основа для индивидуализированного массового производства, поскольку сложные производственные маршруты можно быстро рассчитать, протестировать и запрограммировать с минимумом затрат и усилий.

Однако при таком «виртуальном прототипировании» возникает множество проблем, одно из которых это определение исходных данных для моделирования физических процессов. Так, одной из таких проблем является определение частных обжатий в непрерывной чистой группе клетей ШСГП 2000.

Определяют частные обжатия в чистовых клетях обычно по загрузке главных приводов (метод Имаи [2]), при этом определяют необходимые коэффициенты с помощью статистических методов [3-5]. В данной статье предложен способ подбора частных обжатий с помощью нейросетевых моделей. Нейронные сети зарекомендовали себя, особенно в последнее десятилетие, как удобный инструмент по прогнозированию и обработке данных [6]. В частности, в прокатном производстве нейросетевые модели используют для прогнозирования энергосиловых параметров [7, 8], для повышения точности приемочного контроля [9] и т.п.

### Нейронные сети

В работе для прогнозирования данных (количество активных клетей, толщина промежуточного проката (толщина полосы после выхода из черновой группы клетей), частные обжатия) используются обобщенно регрессионные нейронные сети. Обучение и построение нейронной сети реализовано с помощью библиотеки «PyTorch» интерпретируемого языка программирования «Python».

Обучение нейронных сетей проводилось на данных, полученных с баз данных учета технологических параметров ШСГП 2000 ПАО «ММК». Обучение проводилось на выборке собранной за период продолжительностью в два года работы стана (01.01.2017-01.01.2019 гг.).

© Платов С.И., Дема Р.Р., Латыпов О.Р., 2020

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011)

**Определение толщины промежуточного проката**

В качестве основы для определения обжатий были взяты алгоритмы [3-5]. По данным алгоритмам для определения обжатий необходимо сначала определить толщину промежуточного раската  $h_p$  и число активных клеток  $N_{кл}$  в чистовой группе.

В работе предлагается определять коэффициент суммарного обжатия  $\eta_{сум}$  с помощью обученной нейронной сети. Для определения толщины промежуточного раската  $h_b$  был разработан алгоритм, представленный на рис. 1.

Структура нейронной сети представляет собой многослойный персептрон, состоящий из входного слоя (4 нейрона), одного скрытого слоя (9 нейронов) и выходного слоя, содержащего 2 нейрона. В качестве функции активации использовалась функция «ReLU» (табл. 1).

Для определения частных обжатий в чистовых группах листовых станов горячей прокатки в ра-

боте предлагается модифицировать известные методы [2-5].

Для расчета режима обжатий используется выражение Имаи (1):

$$h_{i_i} = \frac{h_p h_k}{\sqrt[im]{\beta_{wi} h_p^{im} + (1 - \beta_{wi}) h_k^{im}}}, \quad (1)$$

где  $h_{i_i}$  – зазор между рабочими валками в  $i$ -й клетки;

$im = 0,30 + \frac{0,21}{h_k}$  – коэффициент Имаи;

$\beta_{wi} = \frac{\sum_{j=1}^{j=i} W_j}{\sum_{i=1}^{i=N_f} W_i}$  – коэффициенты использования мощности главных приводов;

$W_i$  – мощность, необходимая для прокатки в  $i$ -й клетки.

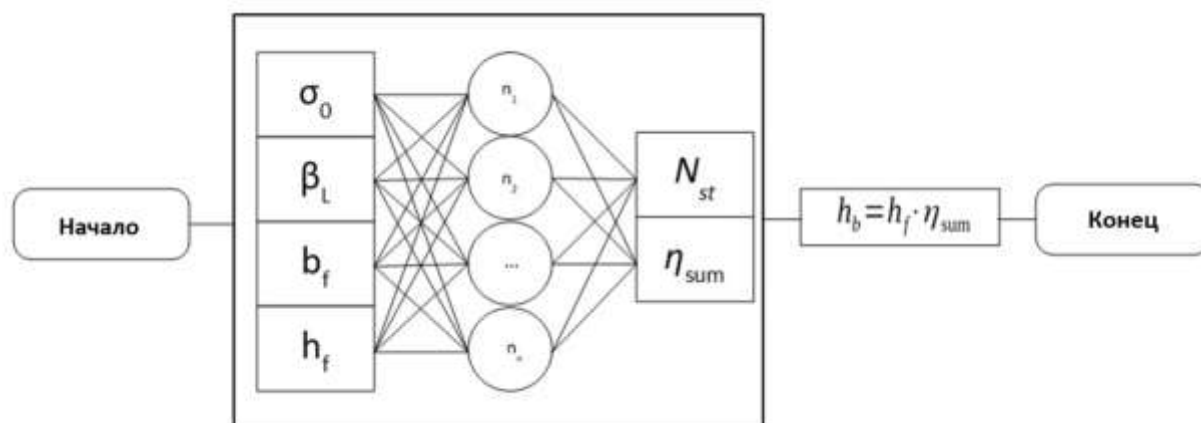


Рис. 1. Алгоритм определения толщины промежуточного раската  $h_p$  с помощью нейросетевой модели:

$\sigma_0$  – базовое сопротивление деформации, МПа, для условия  $\xi = 1 \text{ c}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 0,1$ ,  $t = 1000^\circ\text{C}$ ;

$\beta_L = b_p / L_p$  – коэффициент использования бочки валка, где  $b_p$  – ширина полосы, мм;

$L_p$  – длина бочки рабочего валка, мм,  $b_f$  – ширина проката на выходе из чистовой группы клеток, мм;

$N$  – количество задействованных в процесс прокатки клеток

Таблица 1

Параметры нейронной сети

Архитектура нейронной сети	Входной слой: 4 нейрона Скрытый слой: 11 нейронов Выходной слой: 2 нейрона
Активационная функция	Relu
Режим обучения	«обучение по шагам»
Степень распознавания обучающего множества, %	98,1
Степень распознавания тестового множества, %	92,5
Средняя относительная ошибка, %	4,7
Максимальная относительная ошибка, %	19,1

Прогнозирование режимов частных обжатий в чистовой группе клеток листовых станов горячей прокатки реализуется при помощи нейронной сети, структура которой приведена на рис. 2.

Сеть, входящая в алгоритм определения обжатий в чистовой группе клеток, состоит из входного слоя (4 нейрона), скрытого слоя (11 нейронов) и выходного слоя, содержащего 1 нейрон (табл. 2).

### Заключение

Таким образом, в ходе исследования был получен алгоритм, основанный на нейросетевой модели, позволяющий подбирать и определять частные обжатия на ШСГП 2000 ПАО «ММК».

Средняя ошибка при расчете обжатий составила 0,053, средняя абсолютная ошибка – 8,9%. Стандартное отклонение – 0,07 (табл. 3).

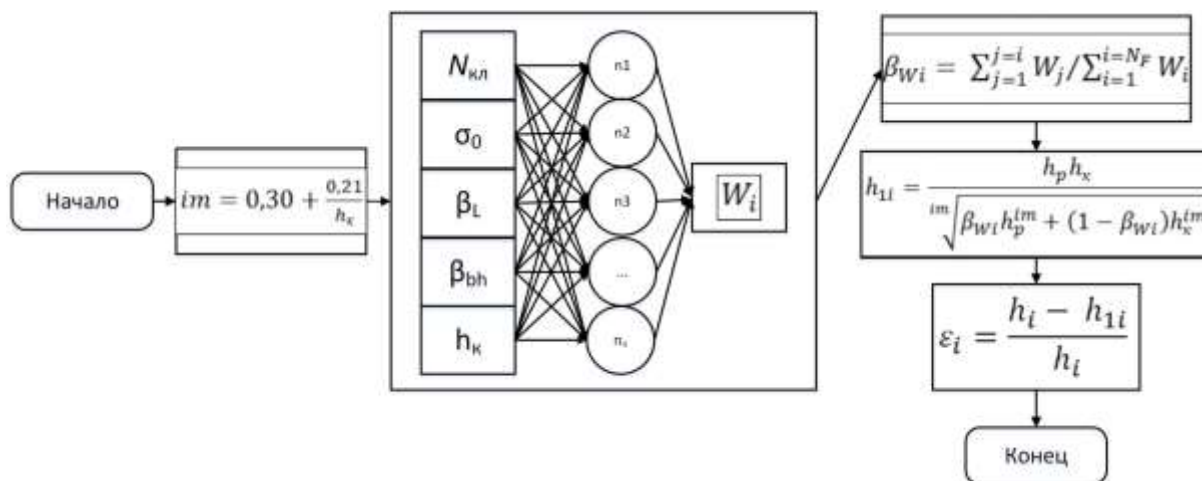


Рис. 2. Алгоритм определения обжатий в чистовых непрерывных клетях стана горячей прокатки:  
 $h_i$  – зазор между рабочими валками в  $i$ -й клетке;  $i_m$  – коэффициент Имаи;  
 $\beta_{wi}$  – коэффициенты использования мощности главных приводов;  
 $W_i$  – мощность, необходимая для прокатки в  $i$ -й клетке

Таблица 2

Параметры нейронной сети

Архитектура нейронной сети	Входной слой: 8 нейронов Выходной слой: 7 нейронов Скрытый слой: 11 нейронов
Активационная функция	Relu
Режим обучения	«обучение по шагам»
Степень распознавания обучающего множества, %	96,1
Степень распознавания тестового множества, %	91,5
Средняя относительная ошибка, %	6,3
Максимальная относительная ошибка, %	12,4

Таблица 3

Погрешности расчетов частных обжатий в чистовой группе клеток ШСГП 2000

Номер клетки	Средняя ошибка $\epsilon_{ME}$	Средняя абсолютная ошибка $\epsilon_{МАРЕ}$ , %	Стандартное отклонение $\sigma$
7	0,053	6,3	0,07
8	0,021	4,9	0,04
9	0,028	7,1	0,05
10	0,034	8,9	0,06
11	0,014	7,7	0,03
12	0,016	5,6	0,04
13	0,016	4,7	0,02

## Список литературы

1. Grieves M.W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC 2014.
2. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки: справочник. М.: Металлургия, 1986. 428 с.
3. Дема Р.Р., Мартынова У.Д., Амиров Р.Н. Применение нейронных сетей для описания и прогнозирования энергосиловых параметров горячей прокатки полос // Сталь. 2014. № 12. С. 43-47.
4. Румянцев М.И. Развитие методики синтеза режима обжаты при горячей прокатке на широкополосных станах. Сообщение 1. Выбор числа активных чистовых клетей // Калибровочное бюро. 2015. №6. С. 100-107.
5. Румянцев М.И. Развитие методики синтеза режима обжаты при горячей прокатке на широкополосных станах. Сообщение 2. Выбор толщины промежуточного раската // Калибровочное бюро. 2015. №6. С. 108-114.
6. Румянцев М.И. Развитие методики синтеза режима обжаты при горячей прокатке на широкополосных станах. Сообщение 3. Выбор ширины промежуточного раската // Калибровочное бюро. 2015. №6. С. 115-121.
7. Chojaczyk A.A., Teixeira A.P., Neves L.C., Cardoso J.B. and Soares C.G. Review and application of Artificial Neural Networks models in reliability analysis of steel structures // Structural Safety. 2015. Т. 52. Р. 78-89.
8. Применение нейронных сетей для моделирования энергосиловых параметров клетей чистовой группы НПСГП 2000 ОАО «ММК» / Амиров Р.Н., Дема Р.Р., Лукьянов С.И., Ярославцев А.В., Мартынова У.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №2. С. 102-103.
9. Разработка модели прогнозирования энергосиловых параметров горячей прокатки при подаче смазочного материала на валки непрерывного широкополосного стана / Платов С.И., Мартынова У.Д., Дема Р.Р., Амиров Р.Н., Ярославцев А.В. // Производство проката. 2014. № 4. С. 3-9.
10. Возможности совершенствования статистического приемочного контроля толстолистового проката для ОАО «ГАЗПРОМ» с применением искусственных нейронных сетей / Черкасов К.Е., Румянцев М.И., Шубин И.Г., Черкасов М.Е., Бочков Д.Г. // Производство проката. 2012. № 8. С. 44-47.

## Сведения об авторах

**Платов Сергей Иосифович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Дема Роман Рафаэлевич** – канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Латыпов Олег Рафикович** – аспирант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: latolegraff@list.ru



УДК 621.79.01

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА И КАРБИДА SiC ПРИ ПОМОЩИ ПЛАЗМЕННОГО ГРАНУЛИРОВАНИЯ\*

Наумов С.В.<sup>1</sup>, Панов Д.О.<sup>1</sup>, Артемов А.О.<sup>2</sup>, Игнатова А.М.<sup>2</sup>, Шекшеев М.А.<sup>3</sup><sup>1</sup>НИУ «БелГУ», г. Белгород<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «ГНИПУ», г. Пермь<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В работе представлены научно обоснованные технологические рекомендации для качественно нового подхода изготовления функциональных материалов, таких как сварочного плавящего флюса или шихты порошковой проволоки, основанного на физико-химических процессах воздействия электрической плазменной дуги с минеральным сырьем Уральского региона и карбидов кремния, обладающих всеми необходимыми оксидными веществами и особо низким содержанием вредных примесей с возможностью модифицирования структуры как сварочных материалов, так и сварного шва.

**Ключевые слова:** плазменные технологии, плазменная дуга, минеральное сырье, карбид кремния, Уральский регион, гранулирование, сварочные материалы.

Одним из основных приоритетных направлений по изготовлению сварочного флюса высокого качества с различным назначением, химическим составом и строением зерен является не только варьирование компонентного состава, но и технология его изготовления.

В настоящее время плазменные технологии обработки материалов находят все большее применение в различных отраслях промышленности, это обусловлено, прежде всего, высококонцентрированным источником тепла, простотой оборудования и оснастки, легкой переналадкой под различные задачи и экономичностью процесса, получая при этом конечную продукцию высокого качества [1-4].

Известные технологии по обработке минерального сырья плазменной дугой приведены в табл. 1. Помимо этого, также известны плазменные технологии обработки и получения из рутила, оксида железа, глины и другого минерального сырья различной дисперсности порошков [5-9]. Описанные способы хоть и позволяют получать различного фракционного состава гранулы функциональных материалов, но из-за особенностей физико-химических реакций образования гранул под воздействием высококонцентрированных источников тепла производительность таких устройств незначительна. Кроме того, карбид

кремния, карбиды титана, хрома, вольфрама и других металлов не будут образовываться и сохраняться в объеме гранул, так как процессы образования самих гранул проходят в условиях высоких длительных температур, и возможно термическое разложение карбидов.

Изучив технологические особенности протекающих процессов, выявили один из перспективных процессов обработки шихтовых материалов высококонцентрированным источником тепла (плазменная дуга), с помощью которого можно получать сварочные материалы, например для дуговой сварки и наплавки под флюсом. Технология заключается в воздействии плазменной дуги прямого действия на шихту из минерального сырья с целью получения гранул плавящихся сварочных флюсов, различного строения зерен, фракционного и химического составов [10, 11].

При производстве плавящихся сварочных флюсов существует недостаток связанный с невозможностью модифицировать и легировать компонентный состав в связи с плавкой шихты в газопламенных и электродуговых печах. В то же время при плазменном гранулировании процессы оплавления и затвердевания минерального сырья протекают за доли секунды и есть вероятность получения гранул, в составе которых будут частицы карбидов, которые будут осуществлять роль модификаторов в процессе сварки.

© Наумов С.В., Панов Д.О., Артемов А.О., Игнатова А.М., Шекшеев М.А., 2020

\*Исследования проведены при поддержке гранта РФФИ № 18-33-00599

Таблица 1

## Известные технологии по обработке минерального сырья плазменной дугой

Технология	Описание	Продукция
Получение нанодисперсного порошка диоксида кремния из кварцевого песка при помощи низкотемпературной плазмы	Генератор низкотемпературной плазмы инициирует поток низкотемпературной плазмы. Затем в плазменный реактор вводят порошкообразное сырье дисперсности не более 2 мм. Температура процесса 2500-3000°C. В результате физико-химических процессов плавления, испарения и сублимации образуется газовая фаза SiO <sub>2</sub> , которая осаждается на водоохлаждаемых поверхностях реактора путем образования пленки	Порошок на основе SiO <sub>2</sub>
Плазменный метод получения микросфер на основе золошлаковых отходов	Обработка приготовленного агломерированного порошка производится на электроплазменной стенде для получения микросфер и микрошариков. Подача сырья в область формирования плазменной струи осуществляется из порошкового дозатора по магистралям к инжекторам	Микросферы
Низкотемпературная плазма в технологии производства стеклокристаллических материалов	В процессе работы электроплазменной установки осуществляется интенсивный нагрев и плавление приготовленной шихты с заполнением расплавом всего объема плазмохимического реактора	Стеклокристаллические материалы
Утилизация техногенных отходов с использованием энергии термической плазмы	Принцип работы установки основан на взаимодействии высококонцентрированных потоков плазм с порошкообразным тугоплавким силикатсодержащим материалом (золы ГРЭС и РК), в результате которого осуществляется расплав дисперсных частиц с последующим образованием минеральных волокон	Зола, минеральное волокно на основе золы
Плазменная технология получения базальтового волокна	Расплавление базальтовой шихты потоком рабочего газа, нагретого до температуры 4000°C с помощью плазменной дуги, с последующим раздуванием расплава и образования базальтового волокна	Базальтовое волокно
Синтез наноразмерных порошков диоксида циркония и композиций на его основе в термической плазме электродугового плазмотрона	Синтез нанопорошков в плазмохимической установке осуществлен при взаимодействии сырья со струей кислородно-аргоновой плазмы (30 об. % O <sub>2</sub> ). В объеме реактора происходит испарение и химическое превращение исходного сырья с последующим формированием наночастиц в результате конденсации из газовой фазы. Образовавшиеся наночастицы осаждаются на стенках реактора и на фильтре	Порошок на основе ZrO <sub>2</sub>

Поэтому целью научной работы является получение сварочных материалов на оксидно-силикатной основе с добавлением карбида кремния. Основной задачей исследования по идентификации карбида кремния в составе гранул сварочного плавного флюса является проведение растровой электронной микроскопии с микрозондовым анализом и петрографического анализа гранул сварочного флюса, полученных плазменным гранулированием.

Различные карбиды играют важную роль в процессе протекания физико-химических реакций кристаллизации сварного шва, модифицируя его структуру. Таким образом, техническим результатом изобретения [12] является увеличение твердости и износостойкости наплавленного металла за счет нанесения на поверхность металлического сердечника сварочной проволоки сплошного сечения нанокomпозиционного покрытия, содержащего наноразмерные частицы активирующего флюса, карбидов и редкоземельных металлов.

Карбид кремния широко применяется для наплавки покрытыми электродами деталей машин в химической, нефтяной и металлургической отраслях промышленности, работающих в агрессивных средах в условиях абразивного и газоабразивного изнашивания. Карбид хрома используется в сочетании с карбидом кремния. Использование лигатуры Fe-Cr-B-Al-Si обеспечивает при наплавке уменьшение степени диссоциации и наиболее полный переход карбида кремния в наплавленный металл, а также комплексное его легирование [13].

Особым спросом в современных нефтедобывающем, нефтеперерабатывающем секторах, в химической промышленности пользуются сварочные порошковые проволоки, где известно широкое применение карбидов в составе её шихты. Введение в шихту вместо графита карбида кремния способствует более полному и стабильному усвоению углерода, что положительно сказывается на упрочнении металлической основы сплава.

Карбид кремния имеет очень высокий показатель микротвердости, уступающий только карбиду бора. Совместное использование карбида кремния и борида хрома дает возможность получать наплавленный металл с высокими физико-механическими свойствами. В твердых растворах системы SiC-CrB за счет их взаимной растворимости образуются комплексные соединения, придающие сплаву высокую твердость при качественном наплавленном слое. Кроме того, карбид кремния повышает устойчивость горения дуги, высокую жидкотекучесть ванны и значительный коэффициент наплавки. Введение в состав шихты карбида кремния в диапазоне 18-30% позволяет стабилизировать структуру наплавленного металла, значительно повысить его износостойкость без снижения сварочно-технологических характеристик и появления дефектов [14]. Применение карбидов металлов возможно и в таких функциональных материалах, как керамических флюсах [15].

Эксперименты по плазменному гранулированию сварочного флюса из минерального сырья с карбидосодержащими добавками осуществлялись на современном оборудовании для воздушно-плазменной резки фирмы HyperTherm Powermax 45. Данное оборудование достаточно просто переналадить для процесса гранулирования и позволяет программным путем регулировать тепловло-

жение в материал за счет изменения параметров дуги.

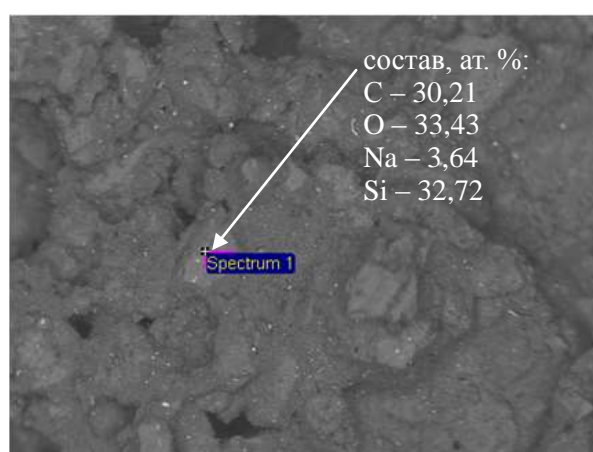
С целью изготовления гранул плазменным гранулированием использованы горные породы окисно-силикатной основы габброидной группы Уральского региона (табл. 2). Такое минеральное сырье имеет все необходимые компоненты для шлаковой основы плавящего флюса и низкое содержание вредных примесей [16]. Такие горные породы габброидной группы, как горнблендит, обладают хорошей плавкостью, требуемой температурой плавления, однородностью по химическому и фазовому составам. В качестве добавки использовался карбид кремния (SiC зернистостью F60, 0,2-0,3 мм).

Предварительно шлаковая основа смешивалась с карбидом кремния (15-20 масс. % SiC), с мелом для регулирования степени основности шлаковой системы и жидким стеклом для связывания всех компонентов и получения плит, которые в последующем подвергались процессу плазменного гранулирования. На рис. 1 показана структура полученных плит, в составе которой равномерно распределены частицы SiC (светлые точки). Повышенное содержание Na обусловлено наличием натриевого жидкого стекла. Известно, что концентрация оксидов Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O как щелочных металлов снизится в процессе плазменного гранулирования [10].

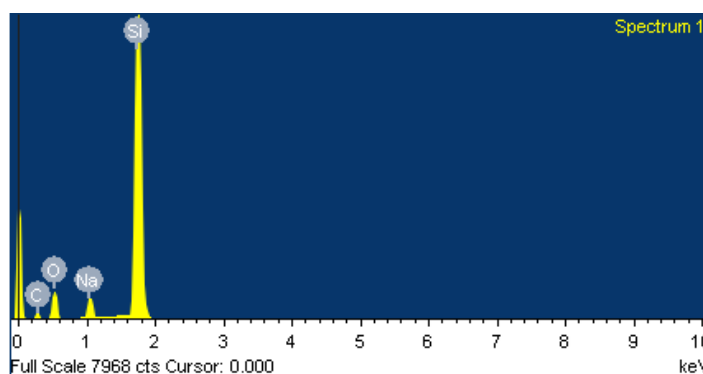
Таблица 2

Химический состав минерального сырья габброидной группы

Материал	Оксидный химический состав, масс. %								
	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO
Горнблендит	4,01	8,09	22,39	34,92	0,87	8,72	1,06	0,78	19,15



а



б

Рис. 1. Структура и элементный состав минерального сырья до плазменного гранулирования: а – включения карбида кремния; б – результаты рентгеноспектрального анализа

Согласно способу плазменного гранулирования осуществляли подачу шихты флюса на связующем веществе (жидком стекле), содержащей оксиды, с размером фракций 0,1-0,5 мм в зону гранулирования. Расплавление шихты флюса и формирование капель расплава проводили путем подачи шихты прямо в плазменную дугу прямого действия, образованную при протекании тока 30-200 А между плазмотроном и токопроводящим медным электродом. Затем сформированные капли расплава падали в грануляционный бассейн, установленный под зоной горения дуги. Таким образом, охлаждение сформированных капель с образованием гранул происходило в воде.

В результате получены гранулы сварочного флюса (рис. 2), морфология и размер которых исследовались с помощью растровой электронной микроскопии на микроскопе фирмы ZEISS. Установлено, что гранулы имеют размер частиц от 0,1 до 3 мм, что соответствует фракционному составу для сварочных флюсов. На рис. 2 изображен общий вид и химический состав гранул плавленого сварочного флюса, которые обладают как сферической, так и осколочной формой. Поверхность гранул пористая и это объясняется тем, что мел и частично карбид кремния в условиях окислительной среды образуют соединения  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , из-за которых получают пузыри и на поверхности гранул поры [17]. Более интенсивно образование пемзовидного строения зерен происходит при попадании гранул в подогретую воду. Высокое содержание меди до 5,13 ат. % в составе гранул обусловлено частично оплавлением медного электрода, на котором зажигается плазменная

дуга. С изменением конструкции устройства плазменного гранулирования на электрод с водяным охлаждением концентрация меди в составе гранул снизится.

Однако растровая электронная микроскопия с микрозондовым анализом только косвенно подтверждает наличие содержания карбидов кремния в составе гранул, поскольку в спектр излучения попадает и шлаковая основа, что затрудняет полностью идентифицировать наличие частиц  $\text{SiC}$ . Поэтому для оценки распределения частиц  $\text{SiC}$  в самой грануле проведен петрографический анализ.

Из синтезированных гранул флюса, полученных под действием высокого динамического и температурного воздействия плазменной дуги, были изготовлены шлифы для проведения петрографического анализа и исследованы на поляризационном микроскопе Nikon Eclipse E 600 POL.

Петрографический анализ показал, что состав гранул схож по структуре с роговой обманкой. Для роговой обманки характерна совершенная спайность в двух направлениях, где угол спайности 124 и 56°, но в данном шлифе этой спайности не наблюдается, поскольку трещины имеют техногенный характер [18].

В шлифе роговая обманка без анализатора коричневого и зеленого цвета с ясным плеохроизмом (плеохроирует от бледно-зеленого до зеленого цвета или бледно-коричневого до темно-коричневого цвета). С анализатором зёрна изотропные, хотя роговая обманка кристаллизуется в моноклинной сингонии, и она должна быть анизотропной.

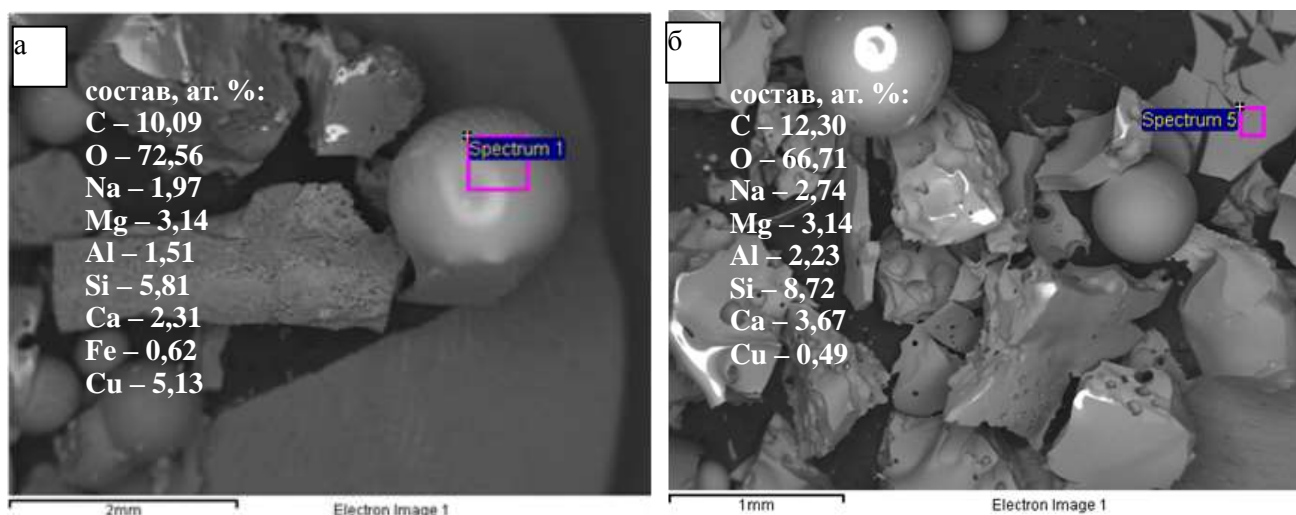


Рис. 2. Морфология и химический состав гранул: а – сферических гранул; б – осколочной формы гранул



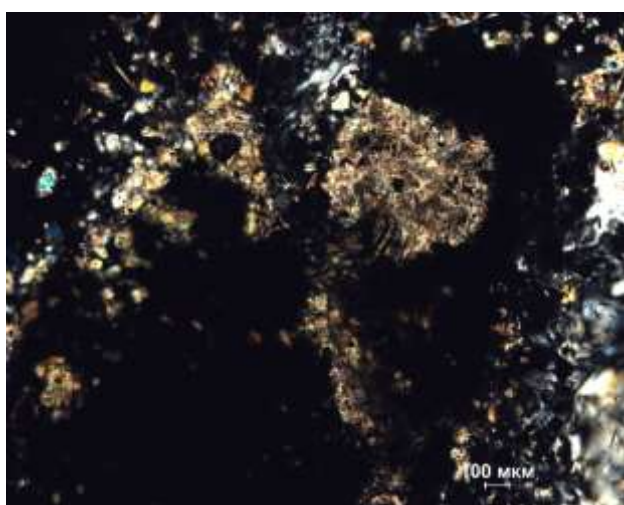
В данном шлифе встречаются включения карбида кремния, где размер зерен составляет 0,08-0,12 мм. Данные скопления расположены неравномерно по периферии (рис. 3, а) или внутри единичных зерен роговой обманки. Карбиды в шлифе бесцветные (без анализатора на рис. 3, б) и имеют двупреломление (с анализатором-фото на рис. 3, а), которое характеризуется яркой перламутровой интерференционной окраской.

Возможно, снижение размеров частиц карбида кремния связано с термическим разложением. Оксидно-силикатная основа влияет на частицы карбида кремния и кислая шлаковая основа (степенью основности сырья габроидной группы 0,7) приводит к ускорению термического разложения и уменьшению концентрации и размера частиц SiC в гранулах сварочного флюса.

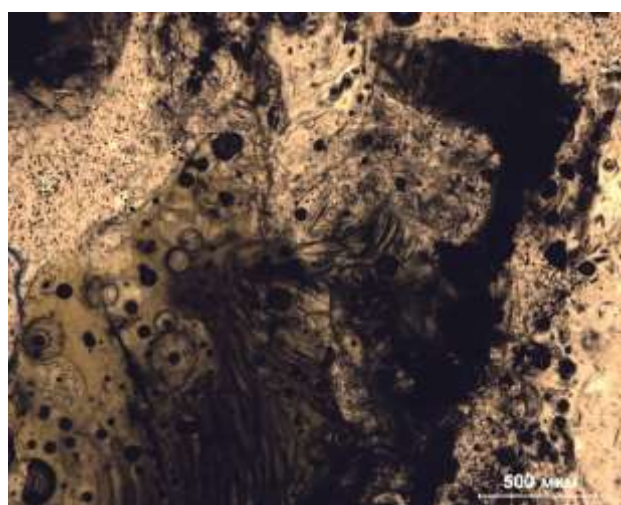
В заключение можно отметить, что предложенная технология плазменного гранулирования сварочного плавленного флюса, позволяющая получать гранулы из минерального сырья Уральского региона с добавлением карбида кремния, предположительно который в последующем процессе сварки участвует в металлургических процессах, благоприятно сказывающихся на модифицировании сварного шва. Установлено, что частицы карбида кремния размером до 0,12 мм располагаются как внутри, так и на периферии гранул. Синтез таких композиционных гранул позволит расширить номенклатуру сварочных материалов.

**Список литературы**

1. Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Утилизация техногенных отходов с использованием энергии термической плазмы // Химическая безопасность. Т. 2. №1. 2018. С. 162-169.
2. Плазменный метод получения микросфер на основе золошлаковых отходов / В.В. Шеховцов [и др.] // III Международная научная конференция «Молодёжь, наука, технологии: новые идеи и перспективы». Томск: ТГАСУ, 2016. С. 264-266.
3. Ненашева Д.Р., Космачев П.В. Получение нанодисперсного порошка диоксида кремния из кварцевого песка при помощи низкотемпературной плазмы // 62-я Университетская научно-техническая конференция студентов и молодых ученых «Химическая технология. Химическая промышленность». Томск: ТГАСУ, 2016. С. 537-540.
4. Kartsev D.S., Zernin E.A. Use of Refractory Nanoparticles as a Component of Welding Materials in Welding and Surfacing with Coated Electrodes and Flux Cored Wires, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 142, Issue 1. 2016.
5. Acayanka E., Tiya Djowe A., Laminsi S., Tchoumkwé C.C., Nzali S., Poupi Mbouopda A., Ndifon P.T., Gaigneaux E.M. Plasma-assisted synthesis of TiO<sub>2</sub> nanorods by gliding arc discharge processing at atmospheric pressure for photocatalytic applications, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 33, Issue 4, 2013. P. 725-735.
6. Djowe A.T., Laminsi S., Njopwouo D., Acayanka E., Gaigneaux E.M. Surface modification of smectite clay induced by non-thermal gliding arc plasma at atmospheric pressure, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 33, Issue 4, 2013. P. 707-723.
7. Samal S. Synthesis of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles from Ilmenite Through the Mechanism of Vapor-Phase Reaction Process by Thermal Plasma Technology, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 27, Issue 6, 2018. P. 2622-2628.
8. Swain B., Samal S.K., Mohanty M.K., Behera A., Mishra S.C. Study of effective utilization of iron ore sinter through arc plasma, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 338, Issue 1, 2018.



а



б

Рис. 3. Петрографический анализ гранул плавленного сварочного флюса с частицами SiC на периферии: а – с анализатором-фото, ×50; б – без анализатора, ×50



9. Shanenkov I., Sivkov A., Ivashutenko A., Medvedeva T., Shchetinin I. High-energy plasma dynamic synthesis of multiphase iron oxides containing  $Fe_3O_4$  and  $\epsilon-Fe_2O_3$  with possibility of controlling their phase composition. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 774, 2019. P. 637-645.
10. Artemov A.O., Naumov S.V., Ignatov M.N. Technology and Equipment for Plasma Electric Arc Granulation of Fused Welding Flux. *Materials Science Forum*. 946. 2019. P. 389-394.
11. Naumov S.V., Ignatov M.N., Sheksheev M.A. Technology of mineral raw materials granulation by electric arc for manufacturing of welding fused flux. *Solid State Phenomena*. 265, 2017. P. 290-295.
12. Паршин С.Г. Наноструктурированный сварочный материал: пат. 2544317 Рос. Федерации. 2015.
13. Попов С.Н., Митяев А.А., Кругликов А.Г. Состав электродного покрытия: пат. 1731550 СССР. 1992.
14. Маталасова А.В., Еремин Е.Н. Порошковая проволока: пат. 2682940 Рос. Федерации. 2019.
15. Белов Ю.М., Сморгачев П.И. Керамический флюс для автоматической электродуговой наплавки: А.с. 159388 СССР. 1963.
16. Naumov S.V., Ignatov M.N., Ignatova A.M., Artemov A.O. Development of slag base for welding fluxes from man-made mineral formations of ural mining and smelting companies. *Key Engineering Materials*. 743. 2017. P. 406-410.
17. Влияние плазменной обработки на поверхностные свойства стекловолокна / И. П. Ершов, Е.А. Сергеева, Л.А. Зенитова, И.Ш. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета. 2013. С. 97-99.
18. Целесообразность комплексирования минералогических методов изучения металлургических шлаков / Е.А. Горбатова, Ожогина Е.Г. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Т. 15. №4. 2017. С. 31-39.

#### Сведения об авторах

**Наумов Станислав Валентинович** – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. лаборатории объемных наноструктурных материалов НИУ «БелГУ», Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород. <https://orcid.org/0000-0002-4084-8861>. E-mail: [NaumovStanislav@yandex.ru](mailto:NaumovStanislav@yandex.ru).

**Панов Дмитрий Олегович** – канд. техн. наук, доц., мл. науч. сотр. лаборатории объемных наноструктурных материалов НИУ «БелГУ», Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород. <https://orcid.org/0000-0002-8971-1268>. E-mail: [dimmak-panov@mail.ru](mailto:dimmak-panov@mail.ru);

**Артемов Арсений Олегович** – ст. преподаватель каф. СПМиТМ ФГБОУ ВО «ПНИПУ», г. Пермь. E-mail: [artemoff87@mail.ru](mailto:artemoff87@mail.ru).

**Игнатова Анна Михайловна** – д-р техн. наук, вед. науч. сотр. ФГБОУ ВО «ПНИПУ», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь. <https://orcid.org/0000-0001-9075-3257>. E-mail: [iampstu@gmail.com](mailto:iampstu@gmail.com);

**Шекшеев Максим Александрович** – канд. техн. наук, доц. каф. МиТОДиМ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. <https://orcid.org/0000-0003-4790-2821>. E-mail: [shecsheev@yandex.ru](mailto:shecsheev@yandex.ru).

УДК 621.79.03, 621.79.04

## РЕМОНТ ВООРУЖЕНИЯ, ВОЕННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ПОМОЩИ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Журба А.Г.<sup>1</sup>, Наумов С.В.<sup>1</sup>, Белинин Д.С.<sup>1</sup>, Моргунов В.А.<sup>1</sup>, Артемов А.О.<sup>2</sup><sup>1</sup>ФГКВОУ ВО «ЛВИ войск национальной гвардии», г. Пермь<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «ПНИПУ», г. Пермь

**Аннотация.** В процессе эксплуатации военной и специальной техники изнашиваются элементы узлов, подверженные постоянным и динамическим нагрузкам, а в ряде случаев требуется и замена несущей брони. Учитывая габариты и толщины изделий, подверженных восстановлению и ремонту (катки, оси, подвески, элементы и корпуса брони), целью работы является проведение комплексных исследований по использованию сварки (наплавки) под флюсом и сварочных материалов из минерального сырья Уральского региона. В ходе работы проведены опытные испытания сварки под флюсом пластин 30ХГСА и сталь 20 с толщиной от 10 мм, используя сварочные плавные флюсы на оксидно-силикатной основе. Коллективом авторов данной работы достигнуты положительные результаты исследований по сварочно-технологическим испытаниям, механическим свойствам сварных соединений и химическому составу сварных швов.

**Ключевые слова:** ремонтные работы, механизированная наплавка под флюсом, сварочный флюс, минеральное сырье, Уральский регион, специальная техника, военная техника.

При ремонтно-восстановительных работах в полевых и заводских условиях не все методы наплавки пригодны из-за сложности и трудностей с транспортировкой сварочного оборудования, требований квалифицированного обученного персонала и невозможности эксплуатации без дополнительного оборудования. К одному из распространенных методов восстановительных работ в полевых условиях можно отнести механизированную наплавку под флюсом из-за ряда преимуществ, а именно независимость качества наплавленного металла от квалификации сварщика, благоприятные условия труда исполнителя работ ввиду отсутствия ультрафиолетового излучения, возможность автоматизации технологического процесса, повышенные сварочные токи, следовательно, более быстрые ремонтные работы [1-2].

При сварке (наплавке) под флюсом используются сварочные плавные и керамические флюсы [3-4]. Однако существовавшая до распада СССР сырьевая база сварочного производства была ориентирована в основном на богатые и хорошо разведанные месторождения сырья Украины, Грузии и юга России. После отделения соседствующих республик в России постепенно произошло исчерпывание ряда богатых месторождений, а отсутствие новых сырьевых источников привело к дефициту компонентов материалов,

традиционно входящих в состав покрытий сварочных электродов, флюсов и других сварочных материалов. Развитие дефицита привело к одновременному росту цен на эти компоненты и общему ухудшению их качества, возникла необходимость доставки сырья из сильно отдаленных территорий, включая импорт из стран ближнего и дальнего зарубежья. Решение проблемы дефицита сырья для производства сварочных материалов имеет важнейшее стратегическое и экономическое значение для различных секторов промышленности страны, в том числе и оборонного.

В связи с этим возникает необходимость в решении вопросов импортозамещения и самообеспечения крупных машиностроительных комплексов и оборонно-промышленных комплексов (ОПК) от импортных сварочных материалов. Предприятия ОПК переходят на технологию сварки под флюсом с использованием керамических флюсов как альтернативу ранее используемым плавным сварочным флюсам, но и эти сварочные материалы поступают, в большинстве своем, из Европы или изготавливаются по лицензии в России, что не является окончательным решением проблемы ОПК.

Уральский регион является сосредоточением крупных промышленных предприятий и различных источников минерального (силикатные основные и ультраосновные горные породы, отвальные породы различных шахтных выработок) и техногенного сырья (металлургические шлаки,

топливные золы и т.д.), которые содержат в своем составе компоненты, необходимые для создания сварочных флюсов и синтетических минеральных сплавов. Этот факт в совокупности с развитой инфраструктурой и наличием мощного горнорудного и обогатительного производственного комплекса позволяют говорить о целесообразности использования минеральной базы и научного потенциала Пермского края, Свердловской области и других регионов для обеспечения производства отечественных конкурентоспособных сварочных материалов [5].

В научной работе предложена технология сварки (наплавки) под флюсом, который изготовлен из минерального сырья Уральского региона, для использования в оборонно-промышленном комплексе и структурами технического обеспечения войск национальной гвардии.

Сварка (наплавка) под флюсом проведена с использованием сварочных материалов из минерального сырья Уральского региона и сталей 20 и 30ХГСА, которые являются распространенными для изготовления узлов военной и специальной техники и сварных конструкций общего назначения. Наплавка осуществлялась сварочным флюсом АН-348А ТУ 24.66.46.120-23255694-2017В производства ООО «Первоуральский завод горного оборудования», который в настоящее время имеет допуск НАКС на все объекты, подконтрольные Ростехнадзору. Оксидный химический состав экспериментальной плавки данного флюса приведен в табл. 1, флюс является «коротким», степень основности которого равна 0,5. На имитированный элемент корпуса автобронетанковой техники толщиной более 10 мм была проведена наплавка на режимах:  $I = 650$  А,  $U = 30$  В,  $V = 55$  см/мин. В табл. 2 приведен химический состав наплавленного металла проволокой Св-08А на сталь 20, где можно акцентировать внимание на низком содержании вредных примесей по S и P, не превышающих 0,005%, что говорит о высоком качестве сварочных материалов [6].

В то же время по механическим свойствам по ГОСТ 6996-66 и РД 26-11-08-86 наплавленный

металл на Сталь 20 проволокой Св-08А под сварочным флюсом из минерального сырья Уральского региона не уступает качеству основы подложки:  $\sigma_B = 415$  МПа,  $\sigma_T = 331$  МПа,  $\delta = 14,6\%$  (основной металл:  $\sigma_B = 410$  МПа,  $\sigma_T = 245$  МПа,  $\delta = 25\%$ , ГОСТ 1050-2013).

Таким образом, для элементов конструкций, не подверженных высокому износу и не состоящих из высоколегированных сталей, можно рекомендовать для сварки (наплавки) сварочный флюс на шлаковой основе из горнблендита Первоуральского региона. В то же время для восстановительных работ узлов гусеничного трака будет затруднительно использовать данный флюс из-за низкой степени основности, однако при использовании соответствующей проволоки и флюса на оксидно-силикатной основе с добавлением рутила либо повысив основность самого флюса (мрамор, известняк, фторфлогопит), можно будет использовать для наплавки материалы, например, по типу стали Гадфильда.

Помимо этого, проведены сравнительные испытания сварки пластин из стали 30ХГСА толщиной 10 мм с использованием различных сварочных материалов (флюса АН-348А по ГОСТ 9087-81 и флюса на основе сырья уральского региона АН-348А ТУ 24.66.46.120-23255694-2017). Установлено, что качество сварных швов, полученное при использовании флюса на основе габброидных пород Уральского региона, соответствует заявленным требованиям по ремонту и производству специальной техники. Предел прочности и ударная вязкость сварного шва составляют  $\sigma_B = 755$  МПа и КСУ 62 МДж/см<sup>2</sup>, и по сравнению с АН-348А  $\sigma_B = 741$  МПа и КСУ 79 МДж/см<sup>2</sup> свойства находятся на одном уровне. Полученные образцы также подверглись рентгенографическому контролю и прошли металлографические исследования (на наличие трещин всех видов, прожогов, свищей, не заваренных кратеров, наплывов и пор), в результате которых определена благоприятная форма шва, а дефекты не обнаружены.

Таблица 1

Химический состав экспериментальной плавки сварочного флюса АН-348А ООО «ПЗГО»

Флюс	Оксидный химический состав, мас. %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
на основе горнблендита	39,52	26,40	8,87	6,74	0,88	0,55	0,75	3,58	12,71

Таблица 2

Химический состав наплавленного металла на Сталь 20

Химические элементы												
Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Co	Ti
99,351	0,047	0,291	0,569	0,005	0,003	0,023	0,031	0,006	0,029	0,020	0,012	0,004

В заключение можно отметить, что использование сварочных материалов из минерального сырья Уральского региона, например флюса АН-348А ТУ 24.66.46.120-23255694-2017 при механизированной наплавке под флюсом деталей и узлов специальной техники, по отделимости в процессе сварки, уровню защиты и легирования сварного шва, а также по результатам исследования влияния на качество сварного шва, соответствуют известному аналогу – флюсу АН-348А ГОСТ 9037 и могут быть рекомендованы для ремонтно-восстановительных работ в ОПК и структурами технического обеспечения войск национальной гвардии.

#### Список литературы

1. Ельцов В.В. Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов: учеб. пособие по дисциплинам «Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов» и «Основы восстановления деталей и ремонт автомобилей». Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. 176 с.
2. Сварка металлов. Технология автоматической электродуговой сварки под слоем флюса: метод. указания / С.В. Наумов, М.Ф. Карташев, А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов. Пермь: Гармония, 2016. 40 с.
3. Петров Г.Л. Сварочные материалы: учеб. пособие для вузов. Ленинград: Машиностроение, 1972. 280 с.
4. Стандартизация сварочных материалов для дуговой сварки сталей : учеб. пособие / Е.М. Федосеева, Л.Н. Битинская, С.В. Наумов. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. 71 с.
5. Development of slag base for welding fluxes from man-made mineral formations of ural mining and smelting companies / Naumov S.V., Ignatov M.N., Ignatova A.M., Artemov A.O. // Key Engineering Materials. 2017. № 743. P. 406-410.
6. Пат. 2448824 РФ МПК В23К 35/40, В23К 35/362. Шихта для получения сварочного плавного флюса / М.Н. Игнатов, А.М. Игнатова, С.В. Наумов. Заявл. 29.03.2011; Опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.

#### Сведения об авторах

**Журба Андрей Геннадьевич** – курсант 1-го взвода 5-й роты факультета технического обеспечения ФГКВБОУ ВО «ПВИ войск национальной гвардии», г. Пермь. E-mail: andrej.zhurba.98@mail.ru.

**Наумов Станислав Валентинович** – канд. техн. наук, профессор факультета технического обеспечения ФГКВБОУ ВО «ПВИ войск национальной гвардии», г. Пермь. <https://orcid.org/0000-0002-4084-8861>. E-mail: NaumovStanislav@yandex.ru.

**Моргунов Владимир Алексеевич** – канд. воен. наук, начальник кафедры эксплуатации автобронетанковой техники ФГКВБОУ ВО «ПВИ войск национальной гвардии», г. Пермь. E-mail: pviivngrf@mail.ru.

**Белинин Дмитрий Сергеевич** – канд. техн. наук, доц., каф. СПМиТМ, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, проф., факультета технического обеспечения, ФГКВБОУ ВО «ПВИ войск национальной гвардии», г. Пермь. <https://orcid.org/0000-0001-5462-0908>. E-mail: 51y87@mail.ru.

**Артемов Арсений Олегович** – ст. преподаватель каф. СПМиТМ ФГБОУ ВО «ПНИПУ», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь. <https://orcid.org/0000-0003-0038-641X>. E-mail: artemoff87@mail.ru.

УДК 612.821

## ИССЛЕДОВАНИЕ РИСКОВ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ

Гаврилова И.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В статье рассматриваются риски применения нейрокомпьютерных интерфейсов, приводится их классификация в зависимости от инвазивности. Авторами выделены такие группы рисков, как биомедицинские, гуманитарные, объединяющие этические, социальные и правовые риски, технические, программные и эксплуатационные, а также риски, порождаемые недостатком знаний об особенностях функционирования мозга. Сделан вывод о целесообразности дальнейших исследований рисков применения нейрокомпьютерных интерфейсов.

**Ключевые слова:** нейрокомпьютерный интерфейс, риски, «интерфейс мозг-компьютер», инвазивные нейрокомпьютерные интерфейсы, неинвазивные нейрокомпьютерные интерфейсы.

Человечество не перестаёт искать эффективные способы управления компьютерными системами, которые сокращают время реакции, что может быть чрезвычайно важно при эксплуатации широкого спектра компьютерных систем. Так, от ручного ввода информации сейчас постепенно переходят к голосовому вводу данных, который не только снижает нагрузку на суставы рук, но и при должной настройке быстрее отображает текст или открывает и закрывает окна приложений. Однако существуют ситуации, когда и ручное, и голосовое управление может оказаться недоступным в силу удалённости устройства или зашумленности окружающей среды или ограниченной мобильности оператора. В этой ситуации наиболее эффективным способом коммуникации между человеком и компьютером представляется нейрокомпьютерный интерфейс (НКИ). Сейчас они активно применяются для реабилитации неподвижных людей, при разработке технологий виртуальной реальности, а также при дистанционном управлении роботизированными устройствами [2, 4-7]. Можно найти множество восторженных статей о бесконечных перспективах этого вида интерфейсов, однако исследований, изучающих риски их применения, почти нет: проблемы авторами упоминаются вскользь или не упоминаются вовсе.

Между тем исследование рисков необходимо при вводе новых видов интерфейсов в массовую эксплуатацию, поскольку только таким образом можно оценить вероятность наступления сбоев и масштабов их последствий [3].

### Виды нейрокомпьютерных интерфейсов

Принято считать, что идея создания НКИ возникла в 1924 г. после изобретения электроэнцефалографии, однако управление материальными объектами силой мысли описывается во многих древних мифах. Долгое время эта идея вдохновляла писателей-фантастов и футурологов, и только сейчас, когда накоплен существенный пласт знаний о мозге, особенностях его функционирования, разработана мощная аппаратная база даже не микро-, а наноустройств, эта идея воплотилась в реальной жизни.

Существует два варианта названия этого вида интерфейса: «нейрокомпьютерный интерфейс» и «интерфейс мозг-компьютер». Одни исследователи считают, что первый вариант относится только к инвазивным интерфейсам, а второй – общее название для всех. Другие полагают, что оба эти термина взаимозаменяемы. В нашем исследовании мы будем придерживаться второго подхода [1, 2, 5].

Технически все НКИ делятся два класса: инвазивные (имплантируемые) и неинвазивные.

Принцип работы первых заключается в регистрации биопотенциалов, снимаемых непосредственно с коры головного мозга или от отдельных нейронов глубинных структур мозга с помощью имплантированных электродов. Исследователи полагают, такой метод взаимодействия наиболее перспективен, т.к. не содержит каких-либо посредников при обмене сигналами, однако в силу своей травматичности он не получил широкого распространения.

Неинвазивные НКИ подразумевают считывание биопотенциалов с поверхности головы с помощью:



- функциональной магнитно-резонансной томографии;
- позитронно-эмиссионной томографии;
- магнитоэнцефалографии;
- электроэнцефалографии;
- ближней инфракрасной спектроскопии.

Первые три вида требуют громоздкого дорогостоящего оборудования, поэтому применяются только в лабораторных исследованиях, остальные достаточно просто модифицировать для массового производства [8].

### Классификация рисков НКИ

Изучение особенностей работ НКИ позволило выделить следующие группы рисков.

Риски имплантируемых НКИ:

– биомедицинские, связанные с заражением патогенными микроорганизмами, ответом иммунной системы (всевозможные аллергические реакции), повреждением тканей, в которые вживляется электрод (включая риск появления соединительнотканых образований), сложная замена электрода в случае его поломки;

– этические, социальные и правовые риски, вызванные отсутствием равного доступа к технологиям «усовершенствования» человека, изменением понимания человека как физиологического существа.

Среди биомедицинских рисков наиболее частым является не риск заражения микроорганизмами, как казалось бы, а риск врастания электрода в ткани и, как следствие, ухудшение качества считывания сигнала [8]. Замена электрода требует новой высокотехнологичной и дорогостоящей операции на мозге, влияет на его структуру, поэтому этот риск является определяющим при выборе метода инвазивности. Польза от импланта должна существенно превышать потенциальный вред. Аллергические реакции могут возникнуть ещё реже, но полностью не исключаются.

Импланты сейчас могут вернуть подвижность немобильным инвалидам, соединить искусственную сетчатку с областью распознавания изображений мозга, т.е. вернуть зрение тем, кто его потерял вследствие травмы, но высокая стоимость операций оказывается серьёзным ограничением доступа к «усовершенствованию» организма. При равных правах возможность качественно улучшить жизнь есть только у состоятельных людей, что обостряет существующую проблему разделения общества на состоятельную «элиту» и всех остальных.

Другой риск – неприятие обществом частично модифицированных людей: несмотря на пропаганду толерантности, людям сложно относиться к инвалидам так же, как к обычным людям.



Классификация рисков

Описанные социально-этические проблемы уже существуют в обществе, но они неизбежно станут острее при появлении новых технологий улучшения или сглаживания ограниченных возможностей здоровья. Неравенство возможностей – основная причина классовой ненависти, которая может привести к сильным социальным возмущениям, и, как показывает история, к революции и войнам. Этот риск достаточно силен.

Некоторые риски присущи НКИ вне зависимости от степени их инвазивности. К ним относятся :

- технические риски (физическая неисправность датчиков, износ, нарушение контакта и т.п.);
- программные риски (сбои в системе управления, погрешности алгоритмов машинного обучения, взлом системы, и как следствие, открытость мозга для нежелательных воздействий и информации);
- эксплуатационные риски, связанные со сложностью настройки оборудования перед использованием, необходимостью обучения человека работе с НКИ, потерей концентрации пользова-

теля на задаче, отсутствием комфорта при работе с НКИ;

– риски, порождаемые недостатком знаний об особенностях функционирования мозга.

На текущий момент нет исследований, которые оценивали бы численную вероятность наступления нежелательных событий, однако последствия для инвазивных НКИ несоизмеримо выше, поскольку сопряжены с причинением ущерба организму.

Для технических рисков наиболее вероятно нарушение контакта, затем износ и неисправность датчиков. Программные риски можно снизить на этапе проектирования и разработки программного обеспечения. Наиболее опасна среди них открытость мозга для нежелательных воздействий и информации, т.к. в НКИ в настоящее время практически нет возможности предусмотреть фильтрацию информации.

Среди эксплуатационных рисков наиболее вероятной является потеря концентрации над задачей. Пользователю нужны и обучение, и тренировки для того, чтобы полноценно работать с НКИ. Часть этих рисков также можно снять при проектировании системы (например, повысить комфортность, простоту освоения), но не все. Контроль над собственным психоэмоциональным состоянием достаточно сложная задача, а его потеря приводит к невозможности безопасной эксплуатации НКИ.

И, наконец, мозг – неизученная до конца система, поэтому требуется большое количество исследований для выявления реакций на возможные события. Это упростит выделение шаблонов для обучения систем, работающих на основе НКИ.

Безусловно, вероятность наступления каждого риска неодинакова, какие-то аспекты учитываются на этапе разработки НКИ, однако вероятность их наступления может нести угрозу жизни человека. По этой причине необходимы дальнейшие исследования рисков НКИ для разработки мер, предотвращающих или сглаживающих наступление неблагоприятных событий.

### Список литературы

1. Glannon W. Ethical issues with brain-computer interfaces. *Front. Syst. Neurosci.* 2014. 8:136. doi: 10.3389/fnsys.2014.00136
2. Nicolas-Alonso LF, Gomez-Gil J. Brain Computer Interfaces, a Review. *Sensors.* 2012; 12(2):1211-1279.
3. Галиуллина Е.С., Иванушкина И.С. Уровень развития и эффективности системы управления финансовыми рисками как фактор влияния на капитализацию компаний // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования.* 2010. Т. 2. № 68. С. 287-290.
4. Интерфейс мозг-компьютер: опыт построения, использования и возможные пути повышения рабочих характеристик / К.В. Волкова [и др.] // *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова.* 2017. Т. 67. № 4. С. 504-520.
5. Основные направления развития человеко-машинных интерфейсов и примеры их использования / Шептунов С.А. [и др.] // *Вестник Брянского государственного технического университета.* 2017. №6 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-napravleniya-razvitiya-cheloveko-mashinnyh-interfeysov-i-primery-ih-ispolzovaniya> (дата обращения: 18.05.2020).
6. Управление роботизированным экзоскелетом на основе технологии «Интерфейс мозг-компьютер» моторно-воображаемого типа / Гордлеева С.Ю. [и др.] // *Современные технологии в медицине.* 2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-robotizirovannym-ekzoskeletonom-na-osnove-tehnologii-interfeys-mozg-kompyuter-motorno-voobrazhaемого-tipa> (дата обращения: 16.05.2020).
7. Чуян Е.Н., Бирюкова Е.А., Бабанов Н.Д. Двигательная реабилитация пациентов с нарушениями моторики верхних конечностей: анализ современного состояния исследований (обзор литературы) // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия.* 2019. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvigatelnaya-reabilitatsiya-patsientov-s-narusheniyami-motoriki-verhnih-konechnostey-analiz-sovremennogo-sostoyaniya-issledovaniy> (дата обращения: 16.05.2020).
8. Интерфейс мозг-компьютер. URL: <http://ru-bci.org/index.php> (дата обращения: 16.05.2020).

### Сведения об авторе

**Гаврилова Ирина Викторовна** – канд. пед. наук, доц., доц. каф. бизнес-информатики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск. <https://orcid.org/0000-0002-4283-5810>. E-mail: [i.gavrilova@magtu.ru](mailto:i.gavrilova@magtu.ru)

УДК [621.771.26:621.961.2]:004.42

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ СИСТЕМЫ УЧЕТА И ИЗМЕРЕНИЯ ВЕСА И ДЛИНЫ ЗАГОТОВОК НА МЗ «ЭЛЕКТРОСТАЛЬ ТЮМЕНИ»**Леднов А.В.<sup>1</sup>, Бараблин А.С.<sup>2</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск<sup>2</sup>Металлургический завод «Электросталь Тюмени», г. Тюмень

**Аннотация.** В машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) металлургического производства существует задача, связанная с порезкой по мерным длинам. При износе кристаллизатора масса заготовки при равной длине порезки увеличивается, что в дальнейшем приводит к увеличению отходов на следующих переделах.

Учитывая тот факт, что сортовой прокат, получаемый из литой заготовки имеет высокую цену, актуальной становится задача корректировки ее длины при порезке с целью фиксирования массы.

Одним из путей решения этой проблемы является модернизация системы управления пореза заготовки путем ее интеграции с системой учета «пробега» гильзы кристаллизатора и математической модели расчета теоретической массы. Решение этой задачи рассмотрено на примере модернизации алгоритмов работы технологического оборудования машины непрерывного литья заготовок металлургического завода «Электросталь Тюмени».

**Ключевые слова:** кристаллизатор, корректировка длины, алгоритм коррекции, мерная длина.

**Введение**

В сортопрокатных цехах металлургического производства существует задача, связанная с отгрузкой проката по мерным длинам. В настоящее время рез заготовок происходит по заданной длине, что в результате приводит к непостоянному весу заготовок и, как следствие, образованию лишней обрезки во время проката.

Непостоянный вес при постоянной длине вызван постоянным износом гильз кристаллизатора, которые определяют геометрию заготовок (рис. 1).



Рис. 1. Характерный вид износа внутренней поверхности гильзы (вид с нижнего торца)

Снижение погрешности реза при ограниченном весе заготовки может не только улучшить производительность процесса прокатки стали, но

также может снизить энергопотребление и себестоимость тонны стали. Существует много факторов, которые влияют на резку с ограниченным весом заготовки в процессе разлива стальной заготовки, такие как точность измерения длины заготовки, скорость разлива заготовки, степень износа литейной формы, температура разлива жидкой стали, чувствительность зажима реза и т.д.

Высокую техническую ценность имеет способ найти основные факторы, влияющие на вес заготовки, и рассмотреть результат многофакторного взаимодействия для повышения точности реза заготовки, а также для того, чтобы распространить разумное ограничение веса заготовки [1, 2].

**Методика**

Существует множество факторов, которые влияют на резку с ограниченным весом заготовки в процессе разлива стальной заготовки, такие как скорость разлива заготовки, температура разлива жидкой стали, степень износа литейной формы и т.д. Функциональная зависимость между весом заготовки и скоростью разлива заготовки может быть описана как

$$G = \sum_{i=1}^n S \rho v_i \frac{1000}{60}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь заготовки;  $\rho$  – плотность заготовки;  $v_i$  – скорость в реальном времени литья заготовки.

Из экспериментальных данных видно, что из-за изменения поперечного сечения заготовки, массы заготовки и длины заготовки появляются явления дисперсии соответствующего распределения. Рис. 2 иллюстрирует дисперсионное соотношение между весом и длиной заготовки [3]. Одинаковый вес заготовки может соответствовать разному диапазону ее длины, необходимо учитывать поперечное сечение.

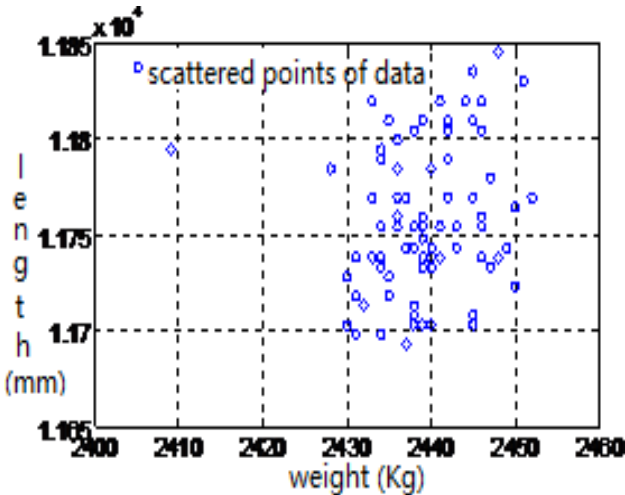


Рис. 2. Дисперсионное соотношение между весом и длиной заготовки

Авторы [4-9] предлагают использовать визуальное измерение площади поперечного сечения, однако в условиях реального производства «поймать» 1-2 мм изменения в размерах не представляется возможным.

В статьях [10-12] предлагается коррекция длины реза для стабилизации массы заготовки с применением метода конечных автоматов и динамической логической модели визуализации потока.

### Промышленное решение

Изначально медные гильзы кристаллизатора для условий исследования имеют размеры выходного отверстия **155×153 мм**.

Во время эксплуатации гильзы получают износ и списываются, когда отклонение от начального размера достигает **2,5 мм**. Соответственно, при увеличении выходного отверстия гильзы, увеличивается и геометрия заготовки, что ведет к увеличению веса.

Расчетная разница в весе заготовки (при длине заготовки 12 м) в начале цикла эксплуатации гильзы и в конце составляет около **73 кг** или **3%**.

Предлагается алгоритм (рис. 3), в котором отслеживается степень износа установленных гильз кристаллизатора и корректировка длины реза, в результате чего вес заготовок будет постоянным и таким, каким его задаёт оператор МНЛЗ.

Тенденция изменения длины реза всегда будет вести к уменьшению изначального значения.

Технической проблемой для реализации данного решения является неточность измерения заготовок для реза в текущей системе.

Измерение происходит с помощью энкодера на приводном ролике тянуще-правильного агрегата или с помощью математического расчета по скорости разливки.

Приводной ролик тянуще-правильного агрегата склонен к проскальзываниям, а математическая модель по скорости разливки ведет расчет с определенными погрешностями. Эти технические решения не позволяют реализовать систему корректировки длины из-за их недостаточной точности.

Предполагаемое решение этой проблемы заключается в установке дополнительного абсолютного углового энкодера на неприводной ролик тянуще-правильного агрегата, что исключит проскальзывания и обеспечит систему достаточной точностью для подсчёта длины заготовки.

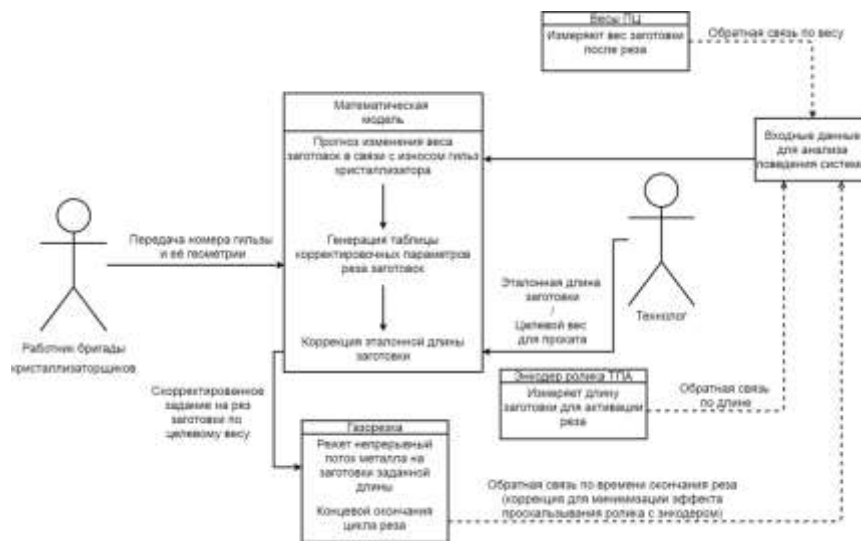


Рис. 3. UML-диаграмма алгоритма



Следующим шагом становится создание таблицы коэффициентов, основанной на промежуточных показаниях параметров гильз.

В зависимости от пробега гильзы в процентном соотношении будет выставляться тот или иной коэффициент изменения длины.

#### Список литературы

1. Ge Yadong, Dong Chao. Measures to raise products ratio of bar. Hebei Metallurgy, 12:27-29 (2011)
2. Rögener F., Lednova Yu.A., Andrianova M.Yu., Lednov A.V., Sustainable stainless steel - a review on acid regeneration systems for application in continuous pickling lines, Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 2. С. 38-48.
3. Wang Fubin, Chen Zhikun, Wu Baolin, et al . Forecast for Billet Weight Based on SVM Optimized by Niching Particle Swarm. Control Engineering of China, 22(3):554-558 (2015)
4. Исследования по коррекции массы заготовок с учетом поведения потока / Ван Фубинь, Сюй Ао, Цзэн Кай, Чэнь Чжикунь, Чжоу Ялуо // МАТЕС Web of Conferences 68, 02005 (2016)
5. Сегментация изображения пенного продукта флотации: обоснование замены пузырька их бликами / Логунова О.С., Леднов А.В., Шилов Р.Э., Муслимов М.Б., Байбулатов Ф.Р. // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2018. Т. 6. № 1. С. 12-19.
6. Jin Guoping, Xu Fuhao, Wang Yong. Application of the machine vision technology in the billet cut-to-length auto measuring system. Bao-Steel Technology, 3:76-80 (2011)
7. Zhang Chao, Hu Shaohai, Xiao Yang. 2-D DFT-DWT hybrid transform and its application in removing speckle noise for medical ultrasound images . Signal Processing, 25(3): 464-468 (2015)
8. Xiao T., Hu S.H., Xiao Y., 2-D DVF-DWT application to multidimensional signal processing, Proc. ICSP 2006, PP.1306-1309.
9. Jian Liu, Zhong Liu1, Ying Xiong. Method of Parameters Optimization in SVM based on PSO. Transactions on Computer Science and Technology, 2(3):9-16 (2013)
10. Su Mang, Li Fenghua, Shi Guozheng. Action-Based Multi-level Access Control Model. Journal of Computer Research and Development, 51(7):1604-1613 (2014)
11. Mei Yang, Yi Zichen, Wang Lipeng, et al. An improved modulation strategy for the five-leg inverter based on finite state machine

#### Сведения об авторах

**Леднов Анатолий Викторович** – канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Бараблин Артем Сергеевич** – инженер, металлургический завод «Электросталь Тюмени», г. Тюмень.



УДК 004.7.056

**УЯЗВИМОСТИ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ**

Иванова А.В., Михайлова У.В., Баранкова И.И.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Активное внедрение биометрии в различных областях человеческой жизни делает биометрические системы защиты все более популярными. В данной статье проанализированы характерные особенности биометрической идентификации и аутентификации, исследован рынок биометрической продукции, выявлены преимущества и недостатки различных методов. Также рассмотрены проблемы биометрической защиты по геометрии лица и отпечатку пальцев и недостатки законодательства в этом вопросе. Практическая часть работы заключалась в создании слепка отпечатка пальца для обхода блокировки устройства, использующего одно из популярнейших и широко практикуемых биометрических систем идентификации. На основе проведенного исследования авторами выдвигается ряд рекомендаций по повышению надежности безопасности персональных данных и устранению уязвимостей биометрической аутентификации по отпечатку пальцев и изображению лица.

**Ключевые слова:** идентификация, аутентификация, безопасность информации, защита информации, биометрические системы, геометрия лица, дактилоскопия, отпечаток пальца, персональные данные, термограмма, утечка информации, уязвимость.

**Введение**

Обеспечение безопасности персональных данных – одна из главных проблем современного мира. С появлением новых технических объектов и систем, которые являются неотъемлемой частью информационной сферы, человек стремится к надежной и полной защите своих данных. Процесс хранения и защиты информации должен содержать в себе предоставление доступа для подлинного пользователя. Одним из наиболее новых и удобных способов обеспечения безопасности является биометрическая аутентификация. Подделка биометрических данных большинству пользователей кажется практически невозможной и чем-то из области фантастики. Нашей задачей являлось показать, что в современных реалиях это достаточно просто. И, следовательно, этот вопрос требует доработки в законодательном плане, так как биометрические данные сейчас используются для доступа ко многим персональным данным пользователей, таким как доступ к мобильным банкам и др.

Существуют различные методы аутентификации с использованием биометрических параметров (рис. 1, представленные данные являются официальными данными исследования для книги «Принципы работы и уязвимости биометрических систем аутентификации». И.П. Пересыпкин. 2017 г). Среди простых пользователей гаджетов распространенными методами являются предоставление отпечатка пальца и изображения лица.

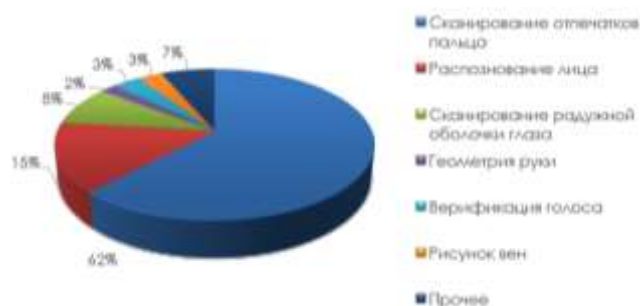


Рис. 1. Статистика по практическому использованию биометрических средств защиты

Геометрия лица – распространенный способ идентификации и аутентификации человека. С помощью специальных технологий можно построить трёхмерную модель человеческого лица. Такая модель строится на основе выделения различных элементов: контур овала лица, носа, бровей, глаз, губ и других параметров. Далее вычисляется расстояние между ними и на основе этого строится трёхмерный шаблон. Для определения уникальности используется от 12 до 40 характерных геометрий лица. Однако даже такая сложная система имеет уязвимости. Подделка данного параметра зависит от того, какой уровень защиты имеет устройство. Некоторые системы открывают доступ к информации по предъявлению фотографии лица, также используют грим, маски, слепки головы человека, более умные системы обходят при помощи записанного видеоизображения или синтезированной на компьютере видеомодели лица человека. Для защиты от фальсификации ис-

пользуются различные аппаратные и программные методы, а также их сочетание.

Отпечаток пальца – не менее распространенная система идентификации и аутентификации, обычно используется для предоставления доступа к компьютеру, идентификации владельцев банковских счетов. Отпечаток пальца состоит из ряда хребтов и впадин. Этот ряд признаков и мелких точек (вершин) определяют уникальность отпечатка пальца. Один из методов проверки основан на таких деталях и сравнивает мелкие точки двух отпечатков. Эффективность такого подхода сильно зависит от качества образца отпечатка.

Таким образом, целью данной работы является выявление и описание всех уязвимостей биометрической защиты по изображению лица и отпечатка пальца и разработка мер по предупреждению и устранению этих уязвимостей.

### Основная часть

В цифровую эпоху традиционных методов аутентификации – паролей и удостоверений личности – уже недостаточно для борьбы с хищением персональных данных и обеспечения безопасности. Биометрические системы распознают людей на основе их анатомических особенностей (отпечатков пальцев, образа лица, рисунка линий ладони, радужной оболочки, голоса) или поведенческих черт (подписи, походки). Биометрические методы защиты информации и технологии исключают пароли из жизни сотрудников и обладают следующими преимуществами:

1. Высокий уровень безопасности.
2. Неотчуждаемость аутентификационных данных.
3. Удобство использования.

В статье рассматриваются две наиболее используемые биометрические системы распознавания человека, одна из них – методы распознавания по геометрии лица, она основана на том, что черты лица и форма черепа каждого человека индивидуальны. Данная область биометрии делится на два направления: 2D- и 3D-распознавание.

2D-распознавание лица – один из самых статистически неэффективных методов биометрии. Появился он довольно давно и применялся, в основном, в криминалистике, что и способствовало его развитию. Впоследствии появились компьютерные интерпретации метода, в результате чего он стал более надёжным, но, безусловно, уступал и с каждым годом все больше уступает другим биометрическим методам идентификации личности.

Несмотря на это, в настоящее время существует множество методов по 3D-распознаванию лица, реализация данного метода представляет собой довольно сложную задачу. Методы невозможно сравнить друг с другом, так как они используют

различные сканеры и базы. Далеко не все из них выдают FAR и FRR, используются абсолютно различные подходы.

Хорошим дополнением к биометрической защите служит аутентификация по термограмме лица. Данный биометрический метод аутентификации выражается в установлении человека по его кровеносным сосудам. Термограмма – изображение в инфракрасных лучах, показывающих картинку распределения температурных полей. Такой способ аутентификации основан на исследованиях, которые показали, что термограмма лица уникальна для каждого человека. Термографические камеры обнаруживают излучение в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра и на основе этого излучения создают изображения, позволяющие определить перегретые или переохлаждённые места. Этот метод способен распознать близнецов (в отличие от распознавания по геометрии лица), использование специальных масок, проведение пластических операций, старение организма человека, температура тела, охлаждение кожи лица в морозную погоду не влияют на точность термограммы. Однако данный метод не распространен широко, возможно, из-за невысокого качества получаемых термограмм лиц.

В настоящее время используется множество различных датчиков и способов разблокировки устройства с помощью биометрических данных. Ещё одним из наиболее распространенных является дактилоскопия – способ опознания (идентификации) человека по следам пальцев рук (в том числе ладоней рук), основанный на неповторимости рисунка кожи.

Достоинства:

- более высокая достоверность, чем при других аутентификациях;
- достаточно низкая стоимость оборудования.

Недостатки:

- папиллярный узор можно легко повредить;
- на предприятиях с большой численностью часто возникают ошибки при сканировании;
- недостаточна защищенность от подделок отпечатка, некоторые сканеры реагируют и на бумажный трафарет.

Среди сканнеров отпечатков пальца выделяются 2 наиболее популярных на данный момент: емкостной и термосканер.

Работа емкостных сканеров основана на эффекте изменения емкости р-п-перехода полупроводника при соприкосновении гребня папиллярного узора с элементом полупроводниковой матрицы. Существуют модификации емкостных сканеров, в которых каждый полупроводниковый элемент в матрице выступает в роли одной пластины конденсатора, а палец – в роли другой. При

приложении пальца к датчику между каждым чувствительным элементом и выступом-впадиной папиллярного узора образуется емкость, величина которой определяется расстоянием между рельефной поверхностью пальца и элементом. Матрица этих емкостей преобразуется в изображение отпечатка пальца. Достоинствами вследствие его популярности является: низкая себестоимость и надежность. Недостатки: неэффективная защита от муляжей.

Термосканеры – устройства, использующие датчики, которые состоят из пирозлектрических элементов, позволяющих фиксировать разницу температуры и преобразовывать ее в напряжение. При прикладывании пальца к сканеру по температуре прикасающихся к пирозлектрическим элементам выступов папиллярного узора и температуре воздуха, находящегося во впадинах, строится температурная карта поверхности пальца, которая в дальнейшем преобразуется в цифровое изображение.

Температурный метод имеет множество преимуществ:

- высокая устойчивость к электростатическому разряду;
- устойчивая работа в широком температурном диапазоне;
- эффективная защита от муляжей.

Существует вероятность ложного доступа (FAR) и то, что отпечаток не будет распознан (FRR) (табл. 1).

Таблица 1

Вероятности ложного приема и нераспознавания отпечатка

FAR	FRR
0,1%	0,3%
0,01%	0,4%
0%	0,6%
0%	0,9%

Практическая часть работы заключалась в создании слепка отпечатка пальца для обхода блокировки устройства, использующего одно из популярнейших и широко практикуемых биометрических систем идентификации. Эксперимент проводился на базе технопарка «Кванториум» МГТУ им. Г.И. Носова.

Ход эксперимента:

1. С фотографии пальца изготовить негатив отпечатка.
2. По созданному негативу изготовить штамп отпечатка для изготовления муляжа отпечатка.
3. С использованием созданного штампа изготовить поддельный отпечаток пальца из желатина.

4. Протестировать изготовленный поддельный отпечаток пальца из желатина на сканере отпечатков пальцев.

На основе сделанной фотографии создали негатив в программном обеспечении AdobePhotoshopCS 5 (рис. 2). Изготовление штампа выполнялось на экспериментальной установке. Описание экспериментальной установки (рис. 3): лазерный принтер, сканнер, оргстекло. При помощи лазерного принтера и негатива выполнен штамп отпечатка пальца на оргстекле (см. рис. 3).



Рис. 2. Негатив отпечатка пальца



Рис. 3. Внешний вид лазерного принтера и изготовленного штампа для изготовления муляжа отпечатка

После изготовления штампа отпечатка пальца оргстекло было залито смесью из глицерина и желатина, так мы получили поддельный слепок отпечатка пальца (рис. 4).

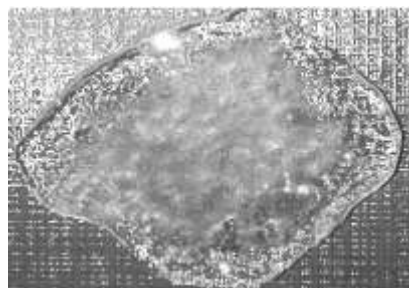


Рис. 4. Слепок на желатине



После всего сделанного конечный продукт был протестирован и сканер телефона распознал его как отпечаток пальца.

При использовании инновационных технологий люди не задумываются о возможных проблемах, с которыми они могут столкнуться в ходе работы с девайсами. Большое количество персональной информации предоставляется компаниям умных устройств, из-за чего пользователи могут быть подвержены такой проблеме, как утечка данных. Это позволяет злоумышленникам манипулировать человеком благодаря украденной информации. Возрастает необходимость урегулирования прав и ответственности в сфере защиты персональных данных и их безопасного хранения.

К правовым методам обеспечения информационной безопасности относится разработка нормативных ведомственных документов и нормативных правовых актов по вопросам обеспечения информационной безопасности.

Первой крупной составляющей правовых мер обеспечения информационной безопасности является составление перечня сведений, который разделяет сведения на строго конфиденциальные, конфиденциальные и для служебного пользования; определяет и утверждает списки доступа; исключает сведения, не относящиеся к коммерческой тайне и т.д. Вторая составляющая – развитие нормативно-правовой базы, которая определяет экономическую безопасность, а также устанавливает административную и уголовную ответственность.

Вопросы правового регулирования в сфере защиты информации Российской Федерации отражены в следующих нормативно-правовых актах законодательства федерального уровня: Гражданский кодекс РФ, Уголовный кодекс РФ, Бюджетный кодекс РФ, а также федеральные законы: «О правовой охране программ для ЭВМ и баз данных»; «Об авторском праве и смежных правах»; «О государственной тайне»; «Об информации, информационных технологиях и защите информации»; «Об электронной цифровой подписи», ФЗ № 152 «О персональных данных» и т.д.

В российском законе содержится прямое указание на то, что персональные данные граждан представляют собой конфиденциальную информацию, но при этом порядок защиты прописан поверхностно. Немаловажной проблемой является отсутствие в УК РФ состава преступления, который бы напрямую касался персональных данных, что делает проблематичным привлечение виновных лиц к уголовной ответственности за преступления в сфере обороны и защиты персональных данных.

Также одним из важнейших условий развития правовых методов защиты информации является строгость и однозначность формулирования и корректность использования принятых терминов.

Если говорить о тенденциях развития специальной терминологии обеспечения информационной безопасности, то оно во многом определяется развитием соответствующих аппаратно-программных средств и технологии систем обработки информации, а также движется в направлении наращивания практических аспектов в сравнении с теоретико-информационными. Кроме того, динамика развития терминологии характеризуется устареванием ряда терминов, которые, в свою очередь, взаимосвязаны с устареванием программно-аппаратных средств и технологий.

### Заключение

Современное общество и автоматизация повседневных действий напрямую связаны с аспектами уязвимостей систем и угроз информационной безопасности. Остро стоит вопрос о защищенности персональных данных пользователей, в том числе биометрических данных.

В данной научной работе были рассмотрены различные методы биометрической аутентификации, в том числе по изображению лица и отпечатку пальца, а также их преимущества и недостатки, что представляет ценность в новых и, на сколько то возможно, полных знаниях о возможностях биометрической защите данных. На практике была создана и представлена модель, являющаяся подделкой отпечатка пальца и, соответственно, угрозой носителя персональных данных. Это несет в себе доказательства того, что аспекты информационной безопасности имеют уязвимости, которые требуют их предотвращения и укрепления нормативной базы в правовой части вопроса.

Специалисты в области информационной безопасности активно разрабатывают и совершенствуют методы для защиты данных. Государство совершенствует правовое регулирование в области обработки и защиты персональных данных. Общественность также должна принимать активное участие в разработке предложений по совершенствованию защиты и должна сама стремиться обеспечивать безопасность своих персональных данных.

### Список литературы

1. Аутентификация по геометрии лица [Электронный ресурс] // Аутентификация и идентификация. URL: [https://studbooks.net/2249892/informatika/autentifikatsiya\\_geometrii\\_litsa](https://studbooks.net/2249892/informatika/autentifikatsiya_geometrii_litsa). (Дата обращения: 18.01.2020).
2. Замена паролей на биометрическую аутентификацию сотрудников [Электронный ресурс] // Биометрическая аутентификация сотрудников. URL: <https://indeed-id.ru/solution-am-biometry>. (Дата обращения: 18.01.2020).
3. Принципы работы и уязвимости биометрических систем аутентификации / Пересыпкин И.П., Мартынова Л.Е., Назарова К.Е., Белозёрова А.А., Поп-

- ков С.М. // Молодой ученый. 2016. №30. С. 86-88. URL <https://moluch.ru/archive/134/37699/> (дата обращения: 09.02.2020).
4. Современные методы биометрической идентификации [Электронный ресурс] // Биометрические способы идентификации. URL: <https://www.azone-it.ru/sovremennye-metody-biometricheskoj-identifikacii>. (Дата обращения: 24.02.2020).
  5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000-2012. Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Общий обзор и терминология: [PDF] // Росстандарт. Дата обращения: 20.09.2019.
  6. «Умные города»: среда, опасная для человека [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://d-russia.ru/umnye-goroda-sreda-opasnaya-dlya-cheloveka.html>. (Дата обращения: 14.03.2019).
  7. Идентификация личности / Михайлова У.В., Коновалов М.В., Гуринец К., Кучербаева Э.Ф. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2013. Т. 2. № 71. С. 164-166.
  8. Михайлова У.В., Лукьянов Г.И., Дончан Д.М. Анализ биометрической аутентификации на устойчивость при воздействии внешних факторов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. Т. 1. С. 295-295.

#### Сведения об авторах

**Иванова Анастасия Викторовна** – студентка, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. <https://orcid.org/0000-0001-6484-6214>. E-mail: [anastasivanova12@gmail.com](mailto:anastasivanova12@gmail.com).

**Михайлова Ульяна Владимировна** – канд. техн. наук, доц. каф. ИиИБ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: [ulyanapost@gmail.com](mailto:ulyanapost@gmail.com).

**Баранкова Инна Ильинична** – д-р техн. наук, зав. каф. ИиИБ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.



УДК 53.087.62

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ШЛАКА ПРИ СЛИВЕ СТАЛИ ИЗ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ

Пишнограев Р.С.<sup>1</sup>, Келехсашвили Р.Р.<sup>2</sup>, Келехсашвили И.С.<sup>2</sup><sup>1</sup>ООО «ТЕХНОАП Инжиниринг», г. Магнитогорск<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В статье приведены сведения об этапах разработки системы детектирования шлака, основанной на термопильной камере: выборе составляющих элементов системы, разработке структуры ИК-детектора, необходимого программного обеспечения системы.

Кратко описаны методики статистической обработки видеоданных и генерации сигнала о появлении шлака в струе при сливе металла.

В заключительной части приведены результаты опытно-промышленной апробации разработанной системы в условиях электросталеплавильного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Ключевые слова:** термопиля, термомультипликатор, инфракрасная камера, электродуговая печь, шлак, Raspberry Pi, LINUX.

### Системы отсечки шлака по инфракрасному излучению

С целью получения качественной продукции в металлургической промышленности используют специальные добавки к расплаву. Эти добавки вступают в химическую реакцию с нежелательными примесями, находящимися в расплаве, и всплывают на поверхность. Таким образом происходит разделение качественной стали и нежелательных элементов. Смесь добавок и примесей называют шлаком. После окончания всех технологических процессов по получению необходимого химического состава шлак необходимо удалить. Негативное влияние шлака, остающегося в расплаве, заключается в следующем:

- толстый слой шлака на поверхности металла вызывает образование твердой корки, которая мешает проведению дополнительных операций по внепечной обработке (разогреву) металла в ковше;

- высокий уровень FeO и MnO в шлаке приводит к повышению общего содержания кислорода в стали; неустойчивые оксиды в шлаке реагируют с алюминиевыми и другими добавками, что приводит к повышенному их угару;

- повышенный расход алюминия, требующийся из-за наличия «слабых» оксидов, приводит к образованию включений оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), которые могут откладываться на оборудовании металлургических агрегатов и приводить к их «зарастанию»;

- фосфор, находящийся в шлаке, попадает в сталь во время внепечной обработки (разогрева) и ухудшает ее свойства;

- находящийся в шлаке оксид железа (FeO) реагирует с огнеупорными материалами, вызывая их эрозию и разрушение [1-3].

Часто удаление шлака выполняется его отсечкой при переливе расплава из одной технологической ёмкости в другую [2, 3].

При этом важно точно определить момент, когда в струе расплава происходит переход металл-шлак. Для определения момента осуществления отсечки применяют системы автоматизации различного принципа действия [2, 3]:

- электромагнитные;
- вибрационные;
- инфракрасные.

Принцип действия инфракрасных систем (ИК-систем) детектирования шлака основан на анализе интенсивности излучения струи при сливе стали из конвертера в инфракрасном диапазоне с длиной волны 8-12 мкм. Из литературных источников известно, что интенсивность излучения конвертерного шлака в данном диапазоне превышает интенсивность излучения металла в 1,3–2 раза. Это позволяет определять момент появления шлака в струе металла и принимать меры по ограничению его количества, попадающего в стальковш, т.е. снизить затраты на дальнейшую обработку металла. Подобные системы используются на технологических переделах, где имеется возможность визуального контроля струи – конвертерное производство, электросталеплавильные печи [3].

В настоящее время самыми распространёнными являются ИК-камеры, в качестве чувствительных элементов в которых используются микроболометры. В [3] описана система детектирования шлака в струе при сливе стали из кислородного конвертера, выполненная на базе ИК-камеры FLIR 615 A [4]. Однако в последнее время всё большую популярность приобретают ИК-камеры с термопильными матрицами, так как они значительно дешевле микроболометрических. Примером термопильной ИК-камеры может служить камера НТРА80х64 фирмы Heimann [5, 6].

### Устройство ИК-детектора системы отсечки шлака

Элементарным сенсором камеры НТРА80х64 является термопиля (thermopile). Название thermopile состоит из двух слов, второе из которых (pile) переводится как «куча», «стопка» или «штабель». В ходе анализа литературных источников рядом с именем Леопольдо Нобили, первым создателем термопары и термопилы, также встретилось слово «термомультипликатор». Схематичное устройство термопилы представлено на рис. 1 [5].

Термопиля, по сути, представляет собой несколько термопар, включенных последовательно для увеличения напряжения термоЭДС. Материалами для термопар чаще всего являются кремний и алюминий. Современные технологии позволяют размещать сотни термопар на одном квадратном миллиметре. «Горячие» и «холодные» спаи термопар разделены теплоизолятором, например «сэндвичем» из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Все термопары находятся в одном корпусе датчика. «Горячие» спаи через кремниевый светофильтр подвергаются воздействию теплового потока – инфракрасному излучению, направленному от объекта к дат-

чику, если объект горячее датчика, или от датчика к объекту, если объект холоднее датчика и поглощает тепло. В результате возникает разница температур  $\Delta T$  между температурой  $T_1$  «горячих» спаев и температурой  $T_2$  изолированных «холодных» спаев и появляется термоЭДС  $U$  [5, 6].

В упрощённом случае напряжение  $U$  может быть определено выражением

$$U = K \cdot (\varepsilon \cdot T_{ob}^{4-\delta} - T_{sens}^{4-\delta}),$$

где  $K$  – конструктивный коэффициент;

$\varepsilon$  – коэффициент эмиссии, индивидуальный для исследуемого объекта;

$\delta$  – поправка на зависимость чувствительности датчика от частоты излучения.

$T_{ob}$  – температура объекта;

$T_{sens}$  – температура термопилы.

Параметры  $K$  и  $\delta$  определяются при калибровке термопилы. Значение  $T_{sens}$  определяется по показаниям терморезистора, встроенного в датчик. Выражение для  $U$  позволяет рассчитать температуру объекта при известном коэффициенте  $\varepsilon$ . Однако для задач детектирования шлака имеет значение не конкретное значение  $\varepsilon$ , а отличие значений данного коэффициента для стали и шлака, что и отразится в различии напряжений  $U$  [12].

Камера НТРА80х64 состоит из 5120 термопил, организованных в двумерный массив с размерами 80 на 64, и интегрированных схем усиления напряжения термоЭДС, мультиплексирования и организации цифрового интерфейса SPI, встроенных ПЗУ и ОЗУ для хранения коэффициентов, полученных в результате калибровки и текущих показаний термопилей [6].

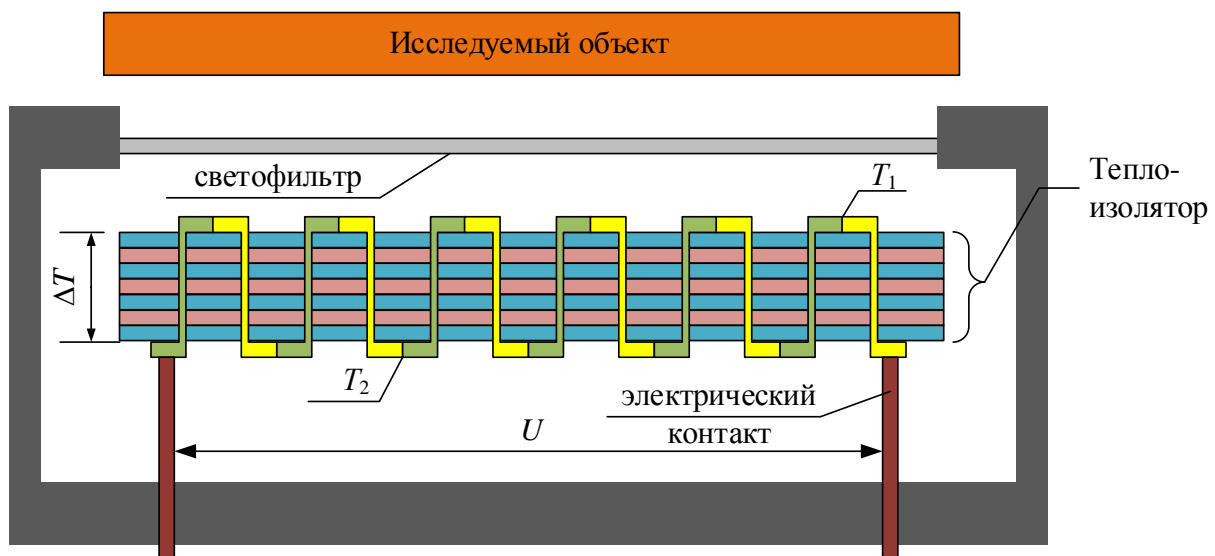


Рис. 1. Структура термопилы (термомультипликатора)

Опрос показаний камеры был реализован при помощи одноплатного микрокомпьютера Raspberry Pi 3 B+. Данный компьютер обладает интерфейсами SPI, Ethernet и WiFi, что вместе с малыми габаритами делает его удобным для разработки мобильных и встраиваемых систем [7].

В разработанной экспериментальной системе ИК-детектор состоит из камеры НТРА80х64, микрокомпьютера Raspberry Pi 3 B+ и преобразователя напряжения 24 VDC / 5 VDC, необходимого для питания микрокомпьютера. Питание камеры осуществляется от Raspberry Pi. Все компоненты размещаются в цилиндрическом защитном кожухе диаметром 100 мм и длиной 300 мм.

Программное обеспечение экспериментальной системы разрабатывалось при помощи модуля LINX для среды разработки LabView. Это набор программных компонентов, разработанный компанией Makerhub специально для Raspberry Pi. Модуль содержит все необходимые процедуры для настройки и использования SPI, универсальных вводов-выводов GPIO и контроллера Ethernet [8].

Для использования модуля LINX на компьютер Raspberry Pi необходимо установить специализированную свободно распространяемую операционную систему [8].

С использованием модуля LINX были разработаны следующие процедуры:

- настройки SPI контроллера на режим работы 0 с программным управлением линией выбора кристалла;
- настройки вывода GPIO8 на работу в режиме дискретного выхода с включённым подтягивающим резистором (используется в качестве линии выбора кристалла для интерфейса SPI);
- чтения ПЗУ камеры НТРА80х64 по SPI интерфейсу;
- чтения ОЗУ камеры НТРА80х64 по SPI интерфейсу;
- пересчёта данных единиц аналого-цифровых преобразователей камеры в градусы Цельсия с компенсацией собственной температуры камеры и различий в напряжениях питания усилителей.
- настройки TCP/IP сокетa для передачи информации от камеры на удалённую рабочую станцию;
- установки связи по протоколу TCP/IP с удалённой рабочей станцией с функцией автоматического восстановления соединения при его разрыве;
- обмена информацией с удалённой рабочей станцией.

Разработанный ИК-детектор был установлен на электродуговой сталеплавильной печи №1 электросталеплавильного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

### Анализ видеоряда ИК-детектора системы отсечки шлака

В изображении, полученном от камеры, была выделена область наиболее вероятного положения струи в момент появления шлака размером шесть на семь пикселей. Размер области интереса и положение выбирались на основании имеющегося опыта экспериментаторов.

Также в видеокадре была выделена область размером пять на пять пикселей, в которой наблюдается ёмкость для приёма стали – стальковш. Это необходимо для получения информации об интенсивности излучения фона (внутренней разогретой поверхности стальковша) и автоматического определения момента появления струи (начала слива).

С целью формирования статистической выборки была выполнена видеofиксация более трёхсот сливов и выполнена следующая статистическая обработка:

1. Случайным образом было выбрано девятносто четыре архива видео.
2. Для каждого выбранного архива в видеоряде был случайным образом выбран кадр в момент слива стали.
3. По выбранному кадру определены максимальные значения интенсивности инфракрасного излучения в обеих областях интереса – для фона  $I_{\Phi}$  и стали  $I_C$ .
4. Затем для каждого архива случайным образом был выбран кадр в момент слива шлака через горловину печи.
5. По выбранному кадру определено максимальное значение интенсивности ИК-излучения для области интереса в районе струи для шлака  $I_{Ш}$ .
6. Построены распределения полученных величин  $I_{\Phi}$ ,  $I_C$  и  $I_{Ш}$  и при помощи критерия Пирсона доказано их соответствие нормальному распределению [9-11].

В результате статистической обработки были получены графики функций плотности распределения вероятностей величин  $I_{\Phi}$ ,  $I_C$  и  $I_{Ш}$ , представленные на рис. 2.

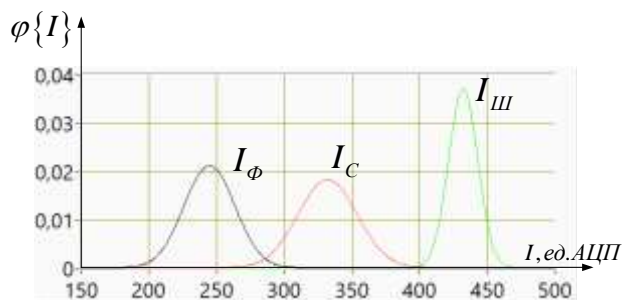


Рис. 2. Графики распределений величин  $I_{\Phi}$ ,  $I_C$  и  $I_{Ш}$

Из графиков рис. 2 и результатов обработки данных следует, что значение интенсивности излучения струи шлака в среднем в 1,30 раза больше, чем значение интенсивности излучения стали. Появление шлака в струе можно с вероятностью 0,999 детектировать при превышении интенсивности ИК-излучения области интереса в 400 единиц АЦП-камеры [9-11].

На основании проведенных исследований был разработан алгоритм детектирования шлака в струе при сливе стали на ДСП, реализующий следующую методику:

1. Для каждого нового кадра видеокamеры внутри области интереса струи определяется максимальное значение интенсивности  $I_C$ , а внутри области интереса фона – максимальное значение интенсивности  $I_\Phi$ .

2. Найденные значения  $I_C$  и  $I_\Phi$  заносятся в буферы, представляющие из себя стеки FIFO. При этом самые старые значения  $I_C$  и  $I_\Phi$  удаляются. Всего в буферах хранится по пятьдесят последних значений параметров  $I_C$  и  $I_\Phi$ . Значения  $I$  с индексами  $j = 0$  соответствуют текущему кадру видеозображения. Значения с индексами  $j = 49$  соответствуют состоянию, имевшемуся пятьдесят кадров тому назад.

3. По значениям  $I_{\Phi 15} \dots I_{\Phi 49}$  находится среднее значение интенсивности излучения фона  $M\{I_\Phi\}$  и стандартное отклонение интенсивности излучения фона  $S\{I_\Phi\}$ .

4. Если величина  $M\{I_\Phi\}$  превышает установленное значение границы слива, равное 200 единицам, устанавливается флаг разрешения поиска струи.

5. По значениям  $I_{C 15} \dots I_{C 49}$  находится среднее значение интенсивности излучения струи  $M\{I_C\}$  и стандартное отклонение интенсивности излучения струи  $S\{I_C\}$ .

6. Если установлен флаг разрешения поиска струи (п. 4) и величина  $M\{I_C\}$  превышает результат выражения  $M\{I_\Phi\} + 4 \cdot S\{I_\Phi\}$ , устанавливается флаг обнаружения струи «Слив».

7. Если установлен флаг «Слив» и последние три значения интенсивности излучения струи  $I_{C0}$ ,  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$  превышают результат выражения  $M\{I_C\} + 5 \cdot S\{I_C\}$ , устанавливается флаг «Шлак». Флаг «Шлак» также устанавливается вне зависимости от наличия других флагов в том случае, если все три параметра  $I_{C0}$ ,  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$  превышают значение в 400 единиц.

## Заключение

Разработанный алгоритм был реализован в виде программного продукта и апробирован в условиях электросталеплавильного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Всего было проанализировано более 300 сливов, 150 из которых осуществлялись с применением системы детектирования шлака, остальные – без неё. Результаты показали, что применение системы позволяет: сократить время слива шлака в стальковш с 2,5 до 0,5 с, в среднем, и исключить слив стали в шлаковую чашу, т.е. сократить потери продукции.

## Список литературы

1. Непрерывная разливка сортовой заготовки: монография / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, А.Л. Подкорытов, В.Е. Ухин, А.В. Кравченко, А.Ю. Оробцев. Донецк: Цифровая типография, 2012. 417 с.
2. Формакидов А.М. Разработка и исследование системы обнаружения шлака в струе расплавленного металла: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Формакидов Антон Михайлович. М., 2003.
3. Luk'yanov S., Suspitsyn E., Pishnograev R., Krasilnikov S. Survey of melt stream infrared radiation parameters at various stages of steel tapping from basic oxygen furnace. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 88. Is. 1. P. 595-602.
4. FLIR A615 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.flir.eu/products/a615/>
5. Thermopile [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermopile>, свободный. Загл. с экрана.
6. Thermopile Arrays and Imaging. Overview НТРА80x64. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.heimanssensor.com/Datasheets/Overview-НТРА80x64d\\_Rev8.pdf](https://www.heimanssensor.com/Datasheets/Overview-НТРА80x64d_Rev8.pdf), свободный. Загл. с экрана.
7. Raspberry Pi 3 Model B+ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>, свободный. Загл. с экрана.
8. LINUX library [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.labviewmakerhub.com/doku.php?id=libraries:linux:start>, свободный. Загл. с экрана.
9. Мойсюк Б.Н. Основы теории планирования эксперимента: учеб. пособие. М.: Издательство МЭИ, 2005. 464 с.
10. OpenIntro Statistics. Second Edition: D.M. Diez, C.D. Barr, M.C. Rundel. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.
11. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.

**Сведения об авторах**

**Пишнограев Роман Сергеевич** – канд. техн. наук, ведущий инженер сервисного центра ООО «ТЕХНОАП Инжиниринг», г. Магнитогорск. <https://orcid.org/0000-0001-8854-5723>. E-mail: R.Pishnograev@magtu.ru.

**Келехашвили Раймонд Роландович** – студент магистратуры, каф. электроники и микроэлектроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Келехашвили Ирина Сергеевна** – студентка магистратуры, каф. электроники и микроэлектроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

---



УДК 62-533.65:66.046.4.094.2

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ НА ВЫХОДЕ ОТДЕЛЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ

Шманёв Д.Е., Кокорин И.Д., Рябчикова Е.С., Рябчиков М.Ю.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В работе рассмотрена проблема обеспечения требуемой температуры полосы на выходе отделения закрытого охлаждения перед нанесением цинкового покрытия. Невыполнение требований по температуре полосы на выходе отделения закрытого охлаждения может привести к дефектам или росту энергетических затрат. В то же время проблемы управления охлаждением полосы в настоящее время изучены не так полно, как проблемы управления нагревом при рекристаллизационном отжиге. В работе приведена найденная зависимость вероятности получения дефектной продукции от температуры полосы, а также предложены модели, позволяющие реализовать управление температурой полосы.

**Ключевые слова:** стальная полоса, непрерывное горячее оцинкование, управление температурой, охлаждение стали, дефекты оцинковки.

### Введение

Развитие производства оцинкованной стальной полосы является одним из приоритетов современного металлургического производства [1]. При производстве стальной полосы с цинковым покрытием термическая обработка является необходимой частью технологического процесса на агрегате непрерывного горячего оцинкования (АНГЦ). Отжиг стали осуществляется в печах башенного типа, имеющих участки радиационного нагрева и охлаждения.

При температурной обработке температура металла в зависимости от группы стали изменяется от 720 до 840°C при нагреве, а при охлаждении перед ванной цинкования должна достигать 450–480°C. Основным технологическим параметром является температура стальной полосы, которая контролируется пирометрами на выходе из каждого технологического отделения.

Известно, что нарушение технологически заданных режимов нагрева может привести к возникновению дефектов полосы [2]. С учетом того, что управление нагревом позволяет также решать задачи энергосбережения, известно достаточно много публикаций, посвященных работе протяжных печей для рекристаллизационного отжига стали [3–5]. В то же время проблемы управления охлаждением обычно не рассматриваются авторами.

Согласно [4] одной из основных причин нарушения разрешенных пределов температуры полосы на выходе отделений нагрева и закрытого

охлаждения в обычных рабочих режимах является низкая эффективность управления в период изменения сортамента. В этот период через агрегат проходит сварной шов, соединяющий рулоны разного сортамента. Поскольку температурный режим в отделениях печи нельзя откорректировать быстро, то в период изменения сортамента скоростной и температурный режимы должны удовлетворять требованиям предыдущего и нового сортамента одновременно. Невыполнение этого условия может привести к возникновению дефектов или дополнительным энергетическим затратам.

Так, согласно [2] снижение температуры стальной полосы типового для ПАО «ММК» сортамента ниже 700°C существенно увеличивает вероятность получения полосы с дефектами. Напротив, избыточный нагрев приводит к необоснованному росту затрат топлива.

Применительно к задаче управления температурой стальной полосы на выходе отделения закрытого охлаждения следует учитывать, что далее полоса поступает в цинковую ванну, на поддержание температуры в которой также затрачивается энергия. Снижение температуры полосы ниже уровня 450 °C приводит к необоснованному росту затрат энергии на охлаждение и поддержание температуры в цинковой ванне в регламентированных пределах.

В то же время не следует забывать об основной цели охлаждения полосы – предотвращение ее окисления при выходе из отделения закрытого охлаждения. Можно предположить, что недостаточное охлаждение будет приводить к увеличению доли дефектной продукции, однако количе-

ственные оценки такой связи в настоящее время неизвестны. Получение такой зависимости позволяет обеспечить разумный компромисс между энергосбережением и долей дефектной продукции. При этом очевидно, что снизить долю дефектной продукции можно за счет упреждающего управления режимом охлаждения. Однако это требует создания модели для прогнозирования влияния режима охлаждения на температуру полосы на выходе из отделения.

### Отделение закрытого охлаждения как объект управления

Отделение закрытого охлаждения предназначено для охлаждения полосы до температуры, при которой окисление поверхности стали не получит значительного развития после выхода полосы из отделения. Для охлаждения полосы применяется защитный азотно-водородный газ, который охлаждается с применением холодильников.

Для циркуляции газа используются вентиляторы, которые высасывают защитный газ из секции. Управление работой отделения предусматривает воздействия на мощности, развиваемые вентиляторами.

Особенностью управления является отсутствие контроля температуры рабочего пространства в отделении закрытого охлаждения. То есть эффект от коррекции мощности можно оценить только по перепаду температур полосы на входе и выходе отделения.

### Результаты обработки экспериментальных данных по дефектам рулонов

Для оценки влияния температуры полосы на выходе отделения закрытого охлаждения на вероятность возникновения дефектов были сопоставлены температуры полосы для множества рулонов с дефектами и без них. База рулонов включала информацию по динамике изменения температуры полосы для 679 рулонов с дефектами и 8595 рулонов без дефектов. Для каждого из рулонов была определена максимальная температура полосы на выходе отделения закрытого охлаждения за все время обработки рулона. Далее с применением способа, предложенного в [2], была найдена зависимость вероятности получения дефектной продукции от температуры полосы на выходе отделения закрытого охлаждения.

Из зависимости на рис. 1 следует нелинейное влияние температуры полосы на вероятности получения дефектной продукции. При этом видно, что даже минимальное превышение порога в 480°C уже является нежелательным, так как влечет значимое увеличение вероятности последующего получения дефектов. Поэтому разработка

моделей для упреждающего управления является актуальной задачей.

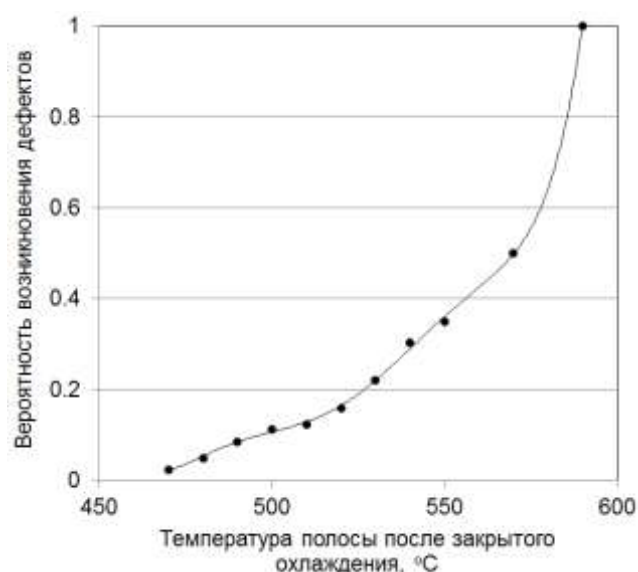


Рис. 1. Зависимость вероятности получения дефектной продукции от температуры полосы на выходе отделения закрытого охлаждения для условий АНГЦ №1 ПАО «ММК»

### Модели для упреждающего управления охлаждением

На температуру полосы после отделения охлаждения влияет как мощность, развиваемая вентиляторами, так и температура полосы на входе в отделение закрытого охлаждения.

Первоначально была предпринята попытка создания статистической модели для прогноза температуры полосы на выходе из отделения, входными переменными которой являлись: исходная температура полосы на входе в отделение; толщина полосы; скорость ее движения; мощность вентиляторов. Однако результаты показали отсутствие подобной однозначной зависимости.

Вследствие этого было решено применить способ [4] к настройке модели. В работе [4] рассматривалась проблема прогноза температуры стальной полосы на выходе отделения нагрева. Было показано, что целесообразно прогнозировать не саму температуру полосы, а ее изменение при смене сортамента. Это связано с тем, что точки контроля температуры в зонах отделения нагрева не в полной мере характеризуют действительное температурное состояние печи. Вследствие этого затруднительно объединить в одну выборку данные разных периодов работы печи. Переход к настройке модели на прогноз приращенной температуры полосы при изменении сортамента устраняет эту проблему.

Однако результаты создания статистической модели для прогноза изменения температуры по-

лосы на выходе отделения охлаждения по данным более чем пятисот переключений вновь показали отсутствие однозначной зависимости. Предполагаемой причиной является неконтролируемая вариация температуры рабочего пространства в отделении охлаждения.

В то же время температура рабочего пространства в отделении охлаждения не контролируется. Поэтому для упреждающего управления охлаждением было решено настроить две модели. Первая модель используется для получения оценки температуры рабочего пространства в отделении охлаждения. При этом используются данные о температуре полосы на входе и выходе отделения. Вторая модель настраивается на прогноз изменения температуры полосы на выходе из отделения при смене сортамента. При этом используется полученная на основе первой модели оценка температуры рабочего пространства. Причина наличия двух моделей требует пояснения.

Важным выводом работы [4] является то, что оптимальные настройки модели с одной и той же структурой на прогноз температуры полосы на выходе отделения нагрева и ее изменения при смене сортамента абсолютно различны. Причиной является то, что упрощенные модели приближенно описывают фактические особенности теплообмена. Учитывая опыт [4], было принято решение о связанной настройке двух моделей.

При выборе структуры моделей нужно учитывать, что взаимосвязанный поиск параметров настройки моделей при большом объеме экспериментальных данных и использовании явной схемы решения конечно-разностного уравнения теплообмена может потребовать чрезмерной вычислительной нагрузки. Поэтому для обеих моделей была принята одна и та же структура, основанная на уравнении теплообмена в конвективной форме:

$$\frac{dT_M}{d\tau} = a (T_{\Pi} - T_M), \quad a = \frac{\alpha}{h}, \quad (1)$$

где  $T_M$  – температура стальной полосы;  $T_{\Pi}$  – температура рабочего пространства;  $h$  – толщина полосы;  $\alpha$  – настраиваемый параметр.

Для дифференциального уравнения (1) можно получить решение и определить связь между переменными в аналитической форме. Для первой модели используется формула расчета температуры рабочего пространства по данным о температурах полосы на входе и выходе отделения:

$$T_{\Pi} = \frac{T_M(0) + T_M(\tau_H) + a_1 \tau_H T_M(\tau_H)}{a_1 \tau_H},$$

$$\tau_H = \frac{L}{v}, \quad a_1 = \frac{\alpha_1}{h}, \quad (2)$$

где  $T_M(0)$ ,  $T_M(\tau_H)$  – температура полосы на входе и выходе отделения;  $L$  – длина полосы в отделении закрытого охлаждения;  $v$  – скорость движения полосы.

Для второй модели получили формулу расчета температуры полосы на выходе из отделения при известной температуре рабочего пространства:

$$T_M = \frac{-T_M(0) - a_2 \tau_H T_{\Pi}}{a_2 \tau_H + 1}, \quad a_2 = \frac{\alpha_2}{h}. \quad (3)$$

Был выполнен связанный подбор параметров настройки  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  моделей по выборке, включающей информацию по более чем пятистам изменениям сортамента. В результате была достигнута достаточно высокая точность прогноза изменения температуры полосы на выходе отделения закрытого охлаждения при изменении сортамента. Средняя ошибка составила порядка  $5^{\circ}\text{C}$ , что является хорошим показателем, учитывая особенности формирования выборки. На рис. 2 показан пример фактических и спрогнозированных изменений температуры полосы на выходе отделения закрытого охлаждения при изменении сортамента.

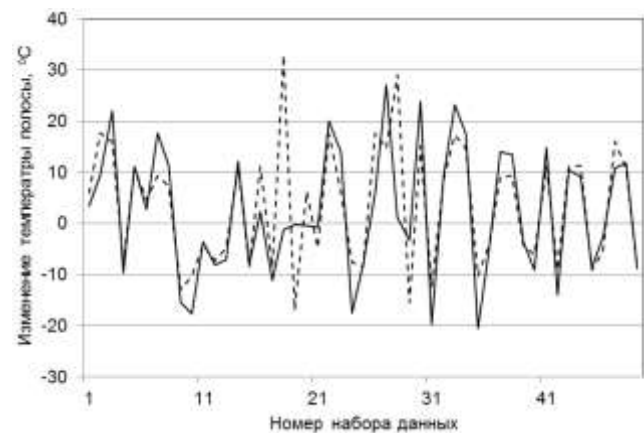


Рис. 2. Пример фактических и спрогнозированных (пунктирная линия) изменений температуры полосы на выходе отделения закрытого охлаждения при изменении сортамента

С учетом того, что модели прогнозируют не саму температуру, а ее изменение, был предложен алгоритм управления оценкой температуры, которую можно назвать виртуальным температурным состоянием отделения охлаждения. При разработке алгоритма было допущено существование моделей, которые прогнозируют температуру полосы на входе отделения закрытого охлаждения после изменения сортамента. Алгоритм включает ряд этапов: прогноз температуры полосы после

выдержки на входе в отделение закрытого охлаждения для нового сортамента; подбор такого значения оценки температуры рабочего пространства, при котором прогнозируемая температура полосы после смены сортамента будет соответствовать требованиям; стабилизация значения оценки температуры рабочего пространства на требуемом уровне путем воздействия на мощность вентиляторов.

### Заключение

В работе предложено решение задачи прогнозирующего управления мощностью вентиляторов путем стабилизации неконтролируемой переменной – оценки температуры рабочего пространства в отделении закрытого охлаждения АНГЦ. Обоснованность применения оценки температуры рабочего пространства доказана точностью прогноза контролируемой переменной – температуры полосы на выходе из отделения закрытого охлаждения. Предложенные модели позволяют минимизировать энергетические затраты, связанные с охлаждением стальной полосы и поддержанием тре-

буемой температуры в цинковой ванне, исходя из приемлемой доли дефектной продукции.

### Список литературы

1. Освоение производства высокопрочного проката для автомобилестроения в ОАО «ММК» / Никифоров Б.А., Салганик В.М., Денисов С.В., Стеканов П.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 4. С. 41-45.
2. Рябчиков М.Ю. Адаптация теплотехнических моделей протяжной башенной печи и нагрева металла для управления температурными режимами отжига стальной полосы // Проблемы управления. 2017. №5. С. 61-69.
3. Рябчиков М.Ю., Самарина И.Г. Изучение режимов нагрева стальной полосы в протяжной печи башенного типа для светлого отжига // Металлообработка. 2013. № 1 (73). С. 43-49.
4. Рябчиков М.Ю., Кокорин И.Д. Настройка модели отжига полосы в протяжных печах по данным в форме приращений // Динамика сложных систем – XXI век. 2019. № 3. С. 46–56
5. Исследование температурных режимов работы протяжных печей / В.А. Кривандин, В. Н. Аптерман, А. М. Беленький и др. // Сталь. 1999. № 3. С. 54-56.

### Сведения об авторах

**Шманев Данил Евгеньевич** – студент ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: shmanev98@mail.ru

**Кокорин Илья Дмитриевич** – студент ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: chickslover97@gmail.com

**Рябчикова Елена Сергеевна** – канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: mika.elena@mail.ru

**Рябчиков Михаил Юрьевич** – канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: mr\_mgn@mail.ru



УДК 539.3:669.46

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ СТАЛИ ПЕРЕД ПРОКАТКОЙ

Старкова Е.С., Иванова С.В., Варакина Е.А., Картавец С.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В промышленности расходуется около 60% всех топливно-энергетических ресурсов. С ростом спроса и повышения качества продукции предприятия стремятся к совершенствованию высокотемпературных процессов и установок, что приводит к повышению потребления топливно-энергетических ресурсов. В области металлургии имеется наиболее высокий потенциал энергосбережения, обеспечивающий основные объемы экономии за счет снижения удельных расходов на единицу энергоемкой продукции и сокращения потерь в распределительных электрических и тепловых сетях.

Целью работы являлось проведение энергетических исследований влияния применения термохимической регенерации топлива и влияния тепловых потерь через ограждения в высокотемпературных нагревательных печах перед прокаткой, на основные энергетические характеристики при совершенствовании теплотехнологической схемы нагревательных печей.

**Ключевые слова:** нагревательные печи, высокотемпературные процессы и установки, энергосбережение, термохимическая регенерация, конверсия природного газа, тепловые потери.

### 1. Способы энергосбережения и факторы, препятствующие энергосбережению

В ходе ускоренного развития научно-технического прогресса промышленные предприятия стремятся к повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов с использованием энергосберегающих технологий. Поскольку нагревательные печи являются одними из основных потребителей топлива в металлургии, то вопрос энергосбережения остается актуальным.

Существует несколько способов энергосбережения:

- усовершенствование процессов производства с утилизацией вторичных энергетических ресурсов;
- использование теплоты отходящих газов;
- уменьшение потерь тепла из рабочего пространства ВТПУ;
- химическая регенерация для экономии топлива в ВТПУ;
- применение современных изоляционных материалов с регенерацией теплового потока ВТПУ;
- применение безотходных технологий производства.

Исходя из множества мероприятий повышения энергоэффективности, есть и факторы, препятствующие энергосбережению [1]:

- затраты на энергию на единицу продукции остаются низкими;
- имеются наиболее выгодные капиталовложения, нежели вопросы энергосбережения;
- заинтересованность промышленности в удовлетворении потребностей, а не в оптимизации энергопотребления;
- существенный недостаток знаний в отношении энергосбережения.

Если энергоэффективность не будет улучшаться, то необходимо будет искать дополнительные источники энергии.

### 2. Энергосбережение в нагреве металла

Нагрев слэбов перед прокатом является важной технологической операцией, которая определяет качество выпускаемой продукции и энергоемкость процесса. Главной задачей процесса является получение равномерного температурного поля с заданными параметрами в слэбах при минимальных затратах энергетических ресурсов. Энергосбережение в этой системе достигается за счет снижения энергопотребления и повышения коэффициента использования топливно-энергетических ресурсов, которые возможны при условии внедрения новых технологий и технологического оборудования.

Удельный расход тепла в процессе нагрева составляет порядка 2 ГДж/т. Это около 10% от об-



щей энергоёмкости готовой продукции. При этом около 20 % подводимого тепла теряется с отходящими продуктами сгорания, что подтверждает существование значительного потенциала энергосбережения [2].

Конверсия природного газа становится все более актуальной в будущем, так как мировой энергетический рынок будет требовать более чистого топлива, более чистого производства топлива и лучшего использования больших, удаленных и еще не обнаруженных запасов газа в мире[3].

В результате процесса термохимической регенерации образуется вторичное топливо – синтез-газ, теплота сгорания которого (в расчете на единицу исходного топлива) выше теплоты сгорания исходного топлива (рис. 1) [4].

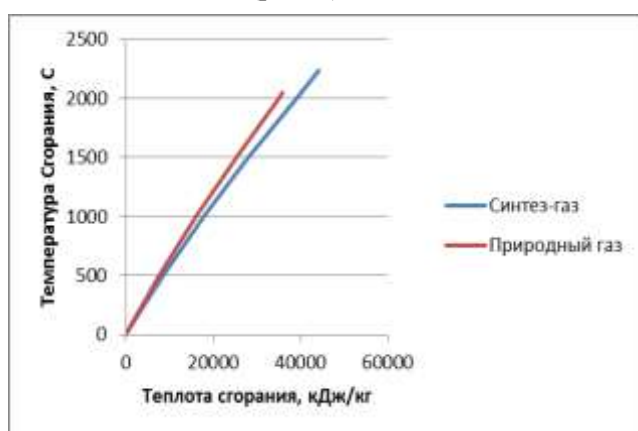


Рис. 1. Зависимость теплоты сгорания топлива от температуры

Основные энергетические характеристики конвертирования природного газа, связанные с увеличением количества энергии при сжигании продуктов конверсии и возрастания температуры получаемых продуктов сгорания, выполнены по известным термохимическим и теплофизическим данным и алгоритмам. Результаты расчётов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Энергетические характеристики конвертирования

Газ	$Q$ , кДж/м <sup>3</sup>	$T$ , °C
CH <sub>4</sub>	39748	2043
CO	12634,375	2370
H <sub>2</sub>	10796,429	2230
CO+3H <sub>2</sub>	45023,66	2450
2CO+2H <sub>2</sub>	46861,61	2273

Таким образом, использование технологии паровой конверсии природного газа позволяет увеличить количество энергии при сжигании на 13%, чем при сжигании метана, а также температуру, а использование углекислотной конверсии на 18%, что позволяет сократить расходы природного газа [5].

**2.1. Действующая схема нагрева металла в методической печи и ее основные характеристики**

ИМ (исходный материал) подается в тепло-технический реактор ТТР, в котором, с помощью горения топлива Т, ИМ подвергается воздействию высоких температур, в результате получается технологическая продукция ТП с  $t_{м.е.}$  1250 °C Уходящие газы УГ с  $t_{у.г.}$  1000 °C после ТТР попадают в рекуператор Р, в котором происходит нагрев воздуха ХВ с  $t_{о.с.}$  до температуры горячего воздуха ГВ с  $t_{г.в.}$  400 °C, для подачи в ТТР. Далее УГ с  $t_{у.г.}$  500 °C попадают в котел-утилизатор КУ, в котором происходит охлаждение УГ для дальнейшей утилизации с  $t_{у.г.}$  150 °C. В КУ за счет теплоты УГ из химически очищенной воды ХОВ  $t_{хов}$  30 °C производится ПАР. Затем УГ сбрасываются в атмосферу (рис. 2).

Недостатком использования данной схемы является высокий уровень тепловых потерь (около 30-33%) с отходящими продуктами сгорания. Соответственно, тепловой потенциал топлива используется не полностью.

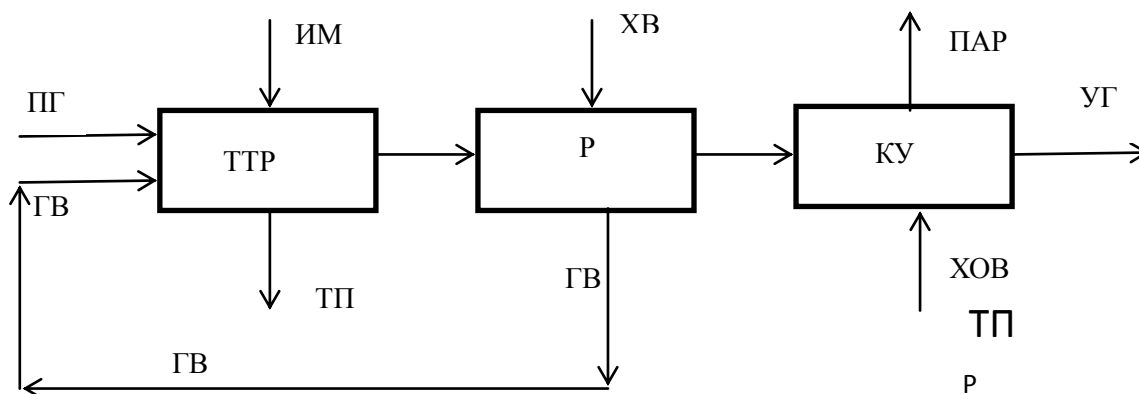


Рис. 2. Тепловая схема печи на основе термической рекуперации с использованием тепла отходящих дымовых газов

**2.2. Перспективная схема нагрева металла в методической печи**

В данной схеме топливо Т (природный газ) и низкопотенциальный пар с КУ смешиваются и подаются в подогреватель парогазовой смеси ППГС. Затем парогазовая смесь ПГС подается в реактор конверсии РК, в котором под действием теплоты отходящих дымовых газов протекает реакция термохимической регенерации тепла и образование вторичного топлива – синтез-газа СГ (рис. 3).

Преимуществами данной схемы является использование теплового потенциала отходящих дымовых газов, повышение теплоты сгорания топлива и, как следствие, экономия природного газа.

**3. Исследование влияния совершенствования схемы энергообеспечения высокотемпературных нагревательных печей на относительную величину потерь через ограждения**

Высокотемпературные процессы и установки позволяют добиться оптимального температурно-

го режима для интенсификации химических реакций, которые приводят к увеличению скорости процесса [6], но рассмотренные ВТПУ процессов Corex и Romelt проигрывают доменной теплотехнологии по топливно-энергетическим ресурсам.

В ходе исследования были рассмотрены 3 схемы наименее энергетически выгодных теплотехнологических процессов со своими усовершенствованиями по использованию вторичных энергоресурсов, в которых определялись относительные тепловые потери в окружающую среду без использования активной изоляции стенок ВТПУ (табл. 2), где:

- в схеме I в качестве топлива использовался природный газ (ПГ) с воздухом;
- в схеме II подводилось топливо ПГ с кислородом;
- в схеме III использовалось топливо ПГ с подогретым воздухом.

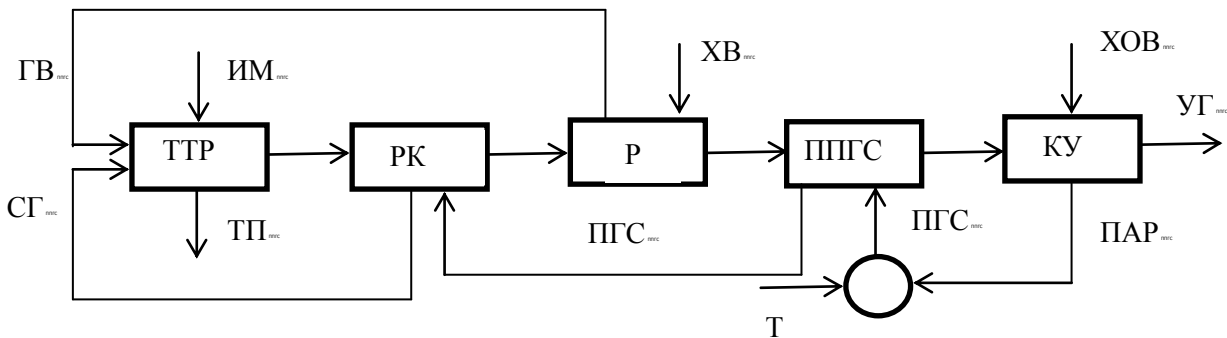


Рис. 3. Тепловая схема печи на основе термохимической регенерации паровой конверсии природного газа с использованием теплоты газовых отходов

Таблица 2

Схемы энергообеспечения высокотемпературных нагревательных печей

№	Схемы
I	
II	
III	

На основе теплового баланса (1) подводимая теплота топлива  $Q_n^p$  расходуется на теплоту технологического продукта  $Q_{тп}$ , на тепловые потери через стенки  $Q_{о.с.}$  (2) и на потери с отходящими газами  $Q_{о.г.}$  (ОГ) (3) [7]:

$$Q_n^p \cdot B = Q_{тп} + Q_{о.с.} + Q_{о.г.}; \quad (1)$$

$$Q_{о.г.} = V_{о.г.} \cdot C_{p_{о.г.}} \cdot t; \quad (2)$$

$$Q_{о.с.} = \left( c \cdot \varepsilon \cdot \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{\text{конв}} \cdot (t_{\text{расп}} - t_{\text{окр.ср.}}) \right) \cdot F; \quad (3)$$

где  $C_{p_{о.г.}}$  – теплоемкость отходящих газов, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $c = 5,67$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$\alpha_{\text{конв}}$  – теплоотдача абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$t_{\text{расп}}$  – температура расплава в ВТПУ, К.

В результате расчетов получено, что если рассматривать схему I, то расход ПГ на 1 м<sup>3</sup> расплава приходится 0,683 м<sup>3</sup>, при схеме II расход ПГ составит 0,115 м<sup>3</sup>, а при схеме III – 0,057 м<sup>3</sup>. Сокращение расхода топлива наблюдается при отборе теплоты отходящих газов на предварительный подогрев воздуха перед смешением с природным газом.

Но тепловые потери через стенки высокотемпературного теплотехнологического процесса остаются неизменными при постоянной температуре и увеличиваются в зависимости от повышения температуры расплава  $t = 1600\text{--}2000^\circ\text{C}$  и достигают 2,8–6,1 МДж/м<sup>2</sup> [8].

Таким образом, при совершенствовании схемы энергообеспечения высокотемпературных нагревательных печей относительные потери через ограждения, при равных условиях, только возрастают, и при снижении общего расхода энергии на процесс, и при повышении температуры высокотемпературных нагревательных печей.

Одним из способов снижения тепловых потерь через ограждения является применение пассивной теплоизоляции. Следует отметить, что при увеличении толщины изоляции с целью снижения теплового потока наблюдается зависимость температуры от толщины стенки реактора, представленная на рис. 4.

На графике видно, что с увеличением толщины изоляционного материала снижается температура стенки реактора.

Применяя изоляционные материалы с различными физико-химическими свойствами, снижается количество теплового потока через стенку в зависимости от теплопроводности и толщины изоляционного материала [9, 10].

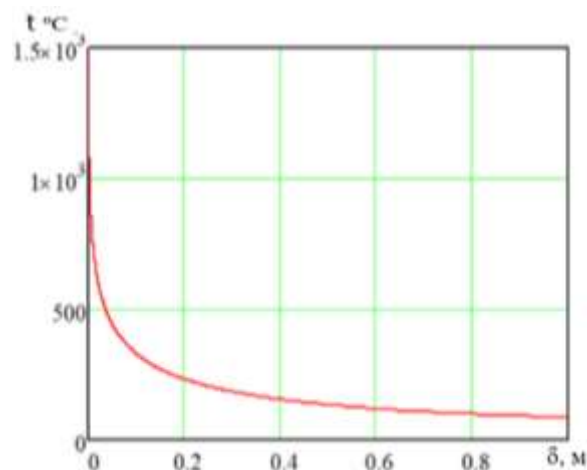


Рис. 4. Зависимость температуры от толщины стенки

Таким образом, применение пассивной изоляции требует увеличения габаритных размеров установки (толщина стенки более 1 м), в то время как активная изоляция позволяет значительно снизить тепловые потери и температуру стенки, при этом не изменяя габаритные размеры установки. В качестве активной изоляции используется пористая и перфорированная стенка с внутренним теплоиспользованием.

Исходя из этого, снижение тепловых потерь через стенки высокотемпературных нагревательных установок позволит дополнительно снизить расход топлива на теплотехнологический процесс с получением энергосберегающего эффекта, а применение регенеративного теплоиспользования типа перфорированного ограждения с подачей через него химически активных газов повысит эффективность высокотемпературного процесса [11, 12].

#### Список литературы

1. Чоджой М.Х. Энергосбережение в промышленности: пер. с англ. М.: Металлургия, 1982. 272 с.
2. Теплопередача: учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
3. Вафина Д.Э., Бикмухаметова К.М., Картавцев С.В. Влияние потерь теплоты через ограждения в высокотемпературных теплотехнологических процессах // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. 1032 с.
4. Ганул А.О., Мордовкин Д.С., Дождиков В.И. Анализ потенциала использования отходящих газов нагревательных печей // Бюллетень «Черная металлургия». 2017. №1. с. 92–94.
5. Margrete Hånes Wessenberg, Gas Heated Steam Reformer Modelling, Doctoral thesis for the degree of doktor ingeniør Trondheim, April 2006 Norwegian University of Science and Technology Faculty of Nat-

- ural Sciences and Technology Department of Chemical Engineering. 2006. – 210 с.
6. Попов С.К., Свистунов И.Н. Энергосбережение в топливных печах посредством конверсии природного газа // Вестник МЭИ. № 2. 2017. С. 45–54.
  7. Тазеев Н.Р., Шайхитдинова К.Х., Картавец С.В. Применение конверсии природного газа в энергетике // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 10–14 декабря 2018 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 1007–1010.
  8. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки / И.И. Перелетов, Л.А. Бровкин, Ю.И. Розенгарт и др; под ред. А.Д. Ключникова. М.: Энергоатомиздат. 1989. 336 с.
  9. Теплопередача: учебник для вузов [Текст] / Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
  10. Картавец С.В., Иванова С.В., Старкова Е.С. Оценка значения тепловых потерь в высокотемпературных процессах // Современные достижения университетских научных школ: сборник докладов национальной научной школы-конференции (26-27 декабря 2019 г., Магнитогорск). Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. Вып. 4. С.71–72.
  11. Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В. Вопросы энергоресурсосбережения при извлечении железа из руд: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 153 с.
  12. Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В., Сысуев Н.Е. Обоснование эффективности регенерации теплоты через перфорированные ограждения высокотемпературных установок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 1. С.86–89.

#### Сведения об авторах

**Старкова Екатерина Сергеевна** – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Иванова Светлана Владимировна** – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Вараксина Екатерина Андреевна** – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Картавец Сергей Владимирович** – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

УДК 629.423.1

## АНАЛИЗ ДИАГНОСТИКИ И ИСПЫТАНИЙ ПОДСТАНЦИЙ 110/10 кВ

Дубовик А.О., Газизова О.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Аннотация.** Диагностика электрооборудования позволяет, используя современные приборы, определять состояние оборудования, не прибегая для этого к его «глубокой» разборке. Благодаря своевременному проведению диагностирования можно контролировать степень надежности электрооборудования, уменьшая при этом расходы на его эксплуатацию и ремонт.

**Ключевые слова:** диагностика, приборы, надежность, дефект, поверхность, состояние изоляции, передвижная лаборатория, тепловизор, изолятор .

### Актуальность работы

Диагностика электрооборудования – это комплекс средств и методов, призванных определить техническое состояние и найти неисправности. После устранения неисправностей проводятся контрольные испытания в электротехнической лаборатории. Диагностика электрооборудования позволяет, используя современные приборы, определять состояние оборудования, не прибегая для этого к его «глубокой» разборке. Благодаря своевременному проведению диагностирования можно контролировать степень надежности электрооборудования, уменьшая при этом расходы на его эксплуатацию и ремонт. Использование современных средств диагностики оборудования позволит сократить число плановых осмотров оборудования и планово-предупредительных ремонтов. При этом повысится экономическая эффективность работы оборудования.

### Основные проблемы и решения

Диагностирование – это процесс определения технического состояния объекта или системы с определенной точностью, который может включать решение задач определения работоспособности, поиска дефектов и прогнозирования изменения состояния объекта диагностирования. Авария в каком-либо элементе энергосистемы может привести к полному или частичному прекращению подачи электроэнергии населению, промышленности, сельскому хозяйству, транспорту и т.д. В связи с этим все элементы энергосистемы должны обладать достаточной надежностью, а для этого необходимо диагностировать оборудование энергосистемы.

С точки зрения диагностики, в механизме развития таких дефектов различаются две стадии. На первой стадии происходит относительно медленное снижение изоляционных свойств вследствие увеличения проводимости, тангенса угла диэлектрических потерь масла  $\text{tg}\delta_m$ , появление в масле осадка и отложение его на поверхности остова и фарфора. На второй стадии возможно возникновение повышенных частичных разрядов в масле, развитие поверхностных ползущих разрядов по осадку. При этом при увеличении поверхностной проводимости измеренные по нормальной схеме значения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции  $\text{tg}\delta$  могут принять отрицательные значения, что связано с шунтирующим действием паразитной емкости и сопротивления между обкладками и проводящими загрязнениями (или даже науглероженными следами) на поверхности. Следует иметь в виду, что уменьшение измеренного значения  $\text{tg}\delta$  также может быть из-за увеличения проводимости наружной крышки фарфора вследствие ее загрязнения, увлажнения и т.д. Эта стадия отличается образованием больших концентраций горючих газов.

Другая относительно часто встречающаяся группа дефектов обусловлена емкостными разрядами (искрением) вследствие нарушения изоляции, нарушения контактов или обрыва измерительного вывода, проводников присоединения нулевой обкладки и т.д. Их появление связано с дефектами изготовления при сборке либо воздействия вибрации при транспортировке и эксплуатации. Возможны дефекты, развитие которых обусловлено наличием частичных разрядов в изоляционном остова. Частичные разряды в остова, превышающие нормированные значения, преимущественно имеют место на краях конденсаторных обкладок. Они возможны при нарушениях технологии изготовления остова или режимов ва-



куумной обработки и пропитки при сборке ввода, а также могут быть связаны с ухудшением свойств изоляции в процессе старения, который приводит к постепенному повышению уровня частичных разрядов. Повреждения, связанные с пробоем изоляционного остова при принятых технологических режимах и допустимых рабочих напряжениях, имели по аварийной статистике весьма малую вероятность появления.

Необходимость в оценке состояния наружных слоев изоляции вводов основана на соображении, что в случае увлажнения изоляционного остова наружные слои в первую очередь воспримут влагу и это позволит по значению  $\text{tg}\delta_3$  и динамике его изменения оценить их состояние. Увеличение  $\text{tg}\delta$  изоляции ввода происходит при увлажнении бумаги, загрязнении масла, появлении частичных разрядов. В частности, его значение увеличено при наличии металлической пыли, попавшей из дефектного сальфона.

Для измерения  $\text{tg}\delta$  и емкости используют схему моста Шеринга. В схеме, кроме испытуемой изоляции с емкостью  $C_x$ , находятся еще образцовый конденсатор (емкость  $C_0$ ) с очень малыми диэлектрическими потерями (газовая изоляция), регулируемое сопротивление  $R_2$  и регулируемый конденсатор (емкость  $C$ , и сопротивление  $R_1$ ). По мере регулирования сопротивления  $R_2$  и емкости конденсатора  $C$  удается получить равновесие моста, когда индикатор показывает нуль.

Величина  $\text{tg}\delta$  дает усредненную объемную характеристику состояния изоляции, поскольку активная составляющая тока, вызванная диэлектрическими потерями в местном дефекте, при измерении относится к общему емкостному току ввода. Как правило, измерение  $\text{tg}\delta$  позволяет обнаружить общее (т.е. охватывающее большую часть объема) ухудшение изоляции. Местные дефекты, т.е. дефекты, охватившие сравнительно небольшую часть объема изоляции, а также сосредоточенные дефекты, плохо обнаруживаются измерением  $\text{tg}\delta$ .

Измерение емкости изоляции, кроме информации об изменении структуры изоляции, вызвавшем изменение процессов поляризации, позволяет обнаружить и местные грубые дефекты (пробой части изоляции). Степень выявляемости дефектов также зависит от соотношения между объемами поврежденной и неповрежденной частей изоляции. Проанализировано состояние изоляции маслонаполненных вводов и вводов с твердой изоляцией, работающих в одинаковых условиях (рис. 1).

Вводы с RIP-изоляцией имеют меньшие затраты на эксплуатацию по сравнению с вводами с бумажно-масляной изоляцией. Вводы ГКВ явля-

ются более надежными, их установка является цесесообразной, что доказано расчетами, кроме того, при эксплуатации вводов с твердой изоляцией приводит к уменьшению количества вывода электрического оборудования из работы. В процессе опытного сравнения время простоя электрического оборудования уменьшилось на 170 часов в год [1].

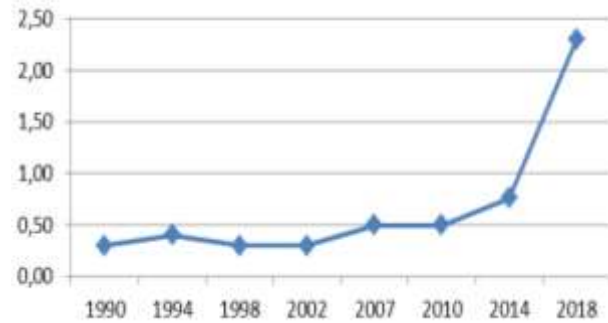


Рис. 1. Динамика изменения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции маслонаполненного ввода

Тепловизионная диагностика является одним из основных направлений развития системы технической диагностики, которая обеспечивает возможность контроля теплового состояния оборудования и сооружений без вывода их из работы, выявление дефектов на ранней стадии развития, сокращение затрат на техническое обследование за счет прогнозирования сроков и объема ремонтных работ. Такая диагностика объективна, информативна, экономична и очень удобна, так как диагностика объекта производится на расстоянии, без непосредственного контакта с объектом контроля, позволяет видеть и оценивать результат измерений в реальном времени и производить диагностику объектов с температурой от  $-40$  до  $+2000^\circ\text{C}$ .

Тепловизионное обследование — это диагностика объектов в инфракрасной области спектра с длиной волны 8-14 мкм, построение температурной карты поверхности, наблюдение динамики тепловых процессов и расчет тепловых потоков. Тепловизионная система (тепловизор) включает в себя переносной портативный сканер с высокочувствительной матрицей не менее  $320 \times 240$  пикселей, воспринимающий инфракрасное излучение от объектов, дисплейное устройство, обрабатывающее информацию и позволяющее видеть тепловое поле, оценивать температуру, осуществлять запись термограмм на электронные носители с целью их дальнейшей обработки, программное обеспечение для обработки полученных результатов. В стационарных условиях возможна многообразная обработка информации, в частности, запись, хранение, обработка, получение цветных

термограмм [2]. Тепловизор позволяет регистрировать температурное поле на поверхности любого объекта бесконтактным методом за счет излучения, а термограммы являются основой для анализа полученной информации по тепловому состоянию объекта. Температурные поля поверхностей обследуемых объектов получаются на экране тепловизора (и термограммах) в виде цветного изображения, градации цвета которого соответствуют различным температурам. Расчетами доказано, что затраты на аварийное восстановление электроснабжения превышают затраты на плановый тепловизионный контроль в течение 5 лет. Стоит заметить, что ввод 10 кВ имеет не самую высокую стоимость по сравнению с остальным оборудованием подстанции. Особое место занимает надежность электроснабжения, когда требуется обеспечить поставку заявленной потребителем электроэнергии в соответствии с договором электроснабжения при выполнении потребителем всех договорных технических условий и коммерческих обязательств, а также при соблюдении поставщиком установленных договорными отношениями с потребителем и магистральными электрическими сетями технических условий поставки в отношении качественных и количественных показателей надежности и качества поставляемой электроэнергии (мощности) [4]. В 2007 году благодаря появлению тепловизора Thermacam-P65 зафиксировано 90 аварийных тепловых дефектов, за 1 год в результате плановых ремонтов устранено 28 дефектов. На протяжении 5 лет удалось достичь минимум тепловых дефектов в количестве около 20 дефектов по ПО «МЭС», тем самым увеличив надежность электроснабжения, лавиную долю нагревов на подстанциях ПО «МЭС» занимают нагревы контактных соединений ячеек КРУН 10 кВ, это вызвано плановой расшивкой отходящих линий 10 кВ и образованием плохого

болтового соединения после монтажа шлейфа линии 10 кВ вследствие плохого оснащения инструментов, инвентаря, приспособления бригады службы подстанций. Второе место по количеству нагревов занимают контактные соединения разъединителей, в качестве контакта используются медные губки, которые поджимаются пружиной для лучшего контакта [3] (рис. 2).

Достаточно серьезной отраслевой проблемой остается относительно высокая повреждаемость фарфоровых опорно-стержневых изоляторов в составе разъединителей 35-110 кВ. Опыт эксплуатации показывает, что технологические нарушения, влекущие к разрушениям фарфоровых опорно-стержневых изоляторов, нередко приводят к серьезным последствиям: отключению системы шин подстанций, аварийному отключению подстанций, снижению нагрузки электростанции, а также создают угрозу персоналу энергопредприятий при выполнении переключений. Поэтому остается актуальной проблема определения механического состояния изоляторов (диагностика) [5]. Для реализации виброакустического контроля механического состояния фарфоровой опорно-стержневой изоляции и крышек маломалярных выключателей в НПО «Логотех» разработан и внедрен в эксплуатацию мобильный индикаторный комплекс МИК, который эксплуатируется с 2003 года в России и зарубежом. За время эксплуатации комплекса МИК на предприятиях, где специалисты диагностических служб освоили и активно применяют методику НПО «Логотех», установлен полный контроль механического состояния фарфоровой опорно-стержневой изоляции и исключены случаи аварийного разрушения изоляторов. Использование комплекса МИК позволяет в короткие сроки выполнять диагностику большого количества изоляторов без отключения рабочего напряжения (рис. 3).

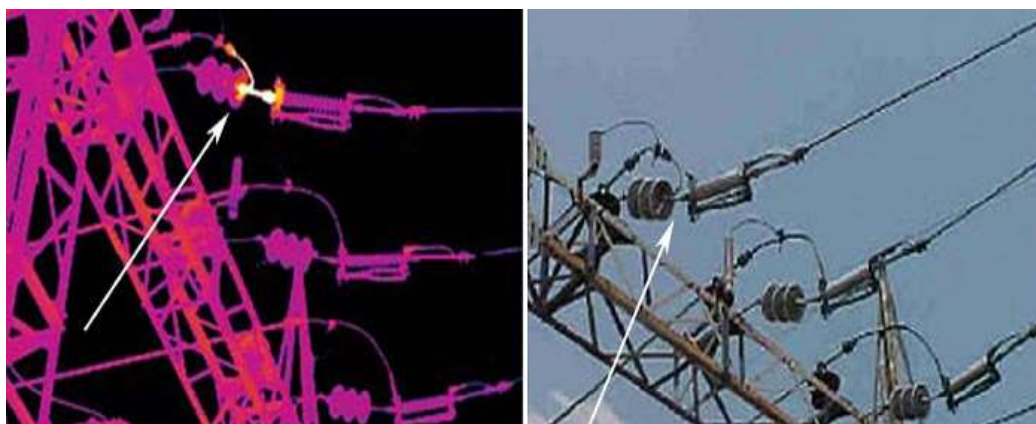


Рис. 2. Тепловизионное обследование воздушных линий электропередач

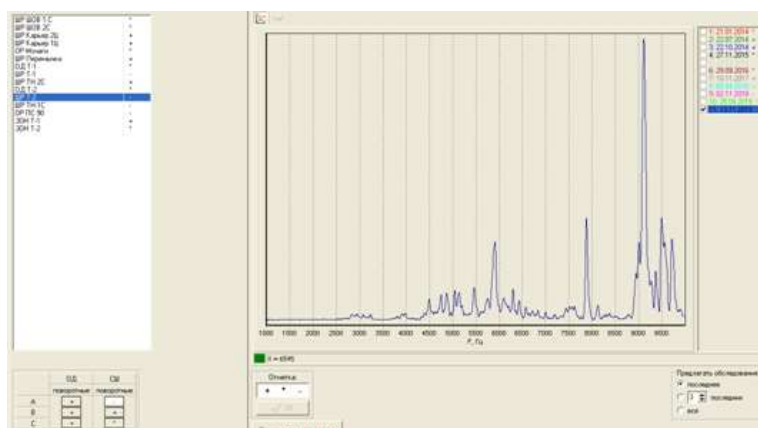


Рис. 3. Диаграмма поврежденного изолятора

Из рис. 3 заметим, что увеличение амплитуды волн в районе 9000, что соответствует наличию дефекта в верхней части поворотного изолятора фазы А со стороны системы шин, шинного разъединителя Т2 (ШР-Т2). Для колонки изоляторов характерно наложение «уникальных» частот каждого изолятора в колонке, что приводит к наличию нескольких пиков в диапазоне частот стоячей волны. При этом на оценке СПМ сложно точно идентифицировать соответствие какой-либо частоты спектра вибрации колонки изоляторов частотным характеристикам конкретного изолятора в этой колонке. Тем не менее наличие даже одного неисправного изолятора в колонке приводит к разрушению всей колонки изоляторов. Более точно локализовать дефект возможно после демонтажа и разборки колонки [6]. Мобильный индикаторный комплекс (МИК - 1) устанавливается на штангу оперативно-универсальную. При проведении измерений блок регистрации МИК - 1 прижимается щупами к фланцу изолятора. Колебания изолятора записываются в память блока регистрации. По окончании измерений результаты через USB-соединение переносятся на персональный компьютер, на котором установлено программное обеспечение для обработки сигнала. В качестве критериев, определяющих механическое состояние изоляторов, использованы: форма оценок спектральных плотностей мощности вибрации изолятора, наличие обертонов свидетельствует о том, что в изоляторе находятся повреждения (трещины, разрушения армировочных швов); частота первого пика оценки СПМ, определяющая жесткость изолятора (косвенная оценка площади трещин) [7].

#### Сведения об авторах

**Дубовик Анатолий Олегович** – магистрант каф. ЭПП, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: Dubo-anatolij@mail.ru

**Газизова Ольга Викторовна** – канд. техн. наук, доц., доц. каф. ЭПП, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. orcid.org/0000-0001-9416-672X. E-mail: logan\_b\_7@mail.ru

#### Выводы

Диагностическое обслуживание, основанное на прогнозировании, помогает обеспечить качество электроэнергии для конечного пользователя, повышая надежность работы подстанций. Диагностическое обслуживание обеспечивает повышение надежности посредством контроля состояния оборудования во времени с целью выявления состояния, указывающего на приближающийся отказ.

#### Список литературы

1. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования.
2. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Вып. согласно РД 153-34.0-20.363-99 «Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования».
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения: пер. с англ. / под ред. А.И. Горячева. М.: Мир, 1978. 416 с.
4. Вавилов В.П. Неразрушающий контроль: справочник. В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: Кн.1: Тепловой контроль. М.: Электроснабжение, 2004.
5. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
6. Кухтиков В.А., Воротницкий В.Э., Демин А.Н. Методы и средства контроля опорно-стержневой фарфоровой изоляции высоковольтных разъединителей // Энергетик. 2002. № 9.
7. Методические указания по эксплуатационному контролю механического состояния фарфоровых опорно-стержневых изоляторов разъединителей 110 кВ и выше и фарфоровых покрышек высоковольтных воздушных и масляных выключателей / Кухтиков В. А., Воротницкий В. Э., Демин А. Н., Шейкин А. А. Отчет, Шифр 316-8-064/4 от 05 апреля 2003 г.

УДК 621.311.25

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ РЕКЛОУЗЕРОВ В МАГИСТРАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 кВ

Ефимова В.А., Варганова А.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В данной работе проведено исследование по определению оптимального места размещения реклоузера в магистральных распределительных сетях 6-10 кВ по критерию минимума ущерба от перерыва электроснабжения. Основная задача применения реклоузера – надежность электроснабжения и отпуск электроэнергии потребителям в полном объеме. Разработанная методика ориентирована на определение места установки одного реклоузера в распределительных сетях 6-10 кВ с одним источником питания. При разработке методики использовались теория графов и методы матричной алгебры.

**Ключевые слова:** распределительные сети, реклоузер, децентрализованная автоматизация, ущерб от перерыва электроснабжения, надежность электроснабжения.

### Введение

Повышение надежности распределительных сетей 6-10 кВ при их реконструкции и техническом перевооружении с минимизацией затрат на осуществление этих мероприятий является одной из основных задач современной электроэнергетики. Одним из наиболее эффективных способов повышения надежности электроснабжения является реализация принципа децентрализованной автоматизации и локализации аварийных режимов работы в сети при помощи реклоузеров, представляющих собой совокупность вакуумного выключателя со встроенной системой измерения токов и напряжений и блока управления с микропроцессорной системой релейной защиты и автоматики.

Общий подход к выбору мест установки реклоузеров состоит из следующих основных этапов [1]: определение назначения установки реклоузеров; выбор варианта применения; выбор критерия оптимизации установки; оптимизация мест установки. В статьях [2, 3] рассмотрены методики оптимизации распределительных сетей на стадии проектирования, подходы к повышению эффективности определения места и вида повреждения, определены показатели для оптимального расположения реклоузеров. Авторами [4] разработан алгоритм, позволяющий уменьшить количество итераций при поиске оптимального по приоритетным критериям размещения средств повышения надежности в распределительных сетях 10 кВ. Приведены результаты исследований зависимости оптимальных решений по типу, ко-

личеству и схемам размещения устройств от параметров разветвленных как резервированных, так и нерезервированных электрических сетей. В работах [5-8] приведены методики выбора места расположения реклоузеров в распределительных сетях, рассчитаны показатели надежности и экономические эффекты, уменьшены коэффициенты *SAIDI*, *SAIFI* после внедрения оборудования в распределительную сеть.

Таким образом, основным экономическим эффектом от применения реклоузеров является снижение недоотпуска электроэнергии, возможность построить систему дистанционного управления сетью, значительное сокращение времени поиска и локализации повреждения, также выделение участка меньшей длины позволяет оптимизировать работу оперативного персонала и сократить в целом затраты на обслуживание линии.

### Методика определения оптимального места размещения реклоузеров в распределительных сетях 6-10 кВ

В данной работе предлагается методика определения оптимального места размещения одного реклоузера в распределительной сети 10 кВ с одним источником питания. Критерием оптимизации является минимум ущерба от перерыва электроснабжения. При разработке методики использовалась теория графов и методы матричной алгебры.

Порядок расчетов имеет следующую последовательность:

1. Составить направленный граф распределительной сети.



2. Определить значение отключаемой нагрузки  $P_i^{\wedge}$  при условии установки реклоузера на  $i$ -м участке сети и возникновении аварийной ситуации на данном участке сети по формуле:

$$P_i^{\wedge} = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

где  $P_i$  – значение нагрузки, которая отключится при аварийной ситуации;  
 $n$  – количество участков сети.

3. Определить параметр потока отказов  $\omega_i$  для каждого участка сети по формуле:

$$\omega_i = \omega_{oi} \cdot l_i, \quad (2)$$

где  $\omega_{oi}$  – параметр потока отказов для  $i$ -го участка сети (справочная величина), отказ/год;  
 $l_i$  – длина линии  $i$ -го участка сети, км.

4. Определить параметр потока отказов  $\omega_i^{\wedge}$  отключаемых участков сети при аварийной ситуации при условии установки реклоузера по формуле:

$$\omega_i^{\wedge} = \sum_{i=1}^n \omega_i, \quad (3)$$

где  $\omega_i$  – параметр потока отказов  $i$ -го участка сети (с учетом длины участка);  
 $n$  – количество участков сети.

5. Определить среднее число восстановления  $T_B$  для каждого участка сети (справочная величина).

6. Составить матрицу отключаемой нагрузки  $P^{\wedge}$  при аварийных ситуациях:

$$P^{\wedge} = \begin{pmatrix} P_1^{\wedge} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2^{\wedge} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3^{\wedge} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_n^{\wedge} \end{pmatrix}.$$

7. Составить матрицу  $\omega^{\wedge}$  отключаемых участков сети:

$$\omega^{\wedge} = \begin{pmatrix} \omega_1^{\wedge} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2^{\wedge} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3^{\wedge} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_n^{\wedge} \end{pmatrix}.$$

8. Составить матрицу  $T_B$ :

$$T_B = \begin{pmatrix} T_{B1} \\ T_{B2} \\ T_{B3} \\ \dots \\ T_{Bn} \end{pmatrix}.$$

9. Рассчитать ущерб от перерывов электро-снабжения по формуле:

$$Y = y_0 \cdot P^{\wedge} \cdot \omega^{\wedge} \cdot T_B, \quad (4)$$

где  $y_0$  – удельный ущерб от недоотпуска 1 кВт·ч электроэнергии, руб./кВт·ч;

$P^{\wedge}$  – значение нагрузки, которая отключится при аварийной ситуации, кВт;

$\omega^{\wedge}$  – параметр потока отказов  $i$ -го участка сети, отказ/год;

$T_B$  – среднее время восстановления системы, ч/отказ.

$$y = y_0 \cdot \begin{pmatrix} P_1^{\wedge} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2^{\wedge} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3^{\wedge} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_n^{\wedge} \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} \omega_1^{\wedge} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2^{\wedge} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3^{\wedge} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_n^{\wedge} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{B1} \\ T_{B2} \\ T_{B3} \\ \dots \\ T_{Bn} \end{pmatrix}$$

### Пример расчета

Определить место установки одного реклоузера в распределительной сети 10кВ (рис. 1) по критерию минимума ущерба от перерыва электро-снабжения, если:

– длина линии  $l_1 = 0,3$  км,  $l_2 = 0,5$  км,  $l_3 = 0,1$  км,  $l_4 = 0,3$  км,  $l_5 = 0,1$  км;

– мощность нагрузки  $P_1 = 400$  кВт,  $P_2 = 1000$  кВт,  $P_3 = 63$  кВт,  $P_4 = 250$  кВт,  $P_5 = 250$  кВт.

Составить направленный граф, пронумеровав узлы схемы, ветви и выбрав их направление (рис. 2).



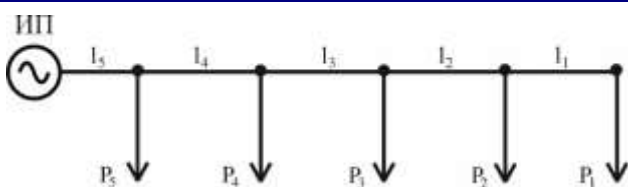


Рис. 1. Магистральная линия электропередачи с одним источником

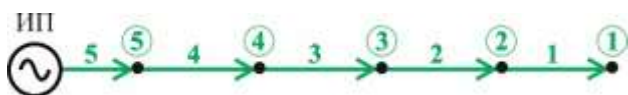


Рис. 2. Направленный граф

Определить значение отключаемой нагрузки  $P_i'$  при условии установки реклоузера на определенном участке сети и возникновении аварийной ситуации на данном участке сети. Исходя из рис. 2, определим ущербы (см. таблицу).

Определить параметр потока отказов  $\omega_i$  для каждого участка сети (параметр потока отказов ВЛ 10 кВ на железобетонных опорах  $\omega_0 = 0,076$  откл/год).

Определить параметр потока отказов  $\omega_i'$  отключаемых участков сети при аварийной ситуации при условии установки реклоузера (см. таблицу).

Результаты расчета оптимального места установки реклоузера

Расположение реклоузера	Отключаемая нагрузка $P_i'$ , кВт	Параметр потока отказов $\omega_i'$ , откл/год	Ущерб, руб./год
Участок 1	400	0,0228	129,82
Участок 2	1400	0,0608	1211,68
Участок 3	1463	0,0684	1424,49
Участок 4	1713	0,0912	2223,87
Нет реклоузера	1963	0,0988	2760,80

Среднее число восстановления ВЛ 10 кВ на железобетонных опорах  $T_{B1} = T_{B2} = T_{B3} = T_{B4} = T_{B5} = 0,5 \cdot 10^{-3}$  год/отказ = 4,38 ч/отказ.

Составить матрицу отключаемой нагрузки  $P'$  при аварийных ситуациях:

$$P' = \begin{pmatrix} P_1' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_4' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_5' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 400 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1400 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1463 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1713 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1963 \end{pmatrix}$$

Составить матрицу  $\omega'$  отключаемых участков сети:

$$\omega' = \begin{pmatrix} \omega_1' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_4' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_5' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0228 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0608 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0684 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0912 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0988 \end{pmatrix}$$

Составить матрицу  $T_B$ :

$$T_B = \begin{pmatrix} T_{B1} \\ T_{B2} \\ T_{B3} \\ T_{B4} \\ T_{B5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4,38 \\ 4,38 \\ 4,38 \\ 4,38 \\ 4,38 \end{pmatrix}$$

Рассчитать ущерб от перерывов электроснабжения:

$$Y = y_0 \cdot \begin{pmatrix} P_1' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_4' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_5' \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \omega_1' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_4' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_5' \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{B1} \\ T_{B2} \\ T_{B3} \\ T_{B4} \\ T_{B5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 129,82 \\ 1211,68 \\ 1424,49 \\ 2223,87 \\ 2760,80 \end{pmatrix}$$

Согласно расчетам оптимальным местом установки реклоузера в распределительной сети (см. рис. 1) является участок 4 по критерию минимума ущерба от перерыва электроснабжения.

### Заключение

Рассчитав ущербы от перерыва электроснабжения, можно сделать вывод о том, что данная методика адекватно применима к решению подобных задач для магистральных сетей с ответвлениями и без ответвлений с одним источником питания. Использование данной методики возможно как при проектировании новых систем электроснабжения, так и при реконструкции уже существующих.

### Список литературы

1. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Аспекты повышения надежности воздушных линий при установке реклоузеров // Проблемы, перспективы и направления инновационного развития науки. 2017. № 1. С. 33-39.
2. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Галюков В.С. Повышение эффективности сельских систем электроснабжения и оптимизация распределительных сетей // Интеграционные процессы мирового научно-технического развития. 2017. С. 152-156.
3. Никишин А.Ю., Беклемешев И.С. Применение реклоузеров в сетях ОАО «Янтарьэнерго» для решения проблем в распределительных сетях среднего напряжения // Известия КГТУ. 2017. № 44. С. 203-210.
4. Тимчук С.А., Сиротенко М.А. Алгоритм поиска оптимальных параметров системы повышения надежности в разветвленных распределительных сетях 10 кВ // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 7. С. 4-10.
5. Казакул А.А., Вылегжанин Е.Н., Скажутин В.В. Анализ устройств повышения надежности распределительных электрических сетей // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации. 2017. С. 63-69.
6. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Децентрализованное управление распределительными электрическими сетями 6-10 кВ АПК // Актуальные вопросы технических наук: теоретический и практический аспекты. 2017. С. 64-87.
7. Батуева Д.Е. Исследование интеллектуальных систем управления в распределительных сетях 10 кВ на основе реклоузеров ПСС-10 // Научный форум: технические и физико-математические науки. 2017. С. 181-196.
8. Карпов А.И., Акимов Д.А., Шепель Ю.И. Улучшение интегральных показателей надежности электроснабжения потребителей распределительных сетей на основе оптимизации расстановки реклоузеров // Электроэнергетика глазами молодежи. 2017. С. 254-257.

### Сведения об авторах

**Ефимова Валерия Артуровна** – студ.-магистрант, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: lera7\_92@mail.ru.

**Варганова Александра Владимировна** – канд. техн. наук, доц., каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru.

УДК 21.365.22 + 621.311.44 + 681.515.4 + 621.3.011.72

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СУММАРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ДУГ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СТАДИЙ ПЛАВКИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ануфриев А.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В рамках данного исследования приводится описание методики определения граничных значений в системе управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи (ДСП) с применением системы диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений электрических дуг. Основным преимуществом применения данной системы является возможность осуществления перехода с одного сочетания ступени печного трансформатора и номера рабочей кривой на другое в соответствии со значением параметра управления, имеющим наиболее тесную связь с реальными технологическими процессами, протекающими внутри ванны печи. При этом для работы системы отсутствует необходимость применения дополнительных дорогостоящих датчиков, эксплуатация которых нежелательна в агрессивных условиях электросталеплавильных цехов. Своевременная адаптация электрического режима к текущей стадии плавления шихты за счёт использования заявленных алгоритмов позволяет обеспечить повышение технико-экономических показателей работы электросталеплавильного комплекса путём снижения удельного расхода электроэнергии и времени работы под током.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, напряжения электрической дуги, диагностика стадии плавки, система управления электрическим режимом, чётные гармоники, нечётные гармоники.

### Введение

В настоящее время электрометаллургия является одним из наиболее приоритетных направлений развития металлургической отрасли промышленности. В подавляющем большинстве случаев при строительстве новых заводов, а также при реконструкции и развитии старых цехов наиболее крупные производители стали на отечественном и зарубежном рынке отдают предпочтение технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). При этом конструктивно применяются различные способы загрузки шихты в ванну печи: классический способ с загрузкой шихты через отводимый свод бадьей, непрерывная загрузка шихты конвейером, а также загрузка шихты, предварительно нагретой отводимыми газами до температуры около 600°C, через шахту.

Принято считать, что шахтные печи, равно как и печи с технологией непрерывной подвалки шихты конвейером, являются более экономичными в плане энергопотребления по сравнению с печами, на которых применяется классический способ загрузки. Несмотря на это, во всех трёх случаях энергопотребление является значительным и составляет наибольшую долю в общем энергетическом балансе сталеплавильного комплекса в целом.

В связи с этим в отечественных и зарубежных исследованиях наметилась устойчивая тенденция, направленная на разработку и внедрение энергоэффективных алгоритмов управления дуговыми сталеплавильными печами. Одним из способов повышения энергетической эффективности работы ДСП как электротехнического комплекса является внедрение новых алгоритмов диагностики стадии плавления шихты.

### Описание методики определения граничных значений

Основным параметром, определяющим текущую стадию плавления шихты, является тепловая постоянная времени электрической дуги  $\theta_{ARC}$  в составе дифференциального уравнения проводимости электрической дуги (уравнения Касси) [1]. При этом главная проблема заключается в том, что  $\theta_{ARC}$  нельзя измерить прямым путём, и для решения задач диагностики стадии плавки необходимо подобрать параметр, имеющий прямую физическую связь с параметром  $\theta_{ARC}$ .

В работах [2, 3] было обосновано, что чётные и нечётные гармоники тока и напряжения электрической дуги имеют разный характер изменения по ходу протекания плавки и имеют прямую физическую связь со стадией плавления шихты. Также определено, что параметры  $THD_U$  и  $THD_I$  в режимах, близких к обрыву дуги, характеризуют-

ся значительными всплесками, что осложняет их применение на практике. На основании этого было предложено использовать в системе диагностики стадии плавления шихты более стабильные показатели, такие как относительные действующие значения суммарных чётных и нечётных гармоник тока  $I'_{HG,EVEN}$ ,  $I'_{HG,ODD}$  и напряжения дуги  $U'_{HG,EVEN}$ ,  $U'_{HG,ODD}$  соответственно (чётные гармоники – в начале плавки, нечётные – в конце).

Результатом вышеприведённых исследований стала система диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам тока электрической дуги, которая также может работать с сигналом напряжения электрической дуги [4]. Основной задачей, которую необходимо решить перед внедрением данной системы в реальное производство, является методика определения предварительных граничных значений, на основании которых будет осуществляться переход с одной стадии плавления шихты на другую. Для решения поставленной задачи необходимо проанализировать характер изменения сигналов  $I'_{ARC,EVEN}$ ,  $I'_{ARC,ODD}$ ,  $U'_{ARC,EVEN}$ ,  $U'_{ARC,ODD}$  для отдельно взятой плавки (рис. 1). Алгоритм работы существующей системы управления электрическим режимом находит своё отражение в точках переключения, представленных в табл. 1.

Таблица 1

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

№ п/п	$N_{TR}$	$N_{OC}$	$t, c$	$I_{ARC,EVEN}$	$I_{ARC,ODD}$	$U_{ARC,EVEN}$	$U_{ARC,ODD}$	Критерий
Плавка ШП-125 (40 т чугуна, скрап без стружки)								
1	7	5	0	-	-	-	-	Начало плавки
2	9	5	91	10,64	7,19	10,55	16,33	$W_{уд}$
3	9	3	432	4,79	7,29	3,25	17,44	$\Delta T > \Delta T_{зад}$
4	9	5	610	1,01	2,71	1,13	11,00	$\Delta T < 0$
5	7	5	926	-	-	-	-	Подвалка, $W_{уд}$
6	9	5	1009	4,50	4,50	4,25	12,29	$W_{уд}$
7	8	4	1324	1,18	1,43	1,01	6,87	Закр. пальцев

Анализ работы существующего алгоритма на примере плавки, представленной на рис. 1, а также на примере выборки из плавки, проведённых при аналогичных начальных условиях, позволил выявить следующие недостатки в существующей системе управления электрическим режимом:

1. На начальной стадии плавления шихты переход с сочетания  $N_{TR}=7$ ,  $N_{OC}=5$  на сочетание  $N_{TR}=9$ ,  $N_{OC}=5$  по критерию  $W_{уд}$  может быть произведён несвоевременно ввиду того, что распределение лома уникально для каждой отдельно взятой плавки. Граничное значение  $W_{уд}$  в данном

случае является эмпирическим параметром, который на практике подбирается итерационным методом. Анализ большой выборки плавки показал, что если переход на повышенную ступень производится до окончания стадии активного расплавления, система впоследствии переходит на сочетание  $N_{TR}=9$ ,  $N_{OC}=3$  с пониженным излучением дуги в фазе «2» для компенсации излишней тепловой энергии, поглощённой водоохлаждаемыми панелями. В новой системе необходимость периодического понижения излучения в фазе «2» отсутствует ввиду того, что переходы с одного сочетания  $N_{TR}$  и  $N_{OC}$  производятся своевременно. Поэтому в новой настройке уставки для данного сочетания могут быть заменены альтернативными с учётом критерия выбора оптимального несимметричного режима работы [5].

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

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

Для устранения вышеприведённых недостатков предлагается внедрить альтернативную систему управления электрическим режимом, в основе которой лежит диагностика стадии плавления шихты по высшим гармоникам тока (напряжения электрической дуги). Анализ значительной выборки плавки позволил разработать новый алгоритм управления, блок-схема работы которого представлена на рис. 2. Точки переключения, соответствующие работе данного алгоритма (см. рис. 1), по аналогии с табл. 1 сведены в табл. 2.

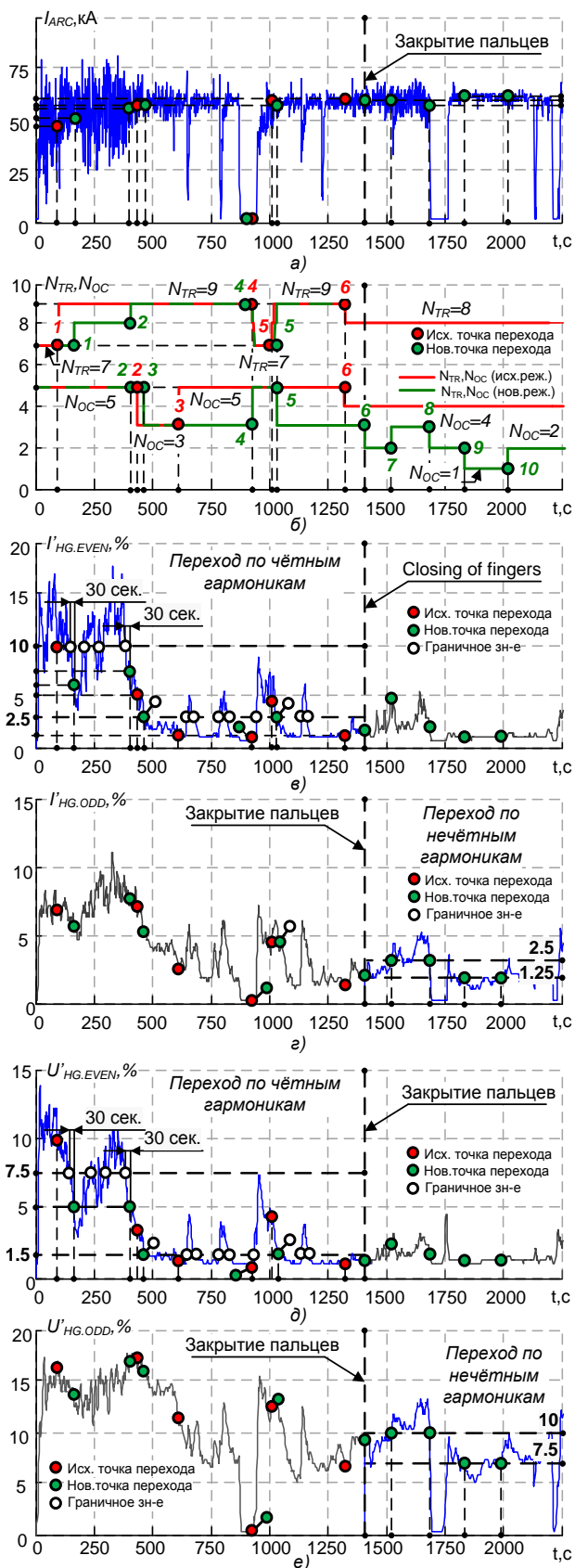


Рис. 1. Осциллограммы основных параметров для характерной плавки ШП-125 (40 т чугуна, скрап без стружки)

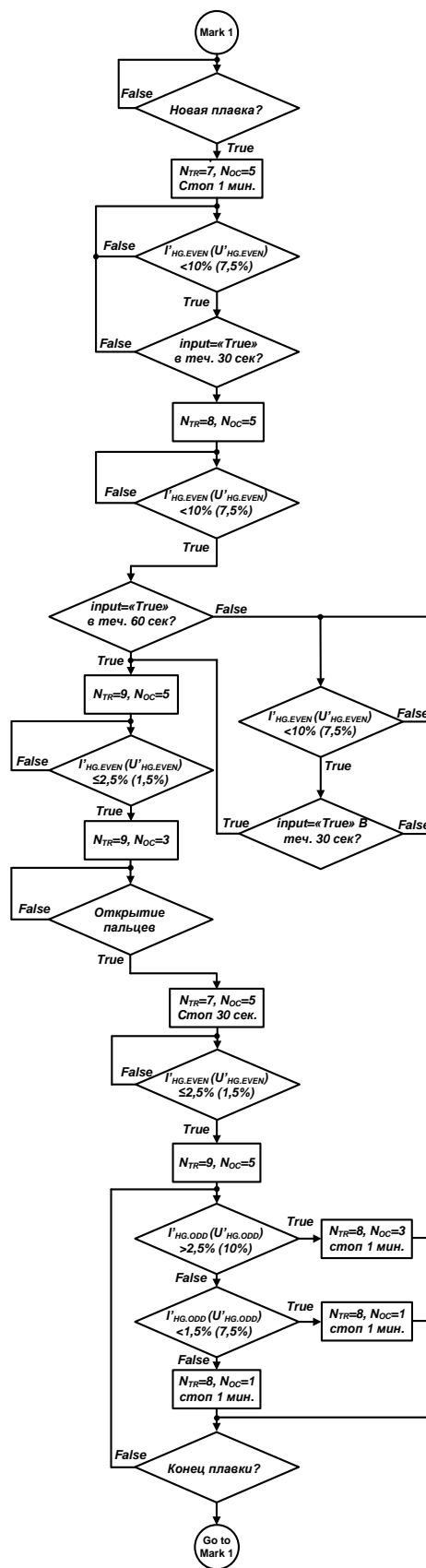


Рис. 2. Блок-схема алгоритма функционирования новой системы управления электрическим режимом ШП



Таблица 2

Точки перехода с одного сочетания  $N_{TR}$  и  $N_{OC}$  на другое при использовании системы управления с применением анализа гармонического состава сигнала тока (напряжения) дуги

№ П/П	$N_{TR}$	$N_{OC}$	$t, c$	$I_{ARC, EVEN}$	$I_{ARC, ODD}$	$U_{ARC, EVEN}$	$U_{ARC, ODD}$	Критерий
Плавка ШП-125 (40 т. чугуна, скрап без стружки)								
1	7	5	0	-	-	-	-	Начальные значения
2	8	5	134	6,21	6,17	5,04	13,87	Чётн. гармоники
3	9	5	394	7,12	7,52	5,08	16,91	Чётн. гармоники
4	9	3	463	2,5	5,12	1,5	15,9	Чётн. гармоники
5	7	5	926	-	-	-	-	Подвалка
6	9	3	1032	2,5	4,83	1,5	12,73	Чётн.гармоники
7	8	2	1391	1,27	1,31	1,38	9,82	Нечётн.гармоники
8	8	3	1523	4,98	2,5	1,89	10	Нечётн.гармоники
9	8	2	1687	1,73	2,5	1,7	10	Нечётн.гармоники
10	8	1	1798	1,62	1,25	1,43	7,5	Нечётн.гармоники
11	8	2	1994	1,64	1,25	1,41	7,5	Нечётн.гармоники

### Выводы

1. Разработан алгоритм переключения ступеней печного трансформатора и номера рабочей кривой, в основе которого лежит анализ гармонического состава сигналов тока (напряжения) электрической дуги. На базе результатов анализа большой выборки плавков определены граничные значения в 10% (7,5%) и 2,5% (1,5%) для регулирования по чётным гармоникам тока (напряжения) электрической дуги на начальной стадии плавления шихты. Аналогичные значения в 2,5% (10%) и 1,25% (7,5%) определены для регулирования по нечётным гармоникам тока (напряжения) на конечной стадии плавления.

2. Подтверждены результаты ранее проведённых исследований, направленных на анализ возможности применения сигналов относительного действующего значения суммарных чётных и нечётных гармоник тока электрической дуги. Обосновано, что как сигнал тока, так и сигнал напря-

жения дуги могут лежать в основе функционирования алгоритма. При этом основным преимуществом использования напряжения электрической дуги является более высокая стабильность анализируемых сигналов ввиду меньшей подверженности влиянию возмущающих воздействий. При этом важно отметить, что для расчёта мгновенного значения напряжения дуги зачастую требуется внедрение дополнительных вычислительных мощностей.

### Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Tulupova O.V. Melting stage diagnostic in different types of electric arc furnaces based on the analysis of the harmonic composition of the electric arc current // Proceedings of the 2019 8<sup>th</sup> International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO). Manama, Bahrain – 15-17 April 2019. pp. 1-6.
4. 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.
5. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. Assessing the feasibility of electrical mode control of ultra-high power arc steelmaking furnace based on data about harmonic composition of arc currents and voltages // Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Research and Education in Mechatronics REM-2015. Bochum, Germany. 18-20 November 2015. pp. 301-308.

### Сведения об авторах

**Николаев Александр Аркадьевич** – канд. техн. наук, доц., зав. каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. <http://orcid.org/0000-0001-5014-4852>. E-mail: alexniko@inbox.ru.

**Тулупов Платон Гарриевич** – аспирант каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: tulupov.pg@mail.ru.

**Ануфриев Антон Владимирович** – ведущий специалист, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск.

УДК 628.4.036

## ПЕРЕРАБОТКА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Волкова Е.А., Кузьмина Д.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Вместе с появлением новых товаров, технологий и открытых предприятий неизбежно возрастает уровень потребления. Все это ведет к увеличению отходов как бытового, так и промышленного потребления. Среди переработки отходов острой проблемой является переработка строительных отходов и материалов, остающихся после строительства, демонтажа или ремонта. При производстве строительных работ по возведению и сносу объектов образуется множество изделий, потерявшие потребительские свойства отправляются на свалки, закапываются в землю, складываются на полигонах, что чрезвычайно негативно влияет на окружающую среду и отнимает у промышленности высокий объём дорогостоящего материала, пригодного для вторичного использования.

**Ключевые слова:** рециклинг, отходы производства, управление отходами, вторичные материальные ресурсы, управление вторичными материальными ресурсами.

В древности рециклингом люди занимались постоянно. Обнесенные стеной города не могли устоять против стенобитных машин, и атаки воинов с их применением часто заканчивались разрушением части стены и города. История помнит полностью разрушенный и стертый с лица земли древний Карфаген. Его восстановили через несколько десятилетий. И сырьем для нового строительства были строительные материалы, взятые из городских развалин. Это был древний рециклинг.

Сегодня следы древнего рециклинга находят в швах плинфовой и кирпичной кладки средневековых зданий. В них известково-песчаный кладочный раствор розового оттенка – результат замешивания в смесь вместо песка мелко дробленных обломков, отходов и брака производства красного керамического кирпича древнего образца. Такой «кирпич» называли плинфа.

В послевоенном Берлине обломки разрушенных в войну зданий свезли в одно место и насыпали в огромный вал. Он был высотой метров 8–10 и длиной несколько сотен метров. Из него изымали потолочные швеллера, арматуру, водопроводные и канализационные трубы, электропроводку и куски металлических конструкций. Тут же стояли дробилки, которые измельчали кирпичные и бетонные глыбы. Дробленную смесь рассеивали на щебень и отсеивали до середины 1970-х. Щебень использовался на строительстве новых объектов столицы Германии. Это еще один наглядный пример классического рециклинга.

Развалины немецких городов в 1945–1950-х были источником десятков и сотен миллионов ке-

рамических кирпичей, полученных при ручной разборке зданий, не подлежащих восстановительному ремонту. Их использовали для восстановления городов и промышленных предприятий в разрушенной западной части СССР.

В 80-х годах прошлого века в СССР сбор и переработке подвергалась основная масса отходов, сформировав самостоятельный сегмент экономики страны. В советское время внимание к переработке железобетонного и бетонного строительного лома и отходов заводов железобетонных конструкций наиболее проявилось в конце 1970-х. Были начаты научные исследования и опытно-конструкторские работы по промышленной переработке строительных отходов и лома от сноса в полноценные вторичные строительные материалы. На выходе таких процессов получали бетонный щебень разных фракций, отсеив и песок. Предполагалось, что к 2010 году в соответствии с Комплексной программой научно-технического прогресса СССР уровень переработки большинства видов отходов приблизится к 100%, но в 90-е годы XX века созданные ранее инструменты государственной политики управления вторичными материальными ресурсами были уничтожены.

Россия значительно уступает развитым странам в управлении отходами. Эксперты настаивают на тщательном изучении и внедрении европейского опыта.

За рубежом, в особенности в Европе, вопросы управления отходами регулируются большим количеством специальных законодательных актов. Например, существуют специализированные нормативные документы, регулирующие вопросы обращения с упаковочными отходами, электронным

ломом, вышедшими из эксплуатации автомобилями, в том числе шинами, а также со строительными отходами. Помимо того, прямому законодательному регулированию подлежат вопросы размещения отходов на полигонах, а также их сжигания. Всего в Российской Федерации на полигонах захоронения и свалках находится около 80 млрд т строительных и промышленных отходов. К ним от промышленности добавляется каждый год еще почти 3,7–3,8 млрд т. Во вторичный оборот на переработку поступает около 10% этих объемов.

Принципиальное отличие нашего законодательства от европейского заключается в том, что в странах ЕС управляют отходами, законодательно установлены конкретные целевые показатели по обращению с конкретными отходами и сроки их достижения (у нас же абстрактные установки: «повышение», «улучшение» и т. д.).

Мировая индустрия рециклинга отходов активно развивается уже полвека, поэтому технологических проблем, препятствующих переработке отходов, практически не существует. Более того, технологии продолжают совершенствоваться, приводя к увеличению глубины переработки отходов, улучшению качества вторичных ресурсов и сокращению расходов на переработку.

Применению современных технологий в России мешает только отсутствие развитого рынка переработки отходов, а все проблемы, ограничивающие развитие, лежат в области госполитики, экономики и права. Для успешной реализации вторичной переработки отходов необходимо решить такие проблемы, как отсутствие государственной поддержки, плохая инфраструктура сферы обращения с отходами, отсутствие экономических стимулов для вовлечения отходов производства в повторное обращение.

На настоящее время ведущих специалистов, занимающихся вопросами рециклинга отходов в России, пришли к мнению, что для экологизации производства и строительства нужно создавать саморегулируемые организации, объединяющие компании, деятельность которых охватывала бы

полный цикл обращения с отходами: от сбора и переработки до производства продукции.

Экологическую составляющую процесса рециклинга переоценить невозможно. Это особенно касается строительных отходов. При использовании повторно огромного их количества для создания новых объектов нет необходимости добывать этот материал, тем самым нанося ущерб природным ресурсам. Например, вторичное применение на новых объектах деревянных конструкций и деталей сохраняет от вырубки лес.

Исходной точкой должна стать разработка стандартов и требований для отдельных этапов управления отходами, в частности для сбора и транспортировки, а также для технологий и глубины переработки. Однако существует много опасных видов отходов, управление которыми – прерогатива государства. В отношении же определенных направлений, где допустима самостоятельность, саморегулирование является возможным вариантом.

В первую очередь для разработки оптимальных стандартов необходимо выявить недостатки нормативно-правового обеспечения управления со строительными отходами.

#### Список литературы

1. Об отходах производства и потребления: Федеральный закон от 24 июня 1998 г. №89 (с изм. и доп.) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru>
2. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Ликвидация строительных отходов: Национальный стандарт Российской Федерации от 19 сен. 2017 г. ГОСТ Р 57678-2017 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru>
3. Разработка и применение норм и нормативов расхода материальных ресурсов в строительстве: Строительные нормы и правила от 20 июня 1995 г. СНиП 82-01-95 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru>
4. Бесплатная электронная Интернет-библиотека по всем областям знаний. – Режим доступа: <http://www.zipsites.ru/>
5. Российский федеральный образовательный портал. Режим доступа: <http://www.edu.ru/>

#### Сведения об авторах

**Волкова Елена Александровна** – канд. техн. наук, доц., каф. ПЭиБЖД, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: [valena.dom@rambler.ru](mailto:valena.dom@rambler.ru)

**Кузьмина Дарья Вячеславовна** – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: [kuzmina.dariy@yandex.ru](mailto:kuzmina.dariy@yandex.ru)

УДК 62.23

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО УРОВНЯ КАЧЕСТВА НА ПРИМЕРЕ НАРУЖНЫХ И ВНУТРЕННИХ РУЛЕВЫХ НАКОНЕЧНИКОВ АВТОМОБИЛЯ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЯ

Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А.

АО НПО «БелМаг», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Существенной проблемой для автомобилестроительной отрасли в России является отставание по срокам реализации проектов вследствие неэффективного планирования проекта и недостаточной оценки реальных возможностей предприятия соответствовать предъявляемым требованиям потребителей (глобальных автопроизводителей). Процесс проектирования изделия, как самый наукоемкий и ответственный процесс, как правило, не стандартизирован на предприятиях-поставщиках автомобильных компонентов. Отсутствие единого подхода к проектированию изделия оказывает прямое влияние на качество и сроки изготовления конечного продукта. В отсутствие полноценной системы проектирования высоки риски конструкторских ошибок, не происходит накопление знаний и опыта конструкторских подразделений, существуют риски срыва сроков проектирования. Для обеспечения независимости результативности и эффективности проектирования от конкретного сотрудника, исключения конструкторских ошибок и сокращения сроков проектирования в рамках предприятия АО НПО «БелМаг» разработаны обобщенные алгоритмы процесса проектирования наружных и внутренних рулевых наконечников, реализованные системой инструкций по разработке конструкции.

**Ключевые слова:** APQP, наружный рулевой наконечник, внутренний рулевой наконечник, процесс проектирования, стандартизация, обобщенный алгоритм, система инструкций по разработке конструкции.

Для отечественных предприятий-поставщиков автокомпонентов применение технологий управления проектами позволяет в среднем на 10–15% сократить затраты на реализацию проектов, тем самым повысив эффективность деятельности. На сегодняшний день процесс взаимодействия между предприятиями-поставщиками автомобильных компонентов и глобальными автопроизводителями регламентируется процедурой APQP [1, 6].

Перспективное планирование качества продукции (APQP – Advanced Product Quality Planning) – это система процедур и техник, которая используется для освоения нового продукта в промышленности [1], определения требований к поставщикам, начиная с исходной фазы планирования проекта вплоть до начала производства и заканчивая окончанием жизненного цикла продукта. Основной целью процедуры APQP является разработка плана качества нового продукта, который будет являться основополагающим при освоении данного продукта, что приведет к полному удовлетворению конечного потребителя [1-3].

Структурно процедура APQP состоит из пяти фаз. Все фазы направлены на единую конечную цель – достижение соответствия потребностям и

ожиданиям потребителей для серийно производимых автокомпонентов [1, 4, 5].

Процесс проектирования изделий продолжается вплоть до окончания фазы 2 процедуры APQP, когда происходит «заморозка» конструкции изделия. В рамках фазы 1 и 2 предложено стандартизировать процесс проектирования изделий посредством разработки обобщенного алгоритма в виде системы инструкций по разработке конструкции с целью:

- систематизации конструкторских компетенций (обеспечения снижения зависимости результативности и эффективности проектирования от опыта и квалификации конкретных сотрудников) за счёт документальной фиксации, хранения и управления связями конструктивных параметров с результатами испытаний и состоянием изделий в эксплуатации;
- минимизации вероятности возникновения конструкторских ошибок на этапе проектирования новых изделий за счёт использования стандартных, «проверенных» конструктивных решений;
- сокращения сроков проектирования новых изделий за счёт использования стандартных, «проверенных» конструктивных решений.



В рамках стандартизации процесса проектирования изделий решены следующие задачи:

- документирование и систематизация знаний о связи конструктивных параметров изделий с выполнением предъявляемых к ним требований и состоянием изделий в эксплуатации;
- стандартизация конструктивных решений, обеспечивающих соответствие предъявляемым требованиям.

Требования к разрабатываемой системе инструкций:

- возможность оперативного обновления инструкций;
- отражение связи закладываемых параметров (размеров и допусков, посадок, материалов, покрытий и т.п.) с результатами испытаний и техническим состоянием изделия в эксплуатации.

Система инструкций по разработке конструкции состоит из:

1. Инструкций I группы: описывают общую последовательность выбора параметров компонентов изделия при проектировании.

2. Инструкций II группы: содержат рекомендации по совместному выбору параметров компонентов, который призван обеспечить выполнение требований к изделию в сборе.

3. Инструкций III группы: содержат рекомендации по разработке рабочих чертежей компонентов, касающиеся простановки основных размеров и выбора их номинальных значений и допусков, указания допусков формы и расположения поверхностей, выбора шероховатости поверхностей, минимального состава и содержания технических требований, материала, минимального набора специальных характеристик.

Общий вид наружного рулевого наконечника представлен на рис. 1 и 2.

Обобщенные алгоритмы процесса проектирования наружного и внутреннего рулевых наконечников, представленные на рис. 3 и 4, представляют из себя последовательность выбора геометрических параметров, материалов, покрытий и других конструктивных решений, обеспечивающих выполнение изделием в сборе формализованных и ожидаемых требований потребителя. На базе указанных обобщенных алгоритмов разработана система инструкций по разработке конструкции.

Анализ исходных данных для разработки конструкции является первичным этапом процесса проектирования. Исходными данными от потребителя для проектирования изделия могут являться: запрос на предложение (RFQ), техническое задание, габаритный чертёж, перечень технических требований; технические условия, инженерные спецификации.



Рис. 1. Общий вид наружного рулевого наконечника:  
1 – корпус; 2 – палец шаровой; 3 – вкладыш;  
4 – обойма; 5 – чехол защитный; 6 – кольцо пружинное; 7 – кольцо уплотнительное;  
8 – колпак защитный



Рис. 2. Общий вид внутреннего рулевого наконечника:  
1 – корпус; 2 – палец шаровой; 3 – вкладыш;  
4 – кольцо опорное; 5 – колпак защитный

Формирование концепции изделия осуществляется, исходя из рекомендаций, изложенных в инструкции I группы (Алгоритм разработки конструкции). На основе анализа исходных данных для проектирования формируется концепция разрабатываемого изделия, то есть совокупность принципиальных конструктивных решений, необходимых для выполнения изделием в сборе формализованных и ожидаемых требований потребителя.



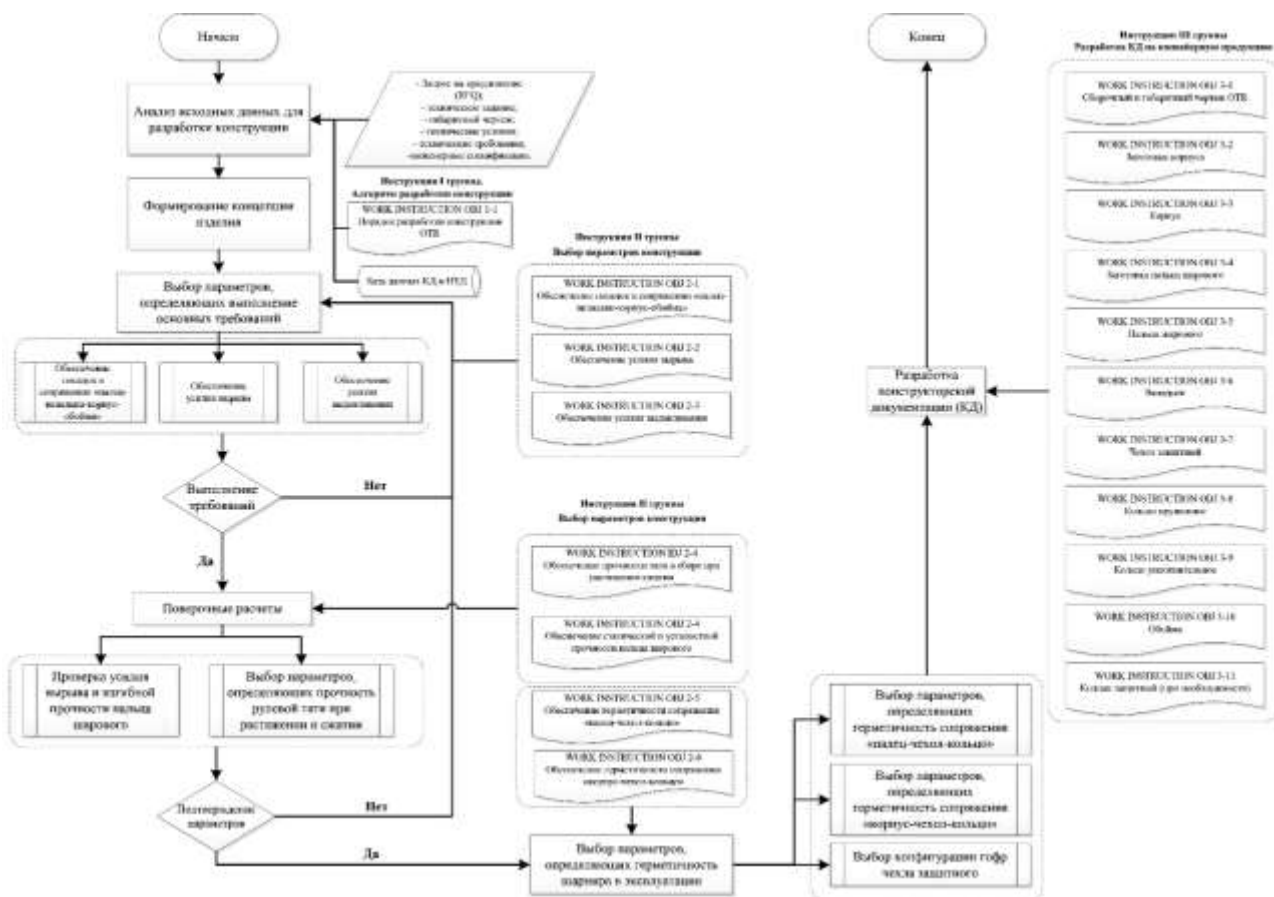


Рис. 3. Обобщенный алгоритм процесса проектирования наружного рулевого наконечника

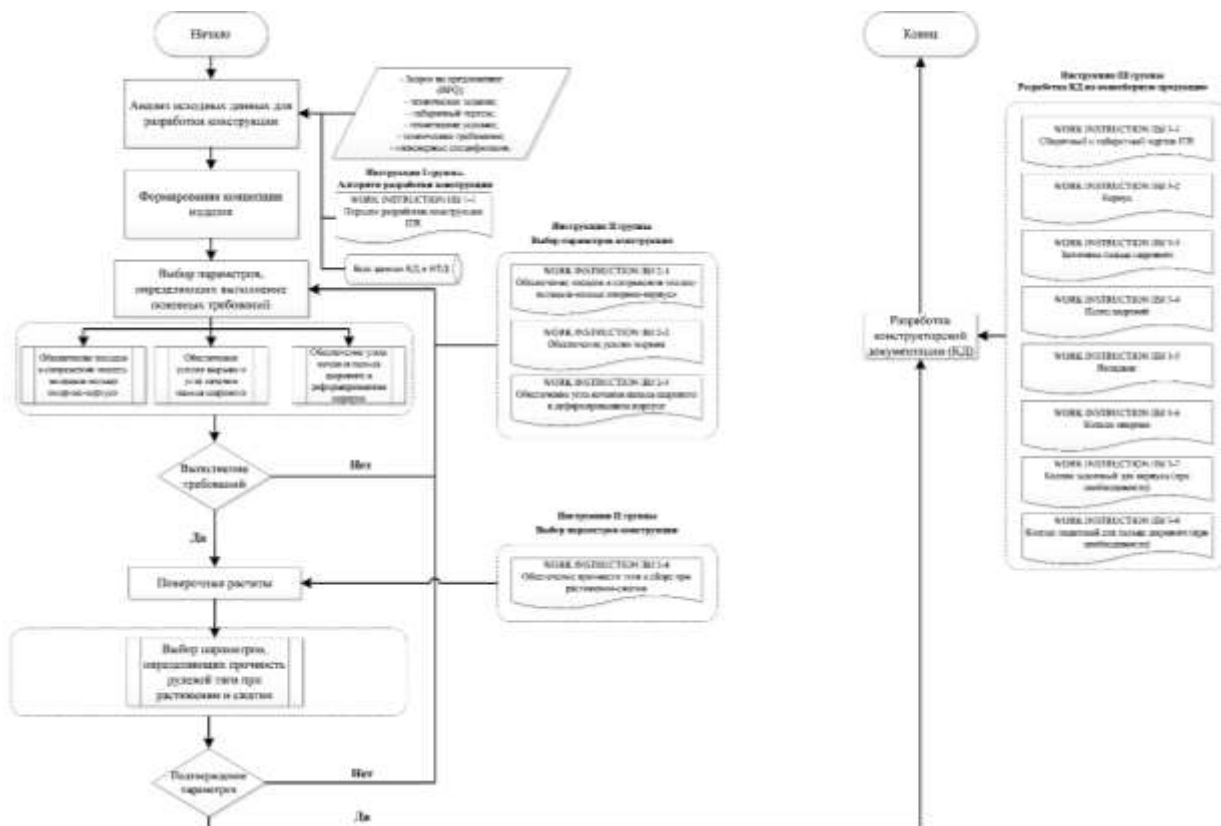


Рис. 4. Обобщенный алгоритм разработки процесса проектирования внутреннего рулевого наконечника

Следующим этапом после формирования концепции изделия является выбор параметров, определяющих выполнение основных требований, исходя из рекомендаций, изложенных в инструкции II группы (Выбор параметров конструкции). Под основными требованиями подразумеваются требования, регламентирующие прочность изделий и жесткость шарнирного соединения и являющиеся ключевыми характеристиками, влияющими на безопасность изделия при эксплуатации, а также на его функциональность и комфорт для конечного потребителя. Выбираются номинальные значения и допуски размеров, материалы вкладыша и опорного кольца (для внутреннего рулевого наконечника), определяющие обеспечение приемлемых посадок в шарнирных соединениях «палец-вкладыш-корпус-обойма» для наружного рулевого наконечника, в сопряжении «палец-вкладыш-опорное кольцо-корпус» для внутреннего рулевого наконечника.

Под приемлемыми посадками подразумевается соответствие готового изделия требованиям по моментам сопротивления качению и вращению пальца шарового в корпусе шарнира, размер зазоров в шарнире, размер жесткости шарнира. Для наружного рулевого наконечника выбираются номинальные значения и допуски размеров, материалы корпуса и пальца, определяющие усилие выдавливания пальца из корпуса, усилие вырыва пальца из корпуса и изгибную прочность пальца шарового. Для внутреннего рулевого наконечника выбираются номинальные значения размеров, материалы корпуса и пальца, определяющие усилие вырыва пальца из корпуса, угол качения пальца в деформированном в процессе опрессовки корпусе. Следует отметить, что наряду с обеспечением прочности изделий должно быть выполнено требование по обеспечению минимального угла качения пальца относительно корпуса.

После выбора параметров, определяющих выполнение основных требований, проводится проверка выполнения основных требований для ранее выбранных размеров и материалов одним из двух способов:

- в результате расчёта с использованием методов численного моделирования;
- в результате испытаний опытных образцов, изготовленных специально или полученных в результате доработки доступных аналогичных изделий.

В том случае, если результаты проверки показали несоответствие изделий основным требованиям потребителя, то выбранные в размеры и материалы должны быть пересмотрены, и проверка должна быть проведена повторно.

После выбора параметров, определяющих выполнение основных требований и их проверки с положительным результатом выбираются номинальные значения и допуски размеров, определяющих прочность рулевой тяги в сборе при растяжении и сжатии, исходя из рекомендаций, изложенных в инструкции II группы (Выбор параметров конструкции).

Требуемые параметры прочности рулевой тяги на сжатие и растяжения должны быть определены одним из двух способов:

- в результате расчёта с использованием методов численного моделирования процесса сжатия и растяжения рулевой тяги;
- в результате испытаний опытных образцов, изготовленных специально или полученных в результате доработки доступных аналогичных изделий.

В том случае, если результаты проверки показали несоответствие параметров требованиям потребителя, то выбранные размеры и материалы должны быть пересмотрены, и проверка должна быть проведена повторно для пересмотренных значений.

После выбора параметров, определяющих основные требования и их проверки с положительным результатом, выбираются номинальные значения и допуски размеров, а также конфигурация гофр защитного чехла наружного рулевого наконечника с целью обеспечения герметичности шарнира в сопряжениях чехла с пальцем и корпусом, исходя из рекомендаций, изложенных в инструкции II группы (Выбор параметров конструкции).

В заключение осуществляется разработка, утверждение и управление КД в соответствии с существующими методологическими инструкциями по качеству. Рекомендации по разработке КД, касающиеся простановки основных размеров, указания основных допусков формы и расположения поверхностей, выбора шероховатости поверхностей, минимального состава и содержания технических требований, материала, минимального набора специальных характеристик отражены в инструкциях III группы (Разработка КД на конвейерную продукцию).

### Вывод

Разработаны обобщенные алгоритмы процесса проектирования наружного и внутреннего рулевых наконечников в виде системы инструкций по разработке конструкции, состоящей из 3-х групп, и охватывающий весь процесс проектирования наружного рулевого наконечника, в том числе в составе тяги привода рулевого управления, начиная от получения исходных данных для разработ-

ки конструкции и оканчивая выпуском рабочей конструкторской документации (КД).

Разработанные обобщенные алгоритмы процесса проектирования наружного и внутреннего рулевых наконечников внедрены на предприятии-поставщике автомобильных компонентов АО НПО «БелМаг» в виде стандарта предприятия (системы инструкций по разработке конструкции), позволяющего систематизировать конструкторские компетенции, снизить вероятность возникновения конструкторских ошибок и значительно снизить сроки проектирования новых изделий.

Указанный стандарт предприятия служит базой для обучения вновь принятых сотрудников. Информация, содержащаяся в указанном стандарте, постоянно пополняется и обновляется, создавая кумулятивный эффект накопления компетенций сотрудников предприятия.

Данный подход может быть реализован не только на предприятии-поставщике автокомпонентов, он универсален для любой отрасли и, в конечном счете, позволяет повысить конкурентоспособность предприятия за счет снижения сроков проектирования и повышения качества продукции в целом.

#### Список литературы

1. Руководство по APQP – Крайслер Корпорейшн, Форд Мотор Кампани, Дженерал Моторс Корпорейшн, 1994. 95 с.
2. Перспективное планирование качества продукции (APQP) и план управления: пер. с англ. Н. Новгород: СМЦ «Приоритет», 2004. 117 с.
3. ГОСТ Р 51814.1–2004 (ИСО/ТУ 16949:2002). Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Особые требования по применению ГОСТ Р ИСО 9001–2001 в автомобильной промышленности и организациях, производящих соответствующие запасные части.
4. ГОСТ Р 51814.6-2005. Системы качества в автомобилестроении. Менеджмент качества при планировании, разработке и подготовке производства автомобильных компонентов.
5. ГОСТ Р 15.201-2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство.
6. Адлер Ю.П. Качество и рынок, или как организация настраивается на обеспечение требований потребителей – поставщик и потребитель / сост. И.В. Матвеева. М.: РИА «Стандарты и качество», 2000. С. 35-90.

#### Сведения об авторах

**Гун Игорь Геннадьевич** – д-р техн. наук, проф., генеральный директор АО НПО «БелМаг», г. Магнитогорск. E-mail: [tssa@mail.ru](mailto:tssa@mail.ru)

**Вахитов Александр Рафаельевич** – аспирант, главный конструктор АО НПО «БелМаг», г. Магнитогорск.

**Столяров Федор Алексеевич** – студент, инженер-конструктор АО НПО «БелМаг», г. Магнитогорск.

---

УДК 620.197.2

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РЖАВЧИНЫ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Медяник Н.Л., Пономарев А.П., Басков В.А., Кутасеевич П.С., Филаретов П.А.,  
Никитина А.Е., Голиков М.А.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В работе оценены защитные свойства поверхностных слоёв, которые сформированы на стальных пластинах, покрытых продуктами коррозии, преобразователями ржавчины различных производителей, по отношению к воздействию нейтрального соляного тумана. По результатам оценки защитных свойств поверхностных слоёв, исходя из степени поражения металла коррозией, установлено, что наименьшие показатели защиты – у преобразователя ржавчины «Fenom FN956» (ООО «Автохимпроект» (Россия)). Более высоким уровнем защиты характеризуется реагент «ASTROhim AC-469» (ООО «НПП Астрохим» (Россия)). Ещё лучше себя проявляет преобразователь «Hi-Gear HG5718» («Hi-Gear Products, Inc.» (США)). Наибольшую защиту от воздействия коррозионных агентов обеспечивает преобразователь ржавчины «NTF 1N» («Nano Tech Fam Giti» (Иран)).

**Ключевые слова:** преобразователь ржавчины, коррозия, соляной туман, степень поражения, оценка защитных свойств.

Защита металлопродукции от коррозии остаётся одной из ключевых задач металлообрабатывающей отрасли. Самым распространённым способом защиты является нанесение на поверхность металла покрытий, препятствующих его разрушению под действием коррозионных агентов окружающей среды. Технологии получения покрытий требуют предварительной очистки металлической поверхности от окислов и других загрязнений. Такую очистку обычно проводят либо путём механической обработки, либо с помощью растворов серной и соляной кислот. Применяемые способы очистки оказывают негативное влияние на здоровье обслуживающего персонала и экологическую обстановку. Альтернативой этим технологиям является использование преобразователей ржавчины, которые взаимодействуют с продуктами коррозии и создают на поверхности металла прочный защитный слой, пригодный для нанесения на него покрытий.

Преобразователи ржавчины по составу и действию на поверхность металла разделяют на четыре категории [1, 2]:

1) пропитки с ингибирующим эффектом: лакокрасочные материалы, которые содержат ингибиторы коррозии, а также поверхностно-активные вещества, способствующие повышению проникновения в продукты коррозии;

2) стабилизаторы продуктов коррозии: гало- и эларгодубильные кислоты растительного происхождения и модифицированные лигнины;

3) модификаторы ржавчины: основной компонент – ортофосфорная кислота;

4) грунт-преобразователи ржавчины: содержат плёнообразователи, ортофосфорную кислоту.

Преобразователи ржавчины наносят на поверхность металла различными способами: кистью, валиком, распылением, струйным обливом, окунанием. Выбор способа нанесения определяется вязкостью и консистенцией состава.

Наиболее широко преобразователи ржавчины используются в автомобильной промышленности для обработки кузовов транспортных средств и в строительной сфере при сооружении различных металлических конструкций, прокладке трубопроводов [3].

Цель работы – сравнительный анализ эффективности действия преобразователей ржавчины отечественного и зарубежного производства на показатели коррозии металлопродукции.

Объектами исследования являлись преобразователи ржавчины производства «Nano Tech Fam Giti» (Иран), ООО «НПП Астрохим» (Россия), ООО «Автохимпроект» (Россия), «Hi-Gear Products, Inc.» (США). Преобразователи, выбранные для исследования, занимают лидирующие позиции в рейтингах лучших преобразователей ржавчины [4].

По информации производителей, в состав преобразователя ржавчины «NTF 1N» («Nano Tech



Fam Giti») входят вода, дубильная кислота с добавлением наночастиц, модифицированная акриловая смола; реагент «ASTROhim AC-469 (с активными ионами цинка)» (ООО «НПП Астрохим») содержит воду (> 30 %), ортофосфорную кислоту (15-30 %), окись цинка (< 5 %), функциональные добавки (< 5 %); преобразователь «Fenom FN956» производства ООО «Автохимпроект» состоит из деминерализованной воды (> 30 %), смеси солей фосфорной кислоты железа и марганца (15-30 %); преобразователь ржавчины «Hi-Gear HG5718» («Hi-Gear Products, Inc.») имеет в своём составе кетоны, 2-бутоксизтанол, муравьиную кислоту, функциональные добавки.

Эффективность применения преобразователей ржавчины оценивали по результатам коррозионных испытаний при воздействии нейтрального соляного тумана по ГОСТ 9.308-85 [5]. Исследуемые преобразователи ржавчины были нанесены в соответствии с указаниями производителей на поверхности металлических пластин из низкоуглеродистой марки стали, покрытые продуктами коррозии. Пластины с нанесёнными преобразователями были размещены на специальных подставках и установлены в камере соляного тумана типа КСТ-0,4-015.

Образцы выдерживали в камере при температуре (35±2) °С и периодическом распылении раствора хлорида натрия концентрацией (50±5) г/дм<sup>3</sup> в течение 751 часа. Через каждые 40-50 часов образцы извлекали из камеры для контроля их состояния.

Обработку результатов испытания проводили по ГОСТ 9.908-85 [6] и ГОСТ 9.311-87 [7].

При поражении поверхности металлических пластин коррозией пятнами степень поражения G, %, вычисляли по формуле:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $S_i$  – площадь  $i$ -го пятна, м<sup>2</sup>;

$n$  – количество пятен;

$S$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Оценочный балл защитных свойств поверхностных слоёв устанавливали в зависимости от площади коррозионных поражений металла  $S_K$ , %, рассчитываемой по формуле:

$$S_K = \frac{\sum_{k=1}^n S_{Kk}}{S_{оцен.}} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $n$  – количество очагов коррозионных поражений;

$S_{Kk}$  – площадь одного  $k$ -го очага коррозионных поражений, см<sup>2</sup>;

$S_{оцен.}$  – площадь оцениваемой поверхности, см<sup>2</sup>.

Внешний вид образцов до и после коррозионных испытаний показан на рис. 1-4.



Рис. 1. Внешний вид образцов с преобразователем «NTF 1N»:

а – исходное состояние;  
б – состояние после 751 ч испытаний



Рис. 2. Внешний вид образцов с преобразователем «ASTROhim AC-469»:

а – исходное состояние;  
б – состояние после 751 ч испытаний

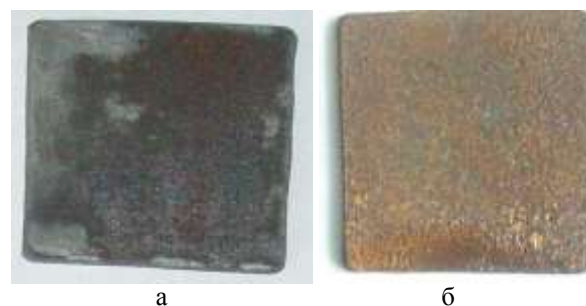


Рис. 3. Внешний вид образцов с преобразователем «Fenom FN956»:

а – исходное состояние;  
б – состояние после 751 ч испытаний



Рис. 4. Внешний вид образцов с преобразователем «Hi-Gear HG5718»:

а – исходное состояние;  
б – состояние после 751 ч испытаний



На всех образцах (за исключением одного из образцов с преобразователем ржавчины «NTF 1N») после 751 часа выдержки в камере соляного тумана обнаружены следы коррозии стали. Меньше всего очагов коррозионных поражений отмечено на поверхности пластин с преобразователем «NTF 1N». Поверхности образцов с преобразователями «ASTROhim AC-469» и «Fenom FN956» полностью покрыты продуктами коррозии. Необходимо отметить, что коррозия более интенсивно развивается в областях, близких к кромкам пластин, как наиболее дефектных зонах.

На рис. 5 показано, как изменяется степень поражения поверхности от времени коррозии. Для образцов с преобразователем «NTF 1N» характерно практически полное отсутствие очагов коррозии на протяжении первой трети испытаний и их развитие после 283 часов воздействия нейтрального соляного тумана. У пластин с преобразователями «ASTROhim AC-469» и «Hi-Gear HG5718» также наблюдается низкая скорость роста коррозионных поражений в начальный период времени и её постепенное увеличение в последующие периоды. Данный факт свидетельствует о препятствующем действии слоёв, сформированных на поверхности этих образцов соответствующими

преобразователями ржавчины. Более равномерно степень поражения коррозией возрастает у образцов с преобразователем «Fenom FN956», достигая 100 % после 526 часов испытаний.

Исходя из полученных результатов, были оценены защитные свойства поверхностных слоёв исследуемых преобразователей (таблица). Наиболее слабыми защитными свойствами обладают слои, полученные в результате воздействия преобразователя «Fenom FN956». Лучше себя проявляет преобразователь ржавчины «ASTROhim AC-469» (степень поражения поверхности металла коррозией, равная 100 %, при воздействии нейтрального соляного тумана достигается в случае применения этого преобразователя позднее по сравнению с преобразователем «Fenom FN956»). Ещё более стойкими к соляному туману являются слои, сформированные под действием преобразователя «Hi-Gear HG5718». Самые высокие показатели защиты от коррозии отмечены у преобразователя ржавчины «NTF 1N». Необходимо отметить, что преобразователи ржавчины на основе органических кислот в ходе коррозионных испытаний показали существенно более высокий уровень защиты по сравнению с преобразователями на основе ортофосфорной кислоты и её солей.

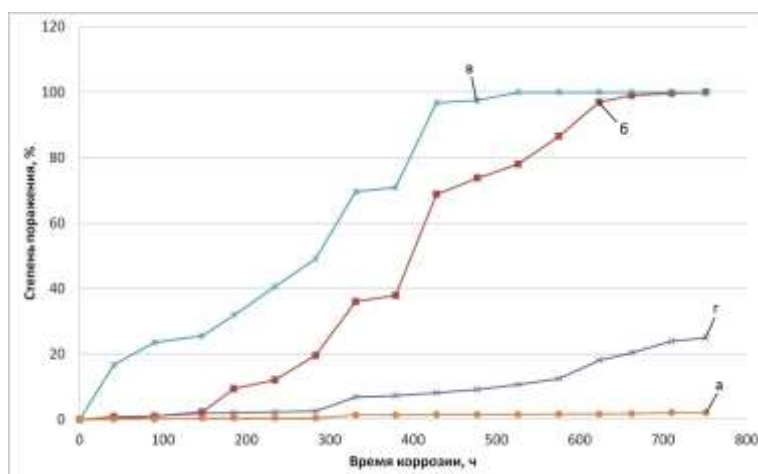


Рис. 5. Зависимости степени поражения поверхности образцов от времени коррозии:

- а – образцы с преобразователем «NTF 1N»;  
 б – образцы с преобразователем «ASTROhim AC-469»;  
 в – образцы с преобразователем «ASTROhim AC-469»;  
 г – образцы с преобразователем «Hi-Gear HG5718»

#### Результаты испытания в камере соляного тумана (751 ч)

Образцы с преобразователями	Вид коррозии	Вид коррозионного поражения	Степень поражения поверхности металла коррозией пятнами G, %	Площадь коррозионных поражений основного металла $S_K$ , %	Оценка защитных свойств поверхностных слоёв
«NTF 1N»	пятнами	«К»	2,08	2,1	A3 6
«ASTROhim AC-469»	пятнами	«К»	100,00	100,0	A3 1
«Fenom FN956»	пятнами	«К»	100,00	100,0	A3 1
«Hi-Gear HG5718»	пятнами	«К»	25,00	25,0	A3 3

**Список литературы**

1. Использование модификаторов ржавчины как метода преобразования продуктов коррозии на поверхности металлических изделий / Д.В. Балыбин, А.А. Костякова, Е.Д. Попова, Н.М. Кудрявцева // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 3. С. 903-907.
2. Раковская Е.Г., Кудряшова О.А. Улучшение условий труда путем применения модифицированного преобразователя ржавчины П-2 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. № 218. С. 223-233.
3. Анализ и выбор оптимальных средств подготовки поверхности металла перед окраской / А.Ш. Калмагамбетова, Р.М. Куркумбаева, А.О. Икишева, М.К. Дадиева // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 2-3. С. 362-363.
4. 5 лучших преобразователей ржавчины. URL: <https://www.expertcen.ru/article/ratings/luchshie-preobrazovateli-rzhavchiny.html> (дата обращения: 12.05.2020).
5. ГОСТ 9.308-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний. Взамен ГОСТ 9.012-73; введ. 1987-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1990. 21 с.
6. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. Введ. 1987-01-01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 17 с.
7. ГОСТ 9.311-87. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Метод оценки коррозионных поражений. Введ. 1988-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1987. 10 с.

**Сведения об авторах**

**Медяник Надежда Леонидовна** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. химии, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. ORCID ID 0000-0003-0973-8899. E-mail: chem@magtu.ru

**Пономарев Антон Павлович** – учебный мастер каф. химии, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. ORCID ID 0000-0003-3614-8405. E-mail: antonpon@mail.ru

**Басков Владислав Андреевич** – студент группы ТТПб-19, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Кутасеевич Полина Сергеевна** – студент группы ТТПб-19, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Филаретов Павел Алексеевич** – студент группы ТТПб-19, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Никитина Анна Евгеньевна** – студент группы ТТПб-19, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Голиков Максим Анатольевич** – студент группы ТТПб-19, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

УДК 664: 614.3

## РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Вайскрובה Е.С., Шагина Е.В., Михеева А.А.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Рассмотрены основные положения риск-ориентированного подхода и предложен алгоритм его реализации на предприятиях пищевой промышленности, который они могут использовать как основу для построения данного подхода в своей деятельности, что позволит управлять на предприятиях такими характеристиками, как качество и безопасность продукции, также рассмотрен риск-ориентированный подход в рамках контрольно-надзорных мероприятий на основе ранжирования предприятий по степени опасности.

**Ключевые слова:** качество, безопасность, риск, управление, риск-ориентированный подход, проверки, предприятия.

Актуальность проблемы качества и безопасности продуктов питания с каждым годом возрастает, поскольку на рынок вводятся продукты, полученные с использованием новых технологий и новых видов сырья. Нововведения в производстве пищевых продуктов и расширение их ассортимента приводят к формированию новых опасных факторов для здоровья человека. Для того чтобы питание продолжало оставаться важнейшим фактором сохранения здоровья населения страны, производители пищевых продуктов должны гарантировать её качество и безопасность.

Качество и безопасность пищевых продуктов становится все более глобальной и важной стратегической задачей, которая касается здоровья общества и оказывает огромное действие на экономику страны, ее место в мировом производстве и распределении.

Выделяют ряд причин, определяющих необходимость обеспечения, повышения качества и безопасности пищевой продукции:

- непрерывное и существенное количественное возрастание потребностей (личных, общественных, производственных), их качественное развитие и видоизменение;
- возрастание роли и темпов научно-технического прогресса в развитии науки, техники, производства, экономики;
- увеличение объемов производства продукции и, как следствие, возможный рост стоимости брака и рекламаций;
- усиление конкуренции на внутренних и мировых рынках.

В настоящее время особое внимание уделяется мероприятиям по повышению ответственности за объективность и эффективность контроля качества продуктов, которые, в свою очередь, гарантируют их безопасность для здоровья всего человечества.

В связи с этим нами предлагается в производственной практике применять риск-ориентированный подход в решении проблем качества и безопасности продуктов питания.

Основная задача риск-ориентированного подхода для предприятий состоит в увеличении вероятности достижения поставленных целей за счет контроля и снижения рисков.

Главным преимуществом риск-ориентированного подхода по сравнению с традиционным контролем, является его сосредоточенность на зонах повышенного риска, что позволяет вовремя принять превентивные меры, выявить и устранить слабые места и тем самым избежать негативных последствий реализации риска.

Своевременное выявление, анализ и принятие соответствующего решения о способе управления рисками дает возможность организации избежать кризисных ситуаций. Поэтому вопрос организации деятельности по управлению рисками является одним из наиболее важных и требующих особого внимания [1].

Риск-ориентированный подход опирается на несколько признаков:

1. Открытость – критерии оценки и классы риска открыты для подконтрольных лиц.
2. Законность – действие (бездействие) контролера основано на документально зафиксированной системе оценки рисков.

3. Гибкость – регулярная переоценка риска исходя из новых факторов и угроз.

4. Соразмерность – принимаемые контролером меры адекватны рассчитанному риску.

5. Распределение ресурсов – ресурсы распределяются не равномерно, а с учетом размера риска.

Базой риск-ориентированного подхода является оценка рисков, призванная обеспечить понимание контролером уязвимости к риску проверяемого объекта.

Для управления рисками на предприятиях в процессе производства продуктов питания предлагаем использовать следующий алгоритм:

1. Применить технологию структурирования функции качества (QFD-метод), которая позволит оперативно получить информацию о требованиях потребителей к ожидаемому качеству и безопасности новой продукции и перевести их на язык нормативных и технических требований.

2. Применить технологию квалиметрической оценки, которая позволит решать задачи, связанные с повышением качества и безопасности продукции.

3. Провести идентификацию рисков процесса производства продукции с использованием FMEA-анализа, которая позволит минимизировать негативные последствия, связанные с риском в производственной деятельности.

4. Ранжировать выявленные риски по степени их важности с помощью шкал оценивания и предложить меры управления этими рисками.

5. Провести анализ по системе ХАССП, позволяющий устранять и идентифицировать несоответствия по ходу технологического процесса.

Данный алгоритм могут использовать различные предприятия пищевой промышленности как основу для построения риск-ориентированного подхода в своей деятельности.

Риск-ориентированный подход в оценке процессов производства пищевой продукции принят и органами Роспотребнадзора.

Основная цель риск-ориентированного подхода – оптимальное использование трудовых, материальных и финансовых ресурсов, задействованных при осуществлении государственного контроля (надзора), снижение издержек контролируемых лиц и повышение результативности деятельности органов государственного контроля (надзора).

Методика оценки риска выпуска опасной пищевой продукции основывается на ранжировании предприятий в соответствии с критериями, позволяющими отнести организацию к определенной категории по группе риска для осуществления соответствующих контрольно-надзорных действий [1].

Категория риска присваивается расчетным путем по таким параметрам, как:

1. Оценка потенциального вреда населению при несоблюдении санитарных правил, размер предприятия (покрытие).

2. Количество нарушений санитарного законодательства за последние 3 года.

3. Наличие неудовлетворительных лабораторных исследований за последние 3 года.

4. Количество подтвердившихся жалоб за последние 3 года.

Разработан единый порядок классификации предприятий:

– Чрезвычайно высокий риск – плановая проверка проводится 1 раз в календарный год.

– Высокий риск – плановая проверка проводится 1 раз в 2 года.

– Значительный риск – плановая проверка проводится 1 раз в 3 года.

– Средний риск – плановая проверка проводится 1 раз в 4 года.

– Умеренный риск – плановая проверка проводится 1 раз в 6 лет.

– Низкий риск – плановые проверки не проводятся вообще [2].

Предприятия пищевой промышленности и общественного питания относятся к 3-му классу опасности, и проверки могут проводиться от одного раза в год до одного раза в три года.

Чтобы объект предприятия проверяли реже, т.е. один раз в три года, необходимо:

– отсутствие жалоб со стороны потребителей;

– отсутствие положительных лабораторных проб при плановых проверках;

– отсутствие предписаний по результатам плановых проверок;

– отсутствие случаев причинения вреда потребителям (отравлений);

– соблюдение санитарного законодательства.

Если на предприятии не соблюдаются требования санитарных правил и технических регламентов, были случаи отравления потребителей – проверки будут ежегодными.

Если же на протяжении нескольких лет предприятие обходится без нарушений при плановых проверках, то частота проверок может снижаться. То есть если объект проверяли ежегодно и в течение трех лет нарушений не выявлялось, то предприятие переводится в другую категорию риска и будет проверяться реже [3].

Таким образом, на сегодняшний день предприятиям пищевой промышленности и общественного питания выгодно соблюдать все требования санитарного законодательства и технические регламенты, следовательно, качество и безопасность пищевой продукции станут управляемыми характеристиками.

**Список литературы**

1. Матисон В.А., Арутюнова Н.И. Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности и качества продуктов питания // Пищевая промышленность. 2016. №5. С. 16-20.
2. Рудницкая В.В., Плискин О.В. Интеграция принципов ХАССП и риск-менеджмента для обеспечения безопасности и повышения качества сервиса в индустрии питания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2019. С. 95.
3. Глебова Е.В., Горьянова А.Р. Разработка модели интеграции риск-менеджмента в процесс обслуживания на предприятиях общественного питания // Научные труды Дальрыбвтуза. Т.48. №2. 2019. С. 41-46.

**Сведения об авторах**

**Вайскрובה Евгения Сергеевна** – канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. <https://orcid.org/0000-0003-2227-6844>. E-mail: v\_zhenya@mail.ru

**Шагина Екатерина Владимировна** – студентка группы ТСМп-18, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

**Михеева Анастасия Андреевна** – студентка группы ТСМп-18, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

---



УДК 664

**ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ, ПОВЫШАЮЩИХ АДАПТИВНЫЕ СПОСОБНОСТИ ОРГАНИЗМА ВО ВРЕМЯ СТРЕССА**

Зяблицева М.А., Додонова Н.А.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В статье проанализированы современные подходы к проектированию функциональных продуктов, повышающих адаптационные способности организма к стрессовым факторам. Авторами рассмотрены химический состав и свойства сырья растительного и животного происхождения, применяемого в производстве функциональных продуктов питания. Обоснованы подходы к технологиям переработки сырья с повышенной пищевой и биологической ценностью.

**Ключевые слова:** питание, стресс, функциональные продукты, биологически активные добавки, обогащенные продукты.

На протяжении всей истории человечество стремилось к созданию техники и технологий, облегчающих физические нагрузки и защищающих от неблагоприятного действия факторов окружающей среды.

В результате технического прогресса человек окружен уникальными техническими устройствами, обеспечивающими автоматизацию работы почти во всех сферах жизни человека. В связи с этим значительно снизилась физическая нагрузка на организм. Человек затрачивает меньше сил на выполнение рабочих обязанностей и повседневные дела.

При этом существенно возрастает негативное действие таких факторов, как неблагоприятная экологическая обстановка и психоэмоциональные перегрузки. Данные патогенные факторы являются стрессовыми для организма.

Стресс – это состояние, при котором человек испытывает напряжение, вызванное различными неблагоприятными воздействиями. Согласно общепринятой классификации выделяют физиологический, химический, биологический, психоэмоциональный виды стресса.

В состоянии стресса в организме нарушаются нормальные физиологические функции, биоритмы сна и бодрствования, суточные изменения уровня гормонов, ритмы дыхания, сердцебиения и проницаемости различных тканевых барьеров, снижается иммунитет, нарушаются гормональные функции.

Биологическая роль стресса заключается в мобилизации сил организма для преодоления неблагоприятного воздействия. Однако если воздействие неблагоприятных факторов сохраняется

длительное время, стресс переходит в хроническую форму.

При длительном воздействии стрессовых факторов наступает истощение организма, возникают нарушения в работе пищеварительной, эндокринной и сердечно-сосудистой систем.

Учеными доказано, что на способность организма преодолевать стрессовые состояния оказывает влияние питание. Установлено, что рацион современного человека не отвечает физиологическим потребностям организма. Питание характеризуется избытком потребления простых углеводов, насыщенных жиров и недостатком полноценного белка, витаминов, минеральных веществ и пищевых волокон [1]. Несбалансированное с точки зрения нутрициологии питание в том числе снижает адаптивные способности организма к стрессовым факторам [2].

В стрессовом состоянии организм синтезирует повышенное количество гормонов стресса, активизируется иммунная система. В результате чего увеличивается потребность организма в полноценном белке, кальции и цинке. При стрессе нарушается метаболизм и значительно возрастает потребность организма в витаминах группы В.

В результате перенапряжения увеличивается синтез свободных радикалов, при котором происходит запуск перекисного окисления липидов, нарушается пространственно-структурная целостность мембран и формируется оксидативный стресс [3].

В этих условиях требуется полноценное и сбалансированное питание для восполнения потребностей организма в биологически активных веществах. При этом многие продукты промышленного производства способны повышать чувствительность организма к стрессовым факторам. К числу продук-

тов, оказывающих неблагоприятное влияние на организм при стрессе, относят продукты «фаст-фуда», кондитерские изделия и снеки [1].

По мнению ученых, обеспечить потребности организма в необходимых питательных и биологически активных веществах только путем коррекции продуктового набора рациона невозможно.

В связи с этим актуальна разработка функциональных продуктов питания с антистрессовыми свойствами. Пищевые добавки и исходное сырье, используемое в рецептуре функциональных продуктов питания, должны быть разрешены и соответствовать ТР ТС 027/2012 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания», ТР ТС 021/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции». При этом технологические операции переработки сырья не должны снижать пищевой ценности и образовывать токсичные и другие нежелательные вещества.

Разработка рецептуры и технологии функциональных продуктов должна осуществляться с учетом медико-биологических аспектов. При создании функциональных продуктов, повышающих адаптивные способности организма, необходимо осуществлять подбор и научное обоснование видов сырья и его соотношение, которое должно обеспечить достижение прогнозируемых потребительских и технологических характеристик проектируемого продукта.

Функциональные продукты, оказывающие благоприятное воздействие на адаптивные способности организма, должны содержать следующие компоненты:

- полноценные белки со сбалансированным аминокислотным составом;
- минеральные вещества (Fe, Mn, Cu, Zn, K, Mg, P) в оптимальном соотношении;
- комплекс витаминов природного происхождения;
- полисахариды;
- пробиотики.

Создание продукта, содержащего все вышеуказанные компоненты в идеальном соотношении, возможно путем технологии комбинированного использования сырья различного происхождения.

В периоды острого стресса значительно возрастает потребность организма в белке. Широкое применение в качестве белковой основы для производства функциональных продуктов нашли продукты переработки молока.

Так, белки молочной сыворотки представлены на 65% бета-лактальбумином, на 25% – альфа-

лактальбумином и на 8% – альбумином сыворотки крови. Аминокислотный состав сыворотки близок к составу идеального белка, поскольку содержит все незаменимые аминокислоты.

На основе сыворотки разработан перечень функциональных продуктов. Так, например, ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет» создал способ производства сухой смеси безалкогольных напитков, обладающих повышенной биологической ценностью. Смесь состоит из сыворотки подсырной, молочного белка, порошка грибов майтаке и рейши, порошка спирулины, какао-пудры, фруктозы и глюкозы [1].

Кроме того, источником легкоусвояемых белков является рыба и морепродукты, также богатые минеральными веществами. На основе мяса рыб разработаны продукты для питания в экстремальных условиях [5, 6].

Положительное влияние на организм в стрессовом состоянии оказывают растительные экстракты. Так, экстракт корня солодки был использован для придания функциональных свойств хлебобулочным изделиям (кексы, печенье), ликероводочным изделиям (ликер), молочным продуктам (молочный коктейль, йогурт), кондитерским изделиям (мармелад) [4].

Также широкое применение при производстве функциональных продуктов нашли экстракты элеутерококка, чаги, чечевицы, лиственницы [2]. Восстановлению потребностей организма в витаминах группы В способствуют функциональные продукты с пивными дрожжами.

В качестве функционального продукта, повышающего пищевую и биологическую ценность продуктов питания, используют водоросли. Так, спирулина содержит 70 % белка со сбалансированным аминокислотным составом.

В химический состав спирулины входят сульфоллипиды, которые обладают иммуномодулирующими свойствами. Кроме того, спирулина богата минеральными веществами, такими как калий, кальций, цинк, магний, фосфор, селен, медь и витаминами группы В.

Широкое применение в качестве источника витаминов и микро-, макроэлементов нашли продукты пчеловодства, такие как мед, прополис, перга [1].

Особенность технологии производства функциональных продуктов – это наличие стадии внесения функционального ингредиента, в качестве которого используется растительное и животное сырье, витаминно-минеральные добавки. В настоящее время функциональные продукты вырабатываются по технологиям с щадящими температурно-временными режимами, что позволяет обеспечить высокое содержание биологически ак-

тивных веществ в готовом продукте. Одними из наиболее перспективных методов переработки сырья являются сублимационная сушка, экстрагирование, термопластическая экструзия.

Важен способ введения функционального ингредиента. Добавки могут вводиться в виде раствора, геля, суспензии, белково-жировой эмульсии, в гидратированном виде, в сухом виде. Указанные технологические приемы позволяют сохранить биологически активные вещества сырья в нативном состоянии.

Таким образом, в современном обществе стресс является неотъемлемой составляющей повседневной жизни, поэтому перспективным решением является введение в ежедневный рацион функциональных продуктов питания, предназначенных для снижения воздействия стрессовых факторов на организм человека.

#### Список литературы

1. Васнева И.К., Бакуменко О.Е. Здоровое питание в борьбе со стрессом в современной жизни студентов // Пищевая промышленность. 2009. №7. С. 50-51.
2. Васнева И.К., Бакуменко О.Е. Чечевица – сырье для производства продуктов антистрессовой направленности // Пищевая промышленность. №8. 2010. С. 20-22.
3. Иванова Д.А., Калинина И.В., Михайлова А.П. Оценка антистрессового эффекта функциональных продуктов питания, обогащенных веществами с антиоксидантным и микробиологическим действием // Вестник ЮУрГУ. Серия «Психология». 2018. Т.11. №4. С.48-60.
4. Коновалов А.В., Малюкова М.А. Производство функциональных продуктов питания на основе экстракта корня солодки // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2014. № 6. С. 37-40.
5. Пат. на изобретение RU 2463800. Сухой специализированный белково-углеводный продукт для питания спортсменов / авторы и патентообладатели: Токаев Э.С., Бастриков И.А. № 2009135307/10, 2009.09.23 Заявл. 23.09.2009; Оpubл.20.10. 2012.
6. Пат. 2475257 РФ. Средство для повышения адаптивности организма к экстремальным условиям / авторы и патентообладатели: Третьяк Л.Н., Герасимов Е.М. №2011125924/15; Заявл.22.06.2011; Оpubл. 20.02.2013, Бюл №5. 16 с.

#### Сведения об авторах

**Зяблицева Мария Анатольевна** – канд. с.-х. наук, старший преподаватель, каф. химии, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: mariya.zyabliceva@bk.ru

**Додонова Надежда Александровна** – студентка, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

УДК 641.1

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ВИТАМИНОВ

Долматова И.А.<sup>1</sup>, Зайцева Т.Н.<sup>1</sup>, Рябова В.Ф.<sup>1</sup>, Горелик О.В.<sup>2</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет», Екатеринбург

**Аннотация.** Рассмотрены необходимые диапазоны содержания витаминов в пище, их источники и физиологическое значение. Проанализирован механизм действия витаминов при их избытке и недостатке в организме человека.

**Ключевые слова:** водо- и жирорастворимые витамины, витаминopodobные соединения, биологическая активность, физиологическое действие.

Для нормальной жизнедеятельности организма человека необходимо поступление физиологически и биологически активных веществ, таких как витамины и минеральные вещества [3-5].

Роль минеральных веществ обусловлена их участием в жизненно необходимых функциях организма, таких как построении всех тканей организма, особенно костей и зубов, в регуляции кислотно-основного состава организма, необходимы для нормального усвоения витаминов и других питательных веществ [1, 2].

Витамины являются низкомолекулярными органическими соединениями различной химической природы, которые необходимы для осуществления жизненно важных биохимических и физиологических процессов во всех живых организмах. Витамины обладают исключительно высокой биологической активностью и требуются организму в небольших количествах – от нескольких мкг до нескольких мг в день [5].

Наряду с витаминами в пище содержатся вещества, которые по своей биологической активности, физиологическим эффектам сходны с истинными витаминами. Эти вещества называют витаминopodobными – биофлавоноиды, холин, инозитол, оротовая, пангамовая и парааминобензойная кислоты, полиненасыщенные жирные кислоты и др.

Биохимическими предшественниками витаминов являются провитамины. К ним относятся, например, каротины, расщепляющиеся в организме с образованием витамина А, и некоторые стероиды (эргостерин, 7-дегидрохолестерин и др.), превращающиеся в витамин D.

Биохимические свойства витаминов позволяют им полностью растворяться в воде и водных средах, жире. Эта особенность положена в клас-

сификацию витаминов, согласно которой их подразделяют на водо- и жирорастворимые.

Биологическая роль водорастворимых витаминов определяется их участием в построении различных коферментов, которые являются катализаторами, функционируя в качестве переносчика электронов, атомов или групп атомов. Чаще всего часть структуры кофермента состоит из того или иного витамина, органического вещества, которое не синтезируется в организме человека и должно доставляться ему в составе пищи. В молекуле кофермента активной частью, соединяющейся с переносимой группой, служит именно витамин.

Биологическая ценность жирорастворимых витаминов в значительной мере связана с их участием в контроле функционального состояния мембран клетки и субклеточных структур. В отличие от водорастворимых витаминов молекулы жирорастворимых витаминов содержат длинные углеводородные цепи, и соответственно, растворяются только в неполярных растворителях – жирах, спиртах, эфирах. В связи с этим всасывание витаминов этой группы зависит от присутствия в желудочно-кишечном тракте жира и желчи. Например, в отсутствие жира всасывается только 10% провитамина А, а в его присутствии – около 60%.

Номенклатура витаминов и физиологическое действие витаминов представлено в табл. 1.

Таким образом, полноценное поступление витаминов в организм позволит обеспечить его нормальное физиологическое состояние. Дефицит того или иного витамина приведёт к снижению активности соответствующего фермента и, следовательно, к торможению катализируемой этим ферментом реакции. При этом изменение метаболизма какого-либо вещества влечёт за собой изменение обмена и других соединений. При устранении дефицита витамина организм возвращается в

нормальное состояние. При отсутствии витамина в организме длительного промежутка времени возникает авитаминоз, который при истощении компенсаторных ресурсов организма может иметь негативные, а в некоторых случаях и летальные последствия. Примеры представлены в табл. 2.

Таблица 1

Номенклатура витаминов

Тривиальная	Химическая	Медицинская	Физиологическое действие
<i>Водорастворимые витамины</i>			
B <sub>1</sub>	тиамин	антиневритный	необходим для метаболизма глюкозы. Действует как кофактор системы пируватдегидрогеназы
B <sub>2</sub>	рибофлавин	антидерматитный	участвует в производстве эритроцитов, в синтезе гемоглобина, в окислительно-восстановительных процессах в качестве кофактора ферментов
B <sub>5</sub>	пантотеновая кислота	поддерживает иммунную систему	исходный материал для синтеза кофермента А, который является кофактором многих ферментов
B <sub>6</sub>	пиридоксин, пиридоксаль, пиридоксамин	антидерматитный	участвует в более чем 100 ферментативных реакциях, связанных с метаболизмом белка; физиологическое значение связано с образованием эритроцитов и гемоглобина
B <sub>9</sub>	фолиевая кислота; фолацин	антианемический	способствует эритропоэзу, улучшает кровообращение и функцию нервной системы
B <sub>12</sub>	цианкобаламин	антианемический	реализация гуморальной регуляции эритропоэза
B <sub>15</sub>	пангамовая кислота	лечение астмы, заболевания легких, усталости	стимулирует кровообращение, снижает уровень холестерина, стимулирует синтез белка, участвует в метаболизме жиров, действует как антиоксидант, улучшает сердечный выброс
PP	никотиновая кислота; ниацин	антипеллагрический	может синтезироваться в любой клетке организма человека из аминокислоты триптофана; входит в состав важных веществ – никотинамидадениндинуклеотида (НАД) и никотинамидадениндинуклеотидфосфата (НАДФ)
H	биотин	антидерматитный	участвует в метаболизме углеводов и жиров как кофактор нескольких ферментов
C	аскорбиновая кислота	антицинготный – участвуют в структуре и функционировании ферментов	способствует активности лейкоцитов, укрепляя иммунную систему
<i>Жирорастворимые витамины</i>			
A	ретинол	антиксерофтальмический	участвует в окислительно-восстановительных процессах, регуляции синтеза белков, способствует нормальному обмену веществ, функции клеточных и субклеточных мембран, играет важную роль в формировании костей и зубов, а также жировых отложений; необходим для роста новых клеток, замедляет процесс старения
D	кальциферолы	антирахитический	стимулирует биосинтез кальций-транспортного белка (Ca <sup>2+</sup> – транспортного белка)
E	токоферолы	антистерильный	сильный природный антиоксидант, предохраняющий от окисления жиры и другие легко окисляемые соединения; задерживает окисление ненасыщенных жирных кислот, которые входят в состав мембран, в частности фосфолипидных слоев
K	нафтохинолы	антигеморрагический	стимулирует синтез белка – протромбина в печени



Таблица 2

## Содержание, источники и физиологическое значение витаминов

Витамины	Норма содержания в крови	Нехватка	Избыток	Источники	Физическое действие
Витамин С	0,8-1,4 мг/100 мл сыворотки	Кожа и кровеносные сосуды более подвержены травмам, астении, кровоточивость эпителия	Не токсичен	Цитрусовые, помидоры, овощи, сладкий перец, картофель	Разрушается при тепловой обработке и при длительном хранении продуктов
Витамин В <sub>1</sub>	47±0,2 мг/л	Астения, нарушения работы нервной системы, отек, сердечная недостаточность	Только при сильной передозировке, возможен аллергический шок	Сдоба, зерновые, виноград, спаржа, морковь, мозги, печень, молочные продукты, сердце	Разрушается при тепловой обработке и растворяется в жидкости. Неустойчив на воздухе
Витамин В <sub>2</sub>	20-28 мг/100 мл общего объема крови	Трещины губ, дерматит и функциональные изменения глаза, глоссит	Не выявлены	Молоко, пивные дрожжи, печень, сердце, зеленые листья салата	Нестабилен на свету
Витамин В <sub>6</sub>	>2,5 мг /100 г всей крови	Нарушения роста у детей, анемия, нарушения желудочно-кишечного тракта, дерматит и нервные расстройства	Не выявлены	Свинина, дрожжи, кукуруза, печень и в небольшом количестве в молоке и яйцах	Очень нестабилен на свету, при высокой температуре и на воздухе
Пантотеновая кислота и коэнзим А	24-4500 мг/100 г ткани	Астения, нарушения желудочно-кишечного тракта, нарушения сна и координации	Не выявлены	Яйца, почки, печень, дрожжи, молоко, постное мясо, цельное зерно	Нестабилен при высокой температуре

Биологическая роль витаминов обусловлена их участием в построении различных коферментов, которые, в свою очередь, исполняют роль регуляторов различных биохимических процессов. Витамины обладают широким спектром физиологического действия – являются небелковыми компонентами сложных ферментов (витамины группы В); стимулируют биосинтез физиологически активных белков (витамины А, группы D, К и др.); катализируют окислительно-восстановительные реакции (витамины А, С, Q); участвуют в образовании клеточных гормонов (витамины группы F). Недостаточное поступление витаминов вызывает достаточно широкий спектр заболеваний, таких как рахит, цинга, куриная слепота и ряд других [4, 5].

Таким образом, несмотря на то, что витамины не являются энергетическим материалом, биологическая роль их обусловлена участием практически всех биохимических и физиологических процессов в организме.

## Список литературы

1. Долматова И.А., Зайцева Т.Н., Рябова В.Ф. Физиологические эффекты пищевых веществ // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. Т.10. №1. С. 139-142.
2. Role of calcium magnesium and phosphorous in human body / Okuskhanova E., Suychinov A., Rebezov M., Nurgazezova A., Anuarbekova A., Harlap S., Maksimiuk N., Zaitseva T., Shcherbakov N. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2018. Т. 9. № 6. С. 258-261.
3. Долматова И.А., Горелик О.В. Хлебобулочные изделия в решении проблемы недостаточности микронутриентов // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых [Текст]: сб. науч. статей 8-й межд. мол. науч. конф. (13-14.ноября 2019). Т. 4. Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: ЗАО Университетская книга, 2019. С. 31-35.
4. Основы лечебно-профилактического питания / Миронова И.В., Галиева З.А., Ребезов М.Б., Смольникова Ф.Х. Алматы, 2019. 112 с.
5. Vitamins and their role in human body / Suychinov A., Rebezov M.B., Maksimyuk N.N., Khairullin M.F., Kulikov D.A., Konovalov S.A., Konovalova O.A., Penkova I.V., Moldabaeva Zh. // International Journal of Pharmaceutical Research. 2019. Т. 11. № 3. С. 1246-1248.

**Сведения об авторах**

**Долматова Ирина Александровна** – канд. с.-х. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. <https://orcid.org/0000-0002-3736-193X>. E-mail: [dl.alina@rambler.com](mailto:dl.alina@rambler.com)

**Зайцева Татьяна Николаевна** – канд. биол. наук, доц., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. <https://orcid.org/0000-0003-4238-9774>. E-mail: [tatyananick@mail.ru](mailto:tatyananick@mail.ru)

**Рябова Вера Федоровна** – ст. преподаватель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. <https://orcid.org/000-0002-9635-4924>. E-mail: [vera\\_ryabova1@mail.ru](mailto:vera_ryabova1@mail.ru)

**Горелик Ольга Васильевна** – д-р с.-х. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет», г. Екатеринбург. E-mail: [olgao205en@yandex.ru](mailto:olgao205en@yandex.ru)

УДК 517.642.3

**ОБРАТНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ГРАФАХ**Кадченко С.И.<sup>1</sup>, Рязанова Л.С.<sup>1</sup>, Торшина О.А.<sup>1</sup>, Пуршева А.В.<sup>2</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск<sup>2</sup>ЗАО «Урал-Омега», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Используя ранее полученные линейные формулы вычисления собственных значений дискретных полуограниченных операторов, разработан численный метод восстановления возмущающего потенциала оператора Штурма-Лиувилля, заданного на двухреберном геометрическом графе, по спектральным характеристикам возмущенных и соответствующих им невозмущенных операторов. Метод был апробирован на последовательном графе. Результаты многочисленных экспериментов показали хорошую точность и высокую вычислительную эффективность метода.

**Ключевые слова:** обратные спектральные задачи; собственные значения и собственные функции операторов; оператор Штурма-Лиувилля; интегральное уравнение Фредгольма первого рода; метод регуляризации Тихонова.

**Введение**

В статьях [1-15] разработан метод вычисления собственных значений дискретных полуограниченных операторов по линейным формулам.

Пусть  $L$ -дискретный полуограниченный оператор, заданный в сепарабельном гильбертовом пространстве  $H$  с областью определения  $D_L \in H$ . Обозначим  $L$  границу области  $D_L$ . Если  $L$  является дифференциальным оператором, то собственные значения  $\mu$  определяются при нахождении нетривиальных решений дифференциального уравнения

$$Lu = \mu u, \quad (1)$$

удовлетворяющих однородным граничным условиям

$$Gu|_{\Gamma} = 0. \quad (2)$$

Для их вычисления воспользуемся методом Галеркина. Введем последовательность  $\{H_n\}_{n=1}^{\infty}$  конечномерных пространств  $H_n \subseteq H$ , которая полна в  $H$ . Пусть ортонормированный базис пространства  $H_n$  состоит из системы функций  $\{\varphi_k\}_{k=1}^n$ . При этом функции  $\varphi_k$  должны удовлетворять граничным условиям (2). Приближенное решение спектральной задачи (1), (2) по методу Галеркина ищется в виде

$$u_n = \sum_{k=1}^n a_k(n) \varphi_k. \quad (3)$$

**Теорема 1.** Пусть  $L$ -дискретный полуограниченный оператор, действующий в сепарабельном гильбертовом пространстве  $H$ . Если система координатных функций  $\{\varphi_k\}_{k=1}^{\infty}$  является ортонормированным базисом  $H$ , то метод Галеркина в применении к задаче отыскания собственных значений спектральной задачи (1), (2), построенный на этой системе функций, сходится.

**Теорема 2.** Пусть  $L$ -дискретный полуограниченный оператор, действующий в сепарабельном гильбертовом пространстве  $H$ . Если система координатных функций  $\{\varphi_k\}_{k=1}^{\infty}$  является ортонормированным базисом  $H$  и удовлетворяет однородным граничным условиям (2), то приближенные собственные значения  $\tilde{\mu}_n(n)$  оператора  $L$  находятся по формулам

$$\tilde{\mu}_n(n) = (L\varphi_n, \varphi_n) + \tilde{\delta}_n, \quad (4)$$

где  $\tilde{\delta}_n = \sum_{k=1}^{n-1} [\tilde{\mu}_k(n-1) - \tilde{\mu}_k(n)]$ ,  $\tilde{\mu}_k(n)$  -  $n$ -е приближения по Галеркину к соответствующим собственным значениям  $\mu_k$  оператора  $L$ .

Используя теоремы 1 и 2, собственные значения спектральной задачи (1), (2) можно вычислять по формулам (4). Из приведенных выше теорем следует, что  $\lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{\delta}_n = 0$ ,  $\lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{\mu}_n(n) = +\infty$ .

При выполнении требований теоремы 2 метод Галеркина, в применении к задаче об отыскании собственных чисел оператора  $L$ , сходится. При увеличении  $n$  точность вычисления  $\tilde{\mu}_n(n)$  по формулам (4) возрастает. Для вычисления собственного значения  $\tilde{\mu}_{k_0}(k_0)$  с порядковым номером  $k_0$  в сумме (3) используются только  $k_0$  членов. Поэтому при малых  $k_0$  точность вычисления собственных значений  $\tilde{\mu}_{k_0}(k_0)$  методом Галеркина и, следовательно, по формулам (4) небольшая. По мере возрастания порядкового номера  $k_0$  точность вычисления  $\tilde{\mu}_{k_0}(k_0)$  улучшается.

В силу простых и корректных вычислений по формулам (4) алгоритмы нахождения собственных значений дискретных полуограниченных операторов на ЭВМ простые и вычислительно эффективные. При этом вычисление собственных значений по формулам (4) можно начинать с любого их порядкового номера, так как собственные значения с меньшими порядковыми номерами для их вычислений не используются.

Найденные новые возможности метода Галеркина при вычислении собственных значений дискретных полуограниченных операторов позволили найти линейные формулы (4). На их основе были разработаны алгоритмы решения обратных спектральных задач [16-21], используя которые построим алгоритм численного решения обратных спектральных задач, заданных на последовательных геометрических графах.

**Постановка обратных спектральных задач на последовательных графах**

Для простоты изложения опишем алгоритм на примере двухреберного графа. Пусть  $G = G(V, E)$  – двуреберный связный ориентированный граф, где  $V = (V_1, V_2, V_3)$  – множество вершин,  $E = (E_1, E_2)$  – множество ребер. Каждое ребро имеет длину  $l_j > 0$  и толщину  $d_j > 0$ ,  $j = 1, 2$ . Допустим, что на графе  $G$  определена вектор-функция  $u = (u_1, u_2)$ , каждая компонента которой  $u_j(s_j)$ ,  $0 \leq s_j \leq l_j$  отвечает соответствующему ребру  $E_j$ , а на ребрах  $E_j$  задан линейный вектор-оператор

$$Lu = \left( -\frac{d^2 u_1}{ds_1^2} + p_1(s_1)u_1, -\frac{d^2 u_2}{ds_2^2} + p_2(s_2)u_2 \right), \quad s_j \in (0, l_j), \quad j = 1, 2, \quad (5)$$

действующий в гильбертовом пространстве

$$H = L_2(G) = \{g = (g_1, g_2), g_j \in L_2(0, l_j), j = \overline{1, 2}\}$$

со скалярным произведением [22]

$$(g, h) = \sum_{j=1}^2 d_j \int_0^{l_j} g_j h_j ds. \quad (6)$$

На графе  $G$  для оператора  $L$  рассмотрим задачу Штурма-Лиувилля:

$$-\frac{d^2 u_j}{ds_j^2} + p_j(s_j)u_j = \mu u_j, \quad s_j \in (0, l_j), \quad j = 1, 2, \quad (7)$$

$$\left. \frac{du_1}{ds_1} \right|_{s_1=0} = \left. \frac{du_2}{ds_2} \right|_{s_2=l_2} = 0, \quad d_1 \left. \frac{du_1}{ds_1} \right|_{s_1=l_1} - d_2 \left. \frac{du_2}{ds_2} \right|_{s_1=0} = 0, \quad u_1(l_1) = u_2(0). \quad (8)$$

Чтобы при вычислении собственных значений оператора  $L$  воспользоваться формулами (4), надо построить систему координатных вектор-функций  $\{\varphi_k = (\varphi_{1_k}, \varphi_{2_k})\}_{k=1}^\infty$ , которая была бы ортонормированным базисом  $L_2(G)$  и удовлетворяла граничным условиям (8). Это можно сделать, если вектор-оператор  $L$  представить в виде  $L = T + P$ , где  $T$  – самосопряженный дифференциальный вектор-оператор такого же порядка, что и оператор  $L$  с областью определения  $L_2(G)$ . В этом случае за систему координатных функций можно взять систему собственных вектор-функций  $v_k = (v_{1_k}, v_{2_k})$ , соответствующей невозмущенной краевой задаче

$$-\frac{d^2 v_j}{ds_j^2} = \lambda v_j, \quad s_j \in (0, l_j), \quad j = 1, 2, \quad (9)$$

$$\left. \frac{dv_1}{ds_1} \right|_{s_1=0} = \left. \frac{dv_2}{ds_2} \right|_{s_2=l_2} = 0, \quad d_1 \left. \frac{dv_1}{ds_1} \right|_{s_1=l_1} - d_2 \left. \frac{dv_2}{ds_2} \right|_{s_2=0} = 0, \quad v_1(l_1) = v_2(0). \quad (10)$$

Обозначим через  $\{\lambda_k\}_{k=1}^\infty$  собственные значения спектральной задачи (9), (10), занумерованные в порядке неубывания их величин, а через  $\{v_k = (v_{1_k}, v_{2_k})\}_{k=1}^\infty$  – соответствующие им ортонормированные собственные вектор-функции, заданные на ребрах  $E_j$  графа  $G$ . Система собственных вектор-функций  $\{v_k = (v_{1_k}, v_{2_k})\}_{k=1}^\infty$  образует ортонормированный базис в  $L_2(G)$ . Тогда формулы (4) с учетом (6) примут вид

$$\tilde{\mu}_n(n) = \lambda_n + \sum_{j=1}^2 d_j \int_0^{l_{\max}} \chi_j(s) v_j^2(s) p_j(s) ds + \tilde{\delta}_n, \quad j=1,2, \forall n \in N$$

или

$$\int_0^{l_{\max}} [d_1 \chi_1(s) v_1^2(s) p_1(s) + d_2 \chi_2(s) v_2^2(s) p_2(s)] ds = (11) = \tilde{\mu}_n(n) - \lambda_n - \tilde{\delta}_n,$$

где  $\chi_j = \begin{cases} 1, & s \in [0, l_j], \\ 0, & s \notin [0, l_j], \end{cases} \quad l_{\max} = \max_{1 \leq j \leq 2} \{l_j\}.$

Будем считать, что функции  $p_j(s_j), j=1,2$  в уравнениях (7) не заданы, но при этом известны собственные значения  $\{\lambda_n\}_{n=1}^{\infty}$  и собственные вектор-функции  $\{v_n = (v_{1n}, v_{2n})\}_{n=1}^{\infty}$  спектральной задачи (9), (10) и приближенные собственные значения  $\{\tilde{\mu}_n(n)\}_{n=1}^{\infty}$  задачи (7), (8). Для восстановления значений неизвестных функций приходим к необходимости решать обратную спектральную задачу. Зная спектры двух задач (7), (8) и (9), (10) и собственные функции спектральной задачи (9), (10), восстановить значения функций  $p_j(s_j)$  в узлах дискретизации отрезков  $[0, l_j]$ . Для этого используя равенства (11), построим интегральное уравнение Фредгольма первого рода и запишем его в матричном виде

$$A(\hat{P}) \equiv \int_0^{l_{\max}} \hat{K}(x, s) \hat{P}(s) ds = \tilde{f}(x), \quad c \leq x \leq d, \quad (12)$$

где  $A(\hat{P})$  – оператор Фредгольма,

$$\hat{K}(x_k, s) = \begin{pmatrix} d_1 \chi_1(s) v_{1k}^2(s) & d_2 \chi_2(s) v_{2k}^2(s) \end{pmatrix}, \quad \hat{P}(s) = \begin{pmatrix} \chi_1(s) p_1(s) \\ \chi_2(s) p_2(s) \end{pmatrix}, \quad \tilde{f}(x_k) = \tilde{\mu}_k(k) - \lambda_k - \tilde{\delta}_k,$$

$x_k \in [c, d]$ . Пусть ядро  $\hat{K}(x, s)$  интегрального уравнения (12) непрерывно и замкнуто в  $\Pi = [0, l_1] \times [0, l_2] \times [c, d]$ , а  $\tilde{f}(x) \in L_2[c, d], p_j \in W_2^2[0, l_j], j=1,2$ .

Точны значения  $f(x)$  правой части (12) не известны, но известны ее приближенные значения  $\tilde{f}(x)$ , такие, что  $\|f - \tilde{f}\|_{L_2[c, d]} < \varepsilon$ . Решение интегрального уравнения Фредгольма первого рода (12) является некорректно поставленной задачей. Ее приближенное решение будем искать с помо-

щью метода Н.А. Тихонова и рассмотрим стабилизирующий функционал Тихонова:

$$\Phi_{\alpha}[\hat{P}, \tilde{f}] = \int_a^b [A(\hat{P}) - \tilde{f}]^2 ds + \alpha \Omega[\hat{P}], \quad (13)$$

где  $\Omega[\hat{P}] = \int_a^b [\hat{P}^T \hat{P} + q(P')^T P'] ds$  – стабилизирующий функционал,  $\alpha > 0$  – параметр регуляризации. Элемент  $\hat{P}_{\alpha}$  ищется из условия, что функционал (13) достигает минимальное значение, т. е.

$$\Phi_{\alpha}[\hat{P}_{\alpha}, \tilde{f}] = \inf_{\hat{P}_{\alpha} \in W_2^2} \Phi_{\alpha}[\hat{P}_{\alpha}, \tilde{f}] \quad (14)$$

при граничных условиях

$$\hat{P}'_{\alpha}(a) = \hat{P}'_{\alpha}(b) = 0. \quad (15)$$

Задачу минимизации функционала (13) можно решать численными методами. Но для этих задач они сложно реализуются на ЭВМ. Гораздо проще использовать уравнение Тихонова, вытекающее из условия минимума функционала (13).

Система уравнений, определяющая экстремали  $\hat{P}_{\alpha}(s) = \begin{pmatrix} \chi_1(s) p_1^{\alpha}(s) \\ \chi_2(s) p_2^{\alpha}(s) \end{pmatrix}$  функционала (13),

имеет вид

$$\begin{cases} \alpha \chi_1(t) [p_1^{\alpha}(t) - q(p_1^{\alpha})''(t)] + \\ + \int_0^{l_{\max}} [\chi_1(s) R_{11}(s, t) p_1^{\alpha}(s) + \chi_2(s) R_{21}(s, t) p_2^{\alpha}(s)] ds = F_1(t), \\ \alpha \chi_2(t) [p_2^{\alpha}(t) - q(p_2^{\alpha})''(t)] + \\ + \int_0^{l_{\max}} [\chi_1(s) R_{12}(s, t) p_1^{\alpha}(s) + \chi_2(s) R_{22}(s, t) p_2^{\alpha}(s)] ds = F_2(t). \end{cases} \quad (16)$$

Здесь

$$\begin{aligned} & \int_0^{l_{\max}} \chi_m(s) R_{mn}(s, t) p_m^{\alpha}(s) ds = \\ & \int_0^{l_{\max}} \chi_m(s) p_m^{\alpha}(s) ds \left[ \int_c^d K_m(x, s) K_n(x, t) dx \right] ds, \\ & F_m(t) = \int_c^d K_m(x, t) \tilde{f}(x) dx, \quad K_m(x_k, s) = d_m v_{mk}^2, \\ & t \in [0, l_{\max}], \quad m, n = 1, 2. \end{aligned}$$

Численное решение системы линейных уравнений (16) находится с использованием метода квадратур и будет определять приближенные значения функций  $p_j(s_j)$  в узлах дискретизации графа  $G$ .



**Вычислительные эксперименты**

Используя приведенный в предыдущем пункте алгоритм решения обратных спектральных задач, проведены вычислительные эксперименты по восстановлению значений неизвестных функций  $p_j(s_j)$ , входящих в краевую задачу (7), (8), в узлах дискретизации графа **G**. Пусть известны спектры двух задач (7), (8) и (9), (10) и систему собственных функций спектральной задачи (9), (10). Нетрудно показать, что собственные значения  $\{\lambda_n\}_{n=1}^\infty$  невозмущенной задачи (9), (10) являются корнями трансцендентного уравнения

$$d_1 \sin(\sqrt{\lambda}l_1) \cos(\sqrt{\lambda}l_2) + d_2 \sin(\sqrt{\lambda}l_2) \cos(\sqrt{\lambda}l_1) = 0,$$

а соответствующие им собственные вектор-функции  $\{v_n = (v_{1n}, v_{2n})\}_{n=1}^\infty$  на ребрах  $E_j$  графа **G** следующие:

$$v_{1n} = C_n \cos(\sqrt{\lambda_n} s_1), \quad 0 \leq s_1 \leq l_1,$$

$$v_{2n} = C_n \left[ \cos(\sqrt{\lambda_n} l_1) \cos(\sqrt{\lambda_n} s_2) - \frac{d_1}{d_2} \sin(\sqrt{\lambda_n} l_1) \sin(\sqrt{\lambda_n} s_2) \right], \quad 0 \leq s_2 \leq l_2.$$

Множители  $C_n$  находятся из условия нормировки системы собственных вектор-функций  $\{v_n\}_{n=1}^\infty$ .

Для восстановления значений функций  $p_j(s_j)$ ,  $j = 1, 2$  в узлах дискретизации графа **G** использовалась система уравнений (16), численное решение которой находятся приближенно с использованием конечно-разностной аппроксимации. Правая часть интегрального уравнения Фредгольма (12)  $\tilde{f}(x)$  задана таблично на следующей, вообще говоря, неравномерной  $x$ -сетке узлов:

$$c = \tilde{\mu}_k(k), \tilde{\mu}_{k+1}(k+1), \tilde{\mu}_{k+2}(k+2), \tilde{\mu}_{k+3}(k+3), \dots, \tilde{\mu}_{k+k_1}(k+k_1) = d,$$

а решение  $p_j^\alpha(s_j)$  системы уравнений (16) ищется на двух  $s_j$ -сетках узлов:

$$a = s_{1_1}, s_{1_2}, s_{1_3}, \dots, s_{1_l} = b, \quad a = s_{2_1}, s_{2_2}, s_{2_3}, \dots, s_{2_m} = b.$$

Выбор параметра регуляризации  $\alpha$  осуществлялся с помощью обобщенного метода невязки.

В таблице приведены результаты вычислений по восстановлению функций  $p_1(s_1) = \sin(2s_1 + 1)$ ,  $p_2(s_2) = \cos(s_2) + 2s_2 + e^{-s_2}$  в узловых точках

дискретизации при следующих значениях параметров обратной спектральной задачи (7), (8):  $l_1 = 2, l_2 = 1, d_1 = 2, d_2 = 1$ .

Первое ребро графа **G**

$n$	$s_{1n}$	$p_1(s_{1n})$	$p_1^\alpha(s_{1n})$	$ p_1(s_{1n}) - p_1^\alpha(s_{1n}) $	$\zeta_n$
1	0,0	0,84147	0,64134	0,20014	$2,2 \cdot 10^{-8}$
2	0,2	0,98545	1,02457	0,03912	$2,3 \cdot 10^{-8}$
3	0,4	0,97385	1,09204	0,11820	$4,7 \cdot 10^{-9}$
4	0,6	0,80850	0,87278	0,06428	$3,2 \cdot 10^{-9}$
5	0,8	0,51550	0,44588	0,06962	$3,1 \cdot 10^{-9}$
6	1,0	0,14112	-0,02752	0,16844	$1,3 \cdot 10^{-9}$
7	1,2	-0,25554	-0,40764	0,15210	$7,2 \cdot 10^{-10}$
8	1,4	-0,61186	-0,64638	0,03453	$4,6 \cdot 10^{-10}$
9	1,6	-0,87158	-0,77623	0,09535	$2,3 \cdot 10^{-10}$
10	1,8	-0,99369	-0,85176	0,14103	$2,5 \cdot 10^{-11}$
11	2,0	-0,95892	-0,91321	0,04572	$3,3 \cdot 10^{-11}$

Второе ребро графа **G**

$n$	$s_{2n}$	$p_2(s_{2n})$	$p_2^\alpha(s_{2n})$	$ p_2(s_{2n}) - p_2^\alpha(s_{2n}) $	$\zeta_n$
1	0,0	2,00000	2,04572	0,04572	$2,0 \cdot 10^{-11}$
2	0,1	2,30018	2,34553	0,04536	$8,7 \cdot 10^{-12}$
3	0,2	2,60147	2,61968	0,01821	$1,5 \cdot 10^{-11}$
4	0,3	2,90520	2,88565	0,01954	$1,6 \cdot 10^{-11}$
5	0,4	3,21289	3,16003	0,05286	$2,5 \cdot 10^{-11}$
6	0,5	3,52630	3,45523	0,07107	$1,9 \cdot 10^{-12}$
7	0,6	3,84745	3,77866	0,06879	$4,5 \cdot 10^{-11}$
8	0,7	4,17859	4,13380	0,04479	$3,4 \cdot 10^{-11}$
9	0,8	4,52255	4,52437	0,00212	$2,9 \cdot 10^{-11}$
10	0,9	4,88121	4,96041	0,07919	$1,0 \cdot 10^{-10}$
11	1,0	5,25858	5,45872	0,20013	$4,9 \cdot 10^{-11}$

$$\text{Величины } \zeta_n = \left| \tilde{F}(x_n) - \int_0^{l_{\max}} \sum_{j=1}^2 \chi_j(s) K_j(x_n, s) P_j^\alpha(s) ds \right|$$

определяют поточечно абсолютную погрешность полученного приближенного решения  $P_j^\alpha(s_{jn})$ . Невязка полученного решения, представленная в таблице, равна

$$\zeta_n = \left\| \tilde{F}(x_n) - \int_0^{l_{\max}} \sum_{j=1}^2 \chi_j(s) K_j(x_n, s) P_j^\alpha(s) ds \right\|_{L_2[c,d]} = 1,77 \cdot 10^{-15}.$$

Параметр регуляризации, найденный методом обобщенной невязки, равен  $\alpha = 6,11 \cdot 10^{-9}$ .

Таким образом, для проведения вычислительных расчетов по восстановлению значений функций  $P_j^\alpha(s)$  в узлах дискретизации, используя разработанный алгоритм, необходимо знать

собственные значения спектральной задачи (7), (8) из отрезка  $[c, d]$ , число которых должно быть равно числу узлов дискретизации графа  $G$ . При этом можно выбирать отрезок  $[c, d]$  произвольно. На результаты вычислений это практически не влияет.

### Заключение

В работе разработан алгоритм решения обратных спектральных задач, заданных на геометрических графах, порожденных дискретными полуограниченными операторами. Результаты вычислительных экспериментов показали их высокую вычислительную эффективность.

### Список литературы

1. Кадченко С.И. Метод регуляризованных следов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2009. № 37(170). С. 4-23.
2. Кадченко С.И., Кинзина И.И. Вычисление собственных значений возмущенных дискретных полуограниченных операторов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2006. Т. 46. № 7. С. 1265 -1273.
3. Кадченко С.И. Вычисление рядов Релея-Шредингера возмущенных операторов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2007. Т. 47. № 9. С. 1494 -1505.
4. Кадченко С.И., Рязанова Л.С. Численные методы нахождения собственных значений дискретных полуограниченных снизу операторов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2011. № 17(234). С. 43 -51.
5. Кадченко С.И., Какушкин С.Н. Численные методы нахождения собственных чисел и собственных функций возмущенных самосопряженных операторов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2012. № 27(286). С. 45 -57.
6. Кадченко С.И., Какушкин С.Н. Вычисление спектральных характеристик возмущенных самосопряженных операторов методом регуляризованных следов // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. М.: РАН, ВИНТИ. 2017. № 141. С. 59 - 77.
7. Кадченко С.И., Какушкин С.Н. Численные методы нахождения собственных значений и собственных функций возмущенных самосопряженных операторов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2012. № 27(286). С. 45 -57.
8. Кадченко С.И., Какушкин С.Н. Алгоритм нахождения значений собственных функций возмущенных самосопряженных операторов методом регуляризованных следов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2012. № 40 (299). С. 83-88.
9. Dubrovskii, V.V. Computation of the first eigenvalues of a discrete operator / V.V. Dubrovskii, S.I. Kadchenko, V.F. Kravchenko, V.A. Sadovnichii // Электромагнитные волны и электронные системы. 1998. Т. 3. № 2. С. 4 - 9.
10. Dubrovskii, V.V. A .I. new method for approximet evaluation of the first eigenvalues in the Orr-Zommerfeld eigenvalue problem / V.V. Dubrovskii, S.I. Kadchenko, V.F. Kravchenko, V.A. Sadovnichii // Doklady Mathematics. 2001. Т. 63. № 3. С. 355-358.
11. Kadchenko S.I., Zakirova G.A. A numerical for inverse spectral problem // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2015. Т. 3. С. 116-126.
12. Kadchenko S.I., Zakirova G.A. Calculation of eigenvalues of discrete semibounded differential operators // J. Comp. Eng. Math., 2017, Vol. 4, Is. 1, 38–47.
13. Кадченко С.И., Рязанова Л.С., Торшина О.А. Вычисление собственных чисел в спектральной задаче Орра-Зоммерфельда // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 8. С. 89-94.
14. Вычисление собственных значений с большими номерами спектральных задач модифицированным методом Галеркина / С.И. Кадченко, Г.А. Закирова, Л.С. Рязанова, О.А. Торшина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. Т. 10. № 1. С. 148-152.
15. Calculation of discrete semi-bounded operators eigenvalues with large numbers / S.I. Kadchenko, G.A. Zakirova, L.S. Ryazanova, O.A. Torchina // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2019. Т. 11. № 1. С. 10-15.
16. Кадченко С.И. Численные методы решения обратных задач, порожденных возмущенными самосопряженными операторами, методом регуляризованных следов // Вестник Самарского Университета. Естественнонаучная серия. 2013. № 6(107). С. 23 -30.
17. Кадченко С.И. Численный метод решения обратных задач, порожденных возмущенными самосопряженными операторами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2013. Т. 6. № 4. С. 15 - 25.
18. Кадченко С.И., Закирова Г.А., Кадченко А.И. Решение обратных спектральных задач, порожденных возмущенными самосопряженными операторами // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2016. № 9(91). С. 8-11.
19. Кадченко С.И. Алгоритмы решения обратных задач, порожденных возмущенными самосопряженными операторами // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2015. Т. 3. С. 138-141.
20. Кадченко С.И. Численный метод решения обратных спектральных задач, порожденных возмущенными самосопряженными операторами // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. 2013. № 9-1(110). С. 5-11.
21. Kadchenko S.I., Kakuchkin S.N., Zakirova G.A. Spectral problems on compact graphs // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2017. Т. 10. № 3. С. 156-162.
22. Баязитова А.А. Задача Штурма-Лиувилля на геометрическом графе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2010. № 16(192). С. 4-10.

**Сведения об авторах**

**Кадченко Сергей Иванович** – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. прикладной математики и информатики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: sikadchenko@mail.ru.

**Рязанова Любовь Сергеевна** – канд. пед. наук, доц., каф. прикладной математики и информатики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: ryazanova2006 @ Rambler.ru.

**Торшина Ольга Анатольевна** – канд. физ.-мат. наук, доц. каф. прикладной математики и информатики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: olganica@mail.ru.

**Пуршева Анастасия Викторовна** – ЗАО «Урал-Омега», г. Магнитогорск. E-mail: antonova0914@gmail.com.



УДК 004.422.635.3

## УЛУЧШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАРАМЕТРА ПО ИЕРАРХИЧЕСКОМУ НЕЧЕТКОМУ ДЕРЕВУ РЕШЕНИЙ

Абрамова Т.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** В данной статье рассматривается пример улучшения точности классификации методом обратного распространения параметров по иерархическому нечеткому дереву решений с двумя интегрированными выходными узлами, добавленными к нему, чтобы сформировать вывод диагностических решающих правил. По построенному нейро-нечеткому дереву решений извлекаются нечеткие правила классификации эффективности технологического проекта в понятной для лица, принимающего решение, форме «Если ..., то».

**Ключевые слова:** нечеткие множества, дерево решений, функция принадлежности, нечеткие модели, интеллектуальные методы, инвестиционные решения.

Первоначальным замыслом теории нечетких множеств было построить функциональное соответствие между нечеткими лингвистическими описаниями (типа «высокий», «теплый» и т.д.) и специальными функциями, которые выражали степень принадлежности значений измеряемых параметров (длины, температуры, веса и т.д.) упомянутым нечетким описаниям. Также были введены так называемые лингвистические вероятности, которые задавались с помощью нечетко-смысловой оценки. Впоследствии диапазон применимости теории нечетких множеств существенно расширился. Определение нечетких множеств как инструмент построения теории возможностей ввел Заде. С тех пор научные категории случайности и возможности, вероятности и ожидаемости получают теоретическое разграничение.

Другая проблема связана со сложностью многокритериального характера самой задачи, когда данные характеризуются неопределенностью, размытостью в будущем периоде, а целевая функция не имеет детерминированной формы. В таком случае оценка значительно затруднена наличием большого количества показателей, которые определяют эффективность проекта и выражаются не только количественными, но и качественными величинами. Такие задачи относятся к задачам оценки и выбора решений в условиях неопределенности, когда недостаток информации компенсируется формализованно представленными знаниями экспертов. Для построения нечетких моделей многокритериального выбора эффектив-

ных решений, накопления и многократного использования знаний, полученных при решении данного типа задач, целесообразна разработка интеллектуальных методов и инструментальных средств для поддержки процедур принятия эффективных инвестиционных решений.

В литературе, которая есть на сегодняшний день, по нечетким деревьям решений очень сложно найти руководство выбора правил управляющего параметра  $\alpha$  и порога выбора  $\beta_{th}$  на листе. В исследовательской работе предлагается использовать нейросетевой принцип обучения, чтобы избавиться от размытости этих параметров. Предлагается использовать цикл обратной связи по иерархическому нечеткому дереву решений. Точность классификации дерева решений (без ущерба для интерпретации и с сохранением структуры дерева) можно значительно улучшить с помощью адаптации параметров.

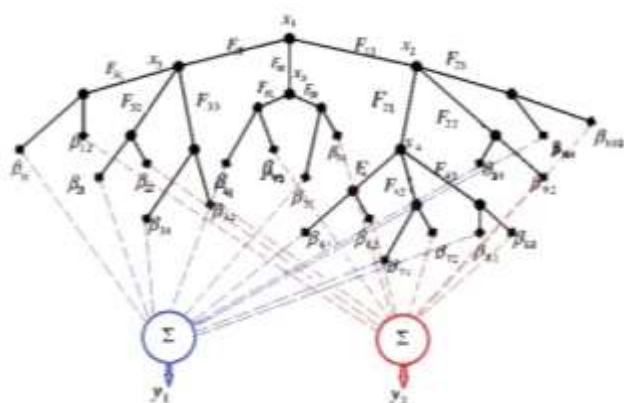
Обучение методом обратного распространения может быть непосредственно применено на структуре нечеткого дерева решений путем обратного обхода из каждого листового узла в корневой узел. Запустим для этого один прямой цикл инициализации дерева, а затем несколько обратных циклов-итераций обратного распространения для настройки параметров дерева (функций принадлежности и идентификации листов). Данная стратегия не нарушает иерархическую структуру дерева и является эффективной настройкой параметров дерева при сохранении интерпретируемости.

Чтобы сформировать вывод диагностических решающих правил, к структуре основного дерева решений добавили два интегрированных выходных узла. Данная структура показана на рисунке.



Для вычисления  $y_1$  со всех листовых узлов, соответствующих классу 1 («Да»), найденные значения весов  $\beta_{m1}$  суммируются.  $\beta_{m1}$  ( $0 \leq \beta_{m1} \leq 1$ ) можно интерпретировать как степень уверенности или принадлежности, что  $m$ -й путь может классифицировать класс 1.

Точно так же со всех листовых узлов, соответствующих классу 0 ("Нет"), найденные значения весов  $\beta_{m2}$  суммируются, чтобы найти  $y_2$ .



Нейро-нечеткое дерево решений на основе процедуры обратного распространения

Получили следующие правила обновления для адаптации параметров центров, ширины и степеней принадлежности для нечеткого дерева решений с гауссовскими функциями принадлежности:

$$\beta_{mi}^{\tau+1} = \beta_{mi}^{\tau} + \frac{\eta}{n} \sum_{i=1}^n (d_i^i - y_i) \mu_{path_m}^2$$

В нашем примере получаем следующие степени принадлежности на нейро-нечетком дереве решений:

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \\ \beta_{31} & \beta_{32} \\ \beta_{41} & \beta_{42} \\ \beta_{51} & \beta_{52} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.19 \\ 0.88 & 0.18 \\ 0.36 & 0.78 \\ 0.12 & 0.88 \\ 0.93 & 0.12 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \beta_{61} & \beta_{62} \\ \beta_{71} & \beta_{72} \\ \beta_{81} & \beta_{82} \\ \beta_{91} & \beta_{92} \\ \beta_{101} & \beta_{102} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.13 \\ 0.79 & 0.22 \\ 0.93 & 0.08 \\ 0.11 & 0.92 \\ 0.83 & 0.35 \end{bmatrix}$$

После завершения процесса классификации формируются классы с самой высокой степенью принадлежности  $\ell_0$ :

$$\ell_0 = \arg \max_{l=1,2} \{y_l^i\}$$

Теперь мы можем извлечь нечеткие правила классификации в понятной для лица, принимающего решение, форме «Если ..., то», используя построенное нейро-нечеткое дерево решений. На рисунке представлены 10 нечетких правил классификации эффективности технологического проекта, для оценки которого «Да» означает «эффективные направления» и «Нет» – «неэффективные направления». Для нашего примера, согласно этим правилам, мы можем выбрать наиболее эффективный в смысле максимальной прибыли и минимальных затрат технологический проект:

- IF ( $x_1$  is  $F_{11}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{31}$ ) THEN  $y$ =YES ( $\beta_{11}$ ) and  $y$ =NO ( $\beta_{12}$ )
- IF ( $x_1$  is  $F_{11}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{32}$ ) THEN  $y$ =YES ( $\beta_{21}$ ) and  $y$ =NO ( $\beta_{22}$ )
- IF ( $x_1$  is  $F_{11}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{33}$ ) THEN  $y$ =YES ( $\beta_{31}$ ) and  $y$ =NO ( $\beta_{32}$ )
- IF ( $x_1$  is  $F_{12}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{31}$ ) THEN  $y$ =YES ( $\beta_{41}$ ) and  $y$ =NO ( $\beta_{42}$ )
- IF ( $x_1$  is  $F_{12}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{32}$ ) THEN  $y$ =YES ( $\beta_{51}$ ) and  $y$ =NO ( $\beta_{52}$ )
- IF ( $x_1$  is  $F_{13}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{21}$   $\wedge$   $x_4$  is  $F_{41}$ ) THEN  $y$ =YES ( $\beta_{61}$ ) and  $y$ =NO ( $\beta_{62}$ )
- IF ( $x_1$  is  $F_{13}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{21}$   $\wedge$   $x_4$  is  $F_{42}$ ) THEN  $y$ =YES ( $\beta_{71}$ ) and  $y$ =NO ( $\beta_{72}$ )
- IF ( $x_1$  is  $F_{13}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{21}$   $\wedge$   $x_4$  is  $F_{43}$ ) THEN  $y$ =YES ( $\beta_{81}$ ) and  $y$ =NO ( $\beta_{82}$ )
- IF ( $x_1$  is  $F_{13}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{22}$ ) THEN  $y$ =YES ( $\beta_{91}$ ) and  $y$ =NO ( $\beta_{92}$ )
- IF ( $x_1$  is  $F_{13}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{23}$ ) THEN  $y$ =YES ( $\beta_{101}$ ) and  $y$ =NO ( $\beta_{102}$ )

**Список литературы**

1. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. Тюмень: Изд-во ТГУ, 2000. 352 с.
2. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В. и др. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.
3. Zadeh L.A. Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility // Fuzzy Sets and Systems. 1978. Vol.1. No1.
4. Janikow. Fuzzy Processing in Decision Trees, Proceedings of the Sixth International Symposium on AI, 1993. 360-367.
5. Абрамова Т.В. Проектирование нейро-нечеткого дерева решений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1(64). С. 8-14.
6. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. Тюмень: Изд-во ТГУ, 2000. 352 с.

**Сведения об авторе**

**Абрамова Татьяна Викторовна** – ст. преподаватель, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. <https://orcid.org/0000-0002-4767-6345>, E-mail: tanusha-atv@mail.ru



УДК 371

**К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ ПРОФИЛАКТИКИ СТРЕССОВ У ШКОЛЬНИКОВ**

Москвина Е.А., Гибадатова Л.Р.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Понятие «стресс» давно перешло из разряда научных терминов в понятие общего употребления. Мы слышим о нем практически ежедневно в средствах массовой информации и в повседневной жизни. По оценкам многочисленных экспертов, психические расстройства, вызванные стрессом, широко распространены. Стресс и его последствия для здоровья, как физического, так и психологического, приобретают в настоящее время широкие масштабы и представляют собой актуальную проблему современного общества. В работе рассмотрено понятие «стресс», раскрыто, как стресс проявляется у детей школьного возраста, что является причиной стресса и его последствиями, обоснована необходимость разработки методических рекомендаций и проведения профилактической работы по предупреждению стрессов у школьников в интеграции педагогов различных предметных направлений.

**Ключевые слова:** стресс, учебный стресс, стрессовая ситуация, стрессоустойчивость, профилактика стресса.

Стресс – это состояние человека, которое возникает как реакция на любые события или требования, с которыми человеку трудно или невозможно справиться [8].

В переводе с английского «стресс» – это напряжение, давление, нажим. Известный канадский биохимик Г. Селье сформулировал понятие стресса как «неспецифический ответ организма на любое предъявляемое ему требование» [10]. Различают физиологический (реакция на физические стимулы, т.е. травмы, инфекции и др.) и психологический стресс (реакция на травмирующие психологические стимулы). Психологический стресс, в свою очередь, подразделяют на эмоциональный стресс (связанный как с негативными, так и позитивными аффектами) и информационный стресс (перезагруженность информацией) [1]. Причины стресса могут быть внешними (жизненные ситуации, события) и внутренними (как результат биохимических реакций организма). Это деление условное, поскольку они тесно взаимосвязаны между собой.

Стресс сам по себе явление повседневное, поскольку жизнь – это постоянный источник изменений, и приспособляться к новым условиям приходится каждый день. Современный человек постоянно испытывает психологическое напряжение, обусловленное действием негативных влияний и их последствий. Современные дети, подростки также подвержены физическим и психическим перегрузкам в процессе получения образования, в результате чего испытывают

стресс [3, 5]. Этот стресс можно квалифицировать как учебный стресс. Учебный стресс при этом включает в себя компоненты физиологического, информационного и эмоционального стресса.

Одним из важных источников стресса может являться деятельность ребенка во время пребывания в образовательной организации и при продолжении учебной деятельности дома, при выполнении домашнего задания. Требования школы, оказывающие давление на обучающихся, а также разочарование от низких оценок, сложности в усвоении учебного материала, трудности при выполнении домашних заданий – все это может потреблять большую часть жизненной энергии ребенка. Таким образом, обучение – это достаточно энергозатратный процесс. Как показывает практика, жизнь в состоянии постоянного стресса может привести к ряду проблем со стороны здоровья человека: синдром хронической усталости, частые респираторные заболевания, гипертония, бронхиальная астма, гормональные нарушения (в первую очередь сахарный диабет), бессонница, нарушение аппетита, язвенная болезнь. Это далеко не полный список заболеваний, развитие которых ускоряет длительный стресс. Необходимо отметить и сопутствующие серьезные психические проблемы – такие как тревожные, невротические или депрессивные расстройства. Стресс способствует возникновению хронической тревожности, дезадаптации в поведении, проблем в общении, приступов агрессии или аутоагрессии. На то, каким образом проявятся последствия стресса, оказывают влияние условия жизни человека, его окружение.

В школьном возрасте дети сталкиваются с самыми разными проблемами, в частности: учебная перегрузка, отсутствие дружеских отношений со сверстниками, смена школьного коллектива, педагоги, семья, негативное воздействие которых приводит к возникновению многих стрессовых ситуаций [4]. По мнению обучающихся, при стрессах большинство из них имеет плохое самочувствие и, как следствие, испытывает огорчение, испуг и страх. Сегодня школьники перегружены и утомлены до такой степени, что многим требуется помощь психолога, чтобы научиться справляться со стрессом. Если не предпринять вовремя меры, то со временем стресс будет усиливаться и впоследствии любая неудача может сопровождаться депрессией, а также повышенным риском склонности к суицидальному поведению [9].

Для разрешения сложных проблем и стрессов можно обратиться к близким людям и родственникам, а эмоциональную компенсацию получить на отдыхе, прогулке или слушая любимую музыку. Помочь школьнику справиться со стрессом может учитель, классный руководитель, социальный педагог, педагог-психолог. Чаще всего педагоги решают возникающие проблемы познавательными играми, общением, активными физическими упражнениями и постоянной сменной тактикой общения [2, 4, 6, 7].

Вышесказанное подтверждает необходимость выстраивания профилактической работы не только с обучающимися, но и с родителями, и с педагогическим коллективом. Профилактика стресса – это важное условие для сохранения эмоционального здоровья человека. Профилактика стрессов у

школьников должна быть направлена, в том числе, на формирование их стрессоустойчивости, содержать методики самопознания для подготовки себя к возможным негативным проявлениям, распознаванию и нейтрализации возможных последствий стресса. Такая работа будет эффективна при условии объединения усилий семьи, классного руководителя, учителей предметных направлений, психолога и социального педагога, что будет способствовать повышению качества образования и формирования личности, соответствующей требованиям современного российского общества.

#### Список литературы

1. Бодров В.А. Психологический стресс: Развитие учения и современное состояние проблемы. М.: Наука, 1995. 288 с.
2. Бойко В.В. Трудные характеры подростков: развитие, выявление, помощь. СПб.: Союз, 2002. 220 с.
3. Бордовская Н.В., Реан А.А. Педагогика: учебник (Учебник нового века). СПб.: Питер, 2000. 304 с.
4. Бохан Т.Г. Стресс и стрессоустойчивость: опыт культурно-исторического исследования. Томск: Изд-во «Иван Федоров», 2008. 267 с.
5. Венгер А.Л. Психологическое обследование старших школьников. М.: Владос, 2005.
6. Вильяме К. Тренинг по управлению стрессом. М.: ЭКСМО, 2002. 272 с.
7. Высоцкая Н.В. Подростки 21 века. Психолого-педагогическая работа в кризисных ситуациях. М.: Вако, 2006.
8. Гиссен Л.Д. Время стрессов. М.: ФиС, 1990. 192 с.
9. Карандашев В.Н. Как жить в условиях стресса. СПб.: Питер, 2003. 276 с.
10. Селье Г. Стресс без дистрессов. М.: Медиа, 2012. 307 с.

#### Сведения об авторах

**Москвина Елена Алексеевна** – канд. пед. наук, доц., каф. прикладной математики и информатики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: e.moskvina-magtu@mail.ru

**Гибдатова Лилия Радиковна** – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: gibdatova1998@yandex.ru

УДК 621.771.016.3

## МИКРОТОПОГРАФИЧЕСКИЕ И ФРАКТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Белов В.К.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аннотация.** Показано, что сечения шероховатой поверхности с гауссовским распределением ординат можно рассматривать как фрактальные объекты с размерностью Мандельброта 2.3-2.4. Показано, что зависимость числа пятен контактов от глубины внедрения имеет явно нелинейный вид, обусловленный слиянием пятен контактов, при относительной площади контакта, превышающей 40%. Показано, что классическое утверждение о пропорциональности числа пятен контакта выполняется только на ограниченном участке сближений. Исследование проведено с использованием методик обработки изображений в системе MATLAB.






**Ключевые слова:** микротопография поверхности, 3D-параметры микротопографии, фрактальная размерность, трибология.

К сожалению, чаще всего при расчётах внедрения неровностей одной шероховатой поверхности в другую – гладкую поверхность считают, что данные сечения поверхности имеют правильную евклидовую форму. Это связано с тем, что при определении твёрдости поверхности усилия внедрения определены только для инденторов строго определённой формы (шарик, пирамида, конус). Сечения этих внедрений не являются фрактальными объектами и характеризуются отношением  $R$ :

$$R = \frac{P}{\sqrt{S}} = const, \quad (1)$$

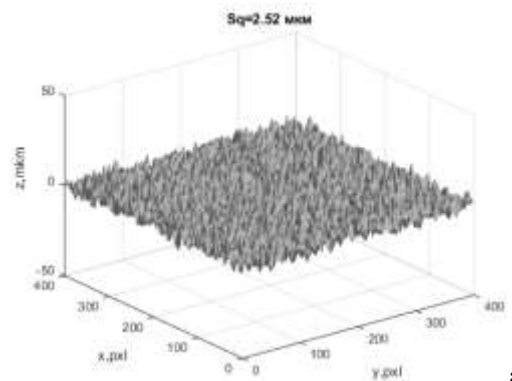
где  $P$  – периметр сечения;  $S$  – площадь (см. табл).

Считается, что  $R$  не зависит от габаритов сечения, от масштаба сечения.

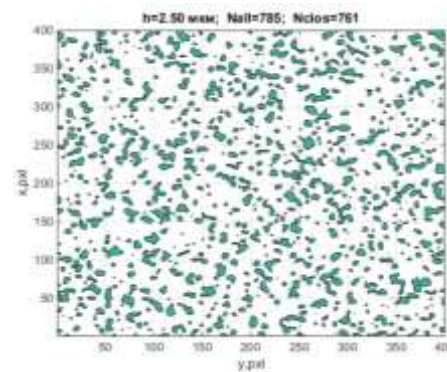
					
$\frac{P}{\sqrt{S}}$	3,545	3,722	4,000	4,559	5,264

В качестве модели шероховатой поверхности валка в данной работе используются поверхности с гауссовским распределением ординат, что характерно для электроэрозивной обработки поверхностей рабочих валков дрессировочных станов при производстве автолиста. Параметры шероховатости  $R_q$  и  $RP_c$  будут находиться в рабочих пределах эксплуатации рабочих валков дрессировочных станов ПАО «ММК» ЛПЦ №5 и 11. Регистрация шероховатой поверхности осуществлялась при стандартных режимах фильтрации

( $d = 1,5$  мкм;  $\lambda_x = 8$  мкм;  $\lambda_c = 2,5$  мкм). Фрагмент такой поверхности с параметрами  $R_q = 2,5$  мкм,  $P_c = 65$  1/см и её сечение на высоте  $h = 2,5$  мкм приведены на рис. 1. Данный пример соответствует тематике работ НИЦ «Микротопография МГТУ» по технологиям производства листовой продукции с регламентированными параметрами микротопографии [1-10].



а



б

Рис. 1. Фрагмент шероховатой поверхности с параметрами  $R_q = 2,52$  мкм (а), сечение поверхности на уровне  $h = 2,5$  мкм (б)

Относительную долю суммы площадей сечений можно определить по стандартной методике по опорной кривой [1, 3, 7, 10].

Но определённую трудность представляет задача нахождения площадей **отдельных** контактов  $s$ , периметров этих площадей, усреднённых радиусов этих площадей и распределения этих величин.

В данной работе использовалась методика расчёта этих величин и фрактальной размерности пятен контакта с использованием методик обработки изображений в системе MATLAB. На рис. 2 приведён пример такого расчёта для различных сечений поверхности рис. 1, б.

Для фрактальных объектов, подобных сечениям на рис. 1, б, фрактальная размерность  $D$  определяется иным образом [11-13], чем по формуле (1):

$$R(s_{\min}) = \frac{P^{1/D}}{\sqrt{S}}. \quad (2)$$

Здесь  $R$  не зависит от габаритов сечения, но зависит от масштаба изображения сечения  $s_{\min}$ . Поэтому по стандартам [14, 15] при определении  $D$  обязательно следует указать минимальный размер ячейки изображения  $s_{\min}$  и размер площади оценки  $S_0$ .

Для фрактальных объектов периметр растёт быстрее, чем площадь, и фрактальная размерность ограничена интервалом  $1 \leq D \leq 2$ . Для гладких контуров  $D$  близко к 1, для изрезанных – к 2.

График зависимости  $\lg(P)$  от  $\lg(S)$  позволяет определить фрактальную размерность  $D$  при фиксированном значении  $s_{\min}$ :

$$\lg(P) = const + \frac{D}{2} \lg(S) \quad \text{или} \quad D = \frac{2 \cdot \Delta[\lg(P)]}{\Delta[\lg(S)]}. \quad (3)$$

Фрактальная размерность плоской фигуры по Б. Мандельброту  $D_s$  отличается от  $D$  на единицу:

$$D_s = D + 1. \quad (4)$$

В MATLAB контур представлялся в бинарном представлении с шагом  $d$ . Поэтому методика расчёта  $D$  должна учитывать два обстоятельства. Первое: сечения, изображения которых были меньше или равнялось 8-связной окрестности, игнорируются как нефрактальные. Второе: сечения, которые находились на границах площади оценки, также исключаются. Но при расчётах количества контактов два пятна, пересекающие границу, считаются за одно. Пример расчёта  $D$  приведён на рис. 3.

Наибольший интерес представляют зависимости вышерассмотренных микротопографических характеристик от глубины внедрения шероховатой поверхности в гладкую поверхность –  $h$  (рис. 4), которую будем отсчитывать от средней плоскости шероховатой поверхности.

На рис. 5 приведены эти зависимости для средних значений периметров  $P_m$  и площадей  $S_m$  пятен контакта. Различия поведения  $P_m$  и  $\sqrt{S_m}$  от  $h$  (рис. 5) определяют фрактальную размерность по Мандельброту пятен контакта (рис. 6), которая находится в пределах  $[2,3 \div 2,4]$ . Удивительным является то, что фрактальная размерность этих сечений совпадает с фрактальной размерностью облатков.

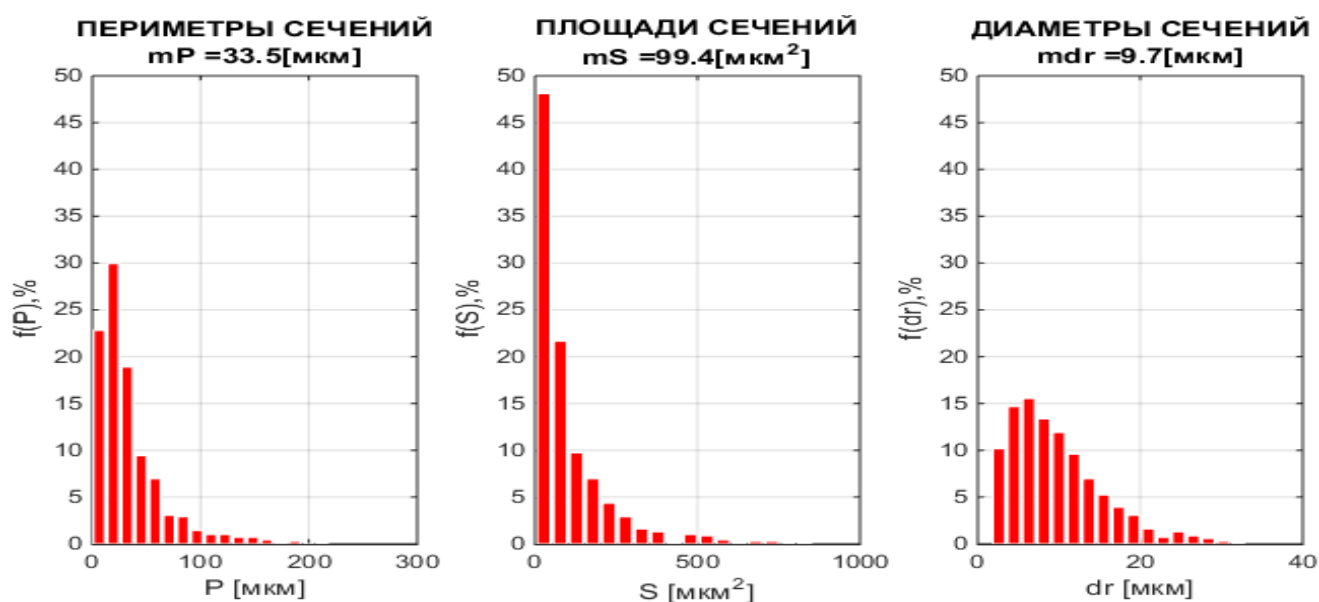


Рис. 2. Гистограммы распределения периметров, площадей и средних габаритов пятен контактов рис. 1, б



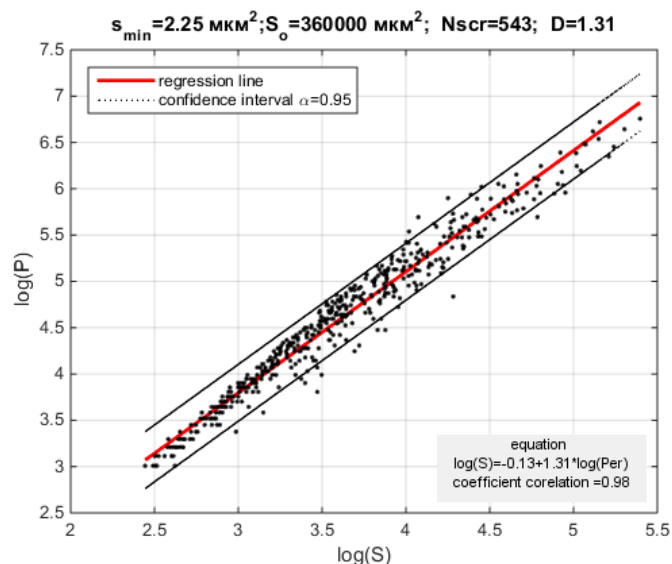


Рис. 3. Пример расчёта фрактальной размерности 543 пятен контакта на рис. 1, б



Рис. 4. Сечения на уровнях  $h = 6,51; 5,58; 3,72; 2,79; 1,86; 0,93$  мкм

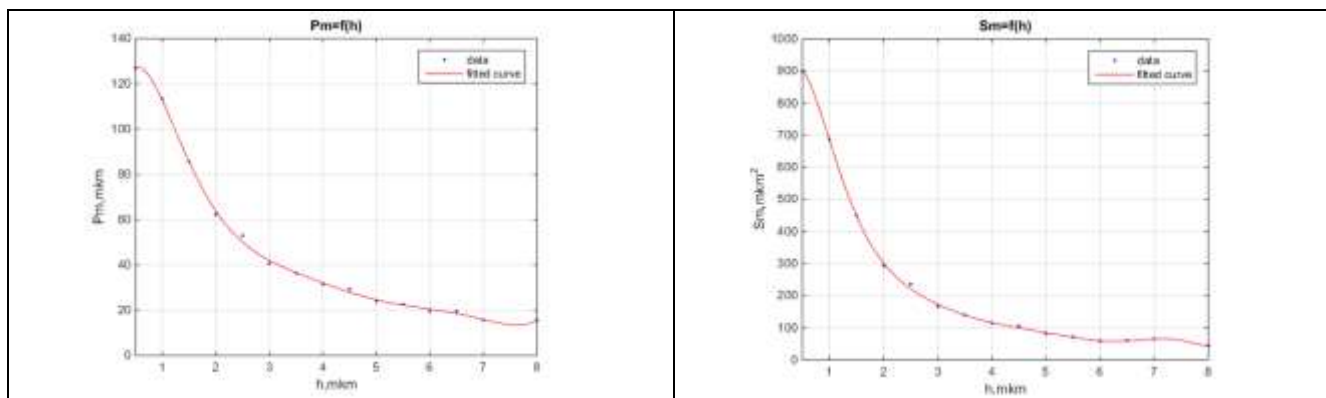


Рис. 5. Зависимости  $P_m$  и  $S_m$  от  $h$



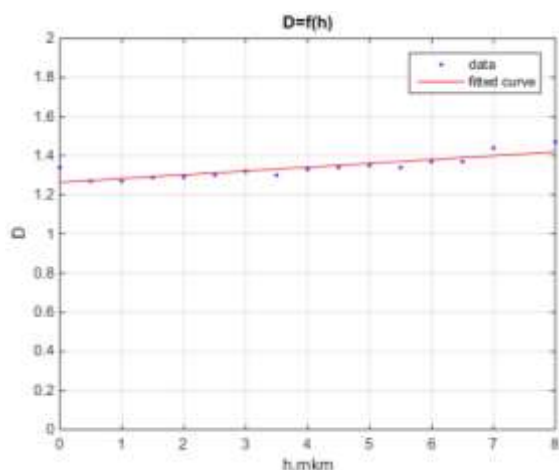


Рис. 6. Зависимость фрактальной размерности  $D$  при  $s_{\min} = 2,25 \text{ мкм}^2$  и  $S_0 = 360000 \text{ мкм}^2$

В классических работах по трибологии утверждается, что число пятен контактов растёт линейно при сближении шероховатой и гладкой поверхностей [16]. В данной работе показано, что это утверждение выполняется только на ограниченном участке сближений 4÷6 мкм. График зависимости числа пятен контактов  $N_{all}$  от глубины внедрения имеет явно нелинейный вид (рис. 7). Уменьшение  $N_{all}$  при  $h$ , меньших 3 мкм, обусловлено слиянием пятен контактов неровностей шероховатой поверхности с гладкой поверхностью. Это происходит при относительной площади контакта, превышающей 40%.

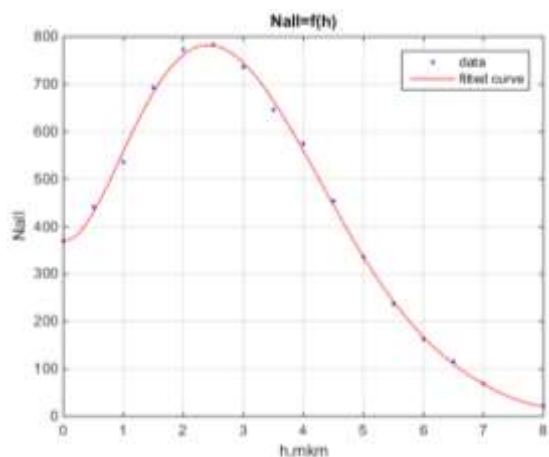


Рис. 7. Зависимость числа пятен контактов  $N_{all}$  от  $h$

При расчётах отпечатываемости шероховатости вала на поверхности прокатываемого металла, а также при трибологических расчётах и контактных задачах необходимо учитывать сложный характер зависимости  $N_{all} = f(h)$ .

Данная информация представляет интерес для специалистов по обработке металлов давлением и специалистов по трибологии тяжёлонагруженных узлов трения.

### Список литературы

1. Belov V., Gubarev E., Begletsov D., Krivko O. Change of void volume of steel sheet rough layer after deformation by roll with given surface roughness, Key Engineering Materials. 2017. Т. 743 КЕМ. С. 223-228.
2. Определение коэффициентов отпечатываемости вала с шероховатой поверхностью на дрессированном металле по профильным и объёмным параметрам микро топографии / Белов В.К., Беглецов Д.О., Губарев Е.В., Дьякова М.В. // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2016. № 22. С. 107-116.
3. Белов В.К. Требования к микро топографии поверхности листовой продукции и возможности металлургической промышленности — прошлое, настоящее, будущее // Черная металлургия. Ч. 1. 2015. № 7 (1387). С. 73-82. Ч. 2. 2015. № 8 (1388). С. 51-60.
4. Belov V.K., Begletsov D.O. Formation of surface microtopography in the temper rolling of auto-industry steel sheet, Steel in Translation. 2014. Т. 44. № 1. С. 54-60.
5. Belov V.K., Begletsov D.O. Simulation algorithm for automotive steel sheet texture formation in temper mill, Applied Mathematical Modelling. 2015. Т. 39. № 23-24. С. 7326-7337.
6. Belov V.K., Begletsov D.O. Formation of surface microtopography in the temper rolling of auto-industry steel sheet, Steel in Translation. 2014. Т. 44. № 1. С. 54-60.
7. Особенности использования 3D-топографических характеристик поверхности в инженерном деле / Белов В.К., Беглецов Д.О., Губарев Е.В. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С.73-80.
8. Перспективы инновационного использования 3D-характеристик микро топографии / Белов В.К., Беглецов Д.О., Губарев Е.В., Дьякова М.В. и др. // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2014. № 20. С. 21-30.
9. Belov V.K., Dyakova M.V., Laskov S.A., Gorbunov A.V. and others. 3D surface microtopography of cold-rolled and galvanized strip, Steel in Translation. 2013. Т. 43. № 11. С. 750-755.
10. Белов В.К., Губарев Е.В., Мамыч К.В. О соотношениях вытесненных макро- и микрообъёмов в очаге деформации в зависимости от давления // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. С.96-99.
11. Johnsen, W.A. and C.A. Brown, "Comparison of Several Methods for Calculating Fractal-Based Topographic Characterization Parameters," Fractals, 2 (3) (1994):437-440.
12. Белов В.К. Профили поверхности. 3-е изд. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. 260 с.
13. Paul S. Addison, Fractals and Chaos, An Illustrated Course Napier University Edinburgh, 1997, 256 p.
14. ANSI/ASME B46.1 (2010) Surface texture, surface roughness, waviness and lay. American National Standards Institute, Washington.

15. ISO 25178 (2010) Geometrical product specification (GPS)—surface texture: areal—International Organization for Standardization.
16. Мур Д. Основы и применения трибоники. М.: Мир, 1978. 483 с.

#### Сведения об авторе

**Белов Валерий Константинович** – канд. физ.-мат. наук, проф., руководитель НИЦ «Микротопография МГТУ», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: [belovalkon@mail.ru](mailto:belovalkon@mail.ru)

---

УДК 530.145

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ В КООРДИНАТНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ДВУХ ФОТОНОВ В ЗАПУТАННОМ СОСТОЯНИИ

Давыдов А.П., Злыднева Т.П.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

**Аннотация.** Излагаются основные положения построения одночастичной волновой функции фотона в координатном представлении и обсуждается ее применение к описанию однофотонных интерференционных явлений. Обосновывается связь используемых в квантовой электродинамике понятий напряженностей электромагнитного поля с характеристиками волновых пакетов в квантовой механике фотона. Для иллюстрации рассматривается связь квантовой плотности вероятности обнаружения фотона с вводимой в рассмотрение «классической плотностью вероятности». Объясняется смысл понятия линейной поляризации фотона в состоянии волнового пакета. Конструируется волновая функция в координатном представлении состояния двух запутанных фотонов на выходе из нелинейного кристалла путем моделирования векторов поляризации и гауссовского распределения по импульсам для каждого из фотонов.

**Ключевые слова:** квантовая механика фотона, волновой пакет, плотность вероятности, однофотонная интерференция, запутанные состояния.

### Введение

В течение последних порядка полтора десятилетия в научном мире бурно развиваются новые направления, связанные с квантовой физикой. Особое внимание уделяется разработке квантовых компьютеров, реализации квантовых криптографии и телепортации, формулировке и осмыслению таких понятий, как классический и квантовый реализм, нелокальность взаимодействий и т.д. Развитие этих тенденций приводит к представлениям, находящимся вне рамок ортодоксальной квантовой механики. Немаловажное значение придается осуществлению и использованию однофотонных и «запутанных» двухфотонных состояний. С метафизической точки зрения по-прежнему вызывает большой интерес «одночастичные» интерференционные явления, которые условно считаются эквивалентными опыту Юнга, например, для фотонов – в интерферометре Маха-Цендера, в которых фотон или частица, обладающая массой, интерферирует «сам с собой». В таких явлениях свет уже нельзя рассматривать в виде классической электромагнитной волны, и результаты экспериментов с фотонами объясняются на языке квантовых амплитуд перехода так же, как и результаты экспериментов с частицами, имеющими массу. При этом, как для фотонов, так и для частиц, загадка корпускулярно-волнового дуализма *остаётся не устранимой*. Однако если

для частиц этот «дуализм» формально можно принять, оставаясь в рамках копенгагенской интерпретации квантовой механики, то представление о фотоне-корпускуле весьма сомнительно, «в обычном смысле», – в силу невозможности локализовать фотон в пространстве. Между тем с другой стороны, применение языка квантовых амплитуд как раз и способствует «формированию» представления о том, что фотон якобы проявляет себя в качестве корпускулы в некоторых состояниях в опытах с одиночными фотонами.

Чтобы устранить эту противоречивость и, в частности, значительно сгладить проблему корпускулярно-волнового дуализма, по нашему мнению, для описания однофотонной интерференции следует использовать *волновую функцию фотона в координатном представлении*. В частности, это делалось в ряде работ [1–8]. *Цель данной статьи – продемонстрировать описание с помощью волновой функции в координатном представлении запутанного состояния двух фотонов в первоначальный момент времени в результате их формирования при вылете из нелинейного кристалла.*

### Волновая функция фотона в координатном представлении

В конструктивном плане волновую функцию фотона в координатном представлении начали обсуждать в середине девяностых годов 20-го века (см. [9, 10] и ссылки в [1, 2]). Ее обоснование с учетом ее возможной нормировки на единичную вероятность проводилось в [11–14] и др. (см. так-

же ссылки в [1, 2]). Ниже кратко излагаются основные положения построения волновой функции фотона в координатном представлении в соответствии с [12, 14].

В [12, 14] получены собственные векторы («циркулярно-поляризованные плоские волны») операторов энергии, импульса и спиральности фотона:

$$\begin{aligned} \xi_{\mathbf{k}, \pm 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) &= \frac{(\text{Oe})\mathbf{e}_{\pm 1}(\mathbf{k})}{(2\pi)^{3/2}} e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} \mp k ct)}, \\ \eta_{\mathbf{k}, \mp 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) &= \frac{(\text{Oe})\mathbf{e}_{\mp 1}(\mathbf{k})}{(2\pi)^{3/2}} e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} \mp k ct)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Эти векторы являются решениями уравнений Максвелла, представленных Майорана [15] в квантово-механической форме (два из уравнений аналогичны уравнению Шредингера), и применяются для построения волновой функции фотона-волнового пакета с некоторыми задаваемыми коэффициентами  $b(\mathbf{k}, \pm 1)$ :

$$\begin{aligned} \Psi^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) &= \int \frac{b(\mathbf{k}, \pm 1)}{(\text{Oe})} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \xi_{\mathbf{k}, \pm 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) d^3\mathbf{k} + \\ &+ \int \frac{[b(-\mathbf{k}, \mp 1)]^*}{(\text{Oe})} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \eta_{\mathbf{k}, \pm 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) d^3\mathbf{k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где (Oe) – единица измерения (эрстед) величин  $\xi$ ,  $\eta$ ; знаки « $\pm$ » в верхних индексах отвечают фотону с положительной и (гипотетической) отрицательной энергией, а « $\pm$ » или « $\mp$ » в нижних индексах и в коэффициентах  $b(\mathbf{k}, \pm 1)$  – спиральности  $\lambda$  фотона, согласно верхним знакам. В (1) векторы поляризации  $\mathbf{e}_\lambda(\mathbf{k}) = [\mathbf{e}_I(\mathbf{k}) + i\lambda\mathbf{e}_{II}(\mathbf{k})] / \sqrt{2}$ , где  $\mathbf{e}_I$ ,  $\mathbf{e}_{II}$  – вещественные единичные взаимно ортогональные векторы, образующие правую тройку с вектором  $\mathbf{n} = \mathbf{k}/k$ :

$$\begin{aligned} |\mathbf{e}_I| = |\mathbf{e}_{II}| = 1; (\mathbf{e}_I, \mathbf{n}) = (\mathbf{e}_{II}, \mathbf{n}) = (\mathbf{e}_I, \mathbf{e}_{II}) = 0; \\ \mathbf{e}_{II} = [\mathbf{n} \times \mathbf{e}_I]; \mathbf{n} = i\lambda [\mathbf{e}_\lambda \times \mathbf{e}_\lambda^*], \end{aligned} \quad (3)$$

причем вектор  $\mathbf{e}_I$  не меняется при изменении направления вектора  $\mathbf{n}$ ;

$$\begin{aligned} (\mathbf{e}_\lambda^*, \mathbf{e}_\lambda) = \delta_{\lambda\lambda}; \mathbf{e}_\lambda^+ \mathbf{e}_\lambda = \delta_{\lambda\lambda}; \mathbf{e}_\lambda(\mathbf{n}) = \mathbf{e}_{-\lambda}(-\mathbf{n}); \\ [\mathbf{e}_\lambda(\mathbf{k})]^* = \mathbf{e}_{-\lambda}(\mathbf{k}) = \mathbf{e}_\lambda(-\mathbf{k}). \end{aligned} \quad (4)$$

Функция (2) является решением установленного в [12, 14] уравнения типа Шредингера, удовлетворяет нормировке на единичную вероятность и уравнению непрерывности [12, 14] для плотности вероятности  $\rho_p^{(\pm)}(\mathbf{r}, t)$  обнаружения фотона вблизи точки  $\mathbf{r}$  в момент  $t$ .

Для свободного или дифрагирующего фотона коэффициенты  $b(\mathbf{k}, \pm 1)$  должны определяться из начального и граничных условий. Однако поведение фотона можно моделировать, задавая эти коэффициенты из каких-либо физических соображений и сравнивая затем результаты с реальными экспериментами.

### Моделирование фемтосекундного лазерного излучения

В [1, 16-18] проведено моделирование волнового пакета с гауссовским распределением по импульсам фотона. Для этого  $b(\mathbf{k}, \pm 1)$  были выбраны в виде

$$\begin{aligned} b(\mathbf{k}, \pm 1) &= [b(-\mathbf{k}, \mp 1)]^* = \sqrt{\frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{2\pi\sqrt{\pi}}} \times \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{2}(\alpha_1^2 k_x^2 + \alpha_2^2 k_y^2 + \alpha_3^2 (k_z \mp k_0)^2) - i\mathbf{k}\mathbf{r}_0\right], \end{aligned} \quad (5)$$

а векторы  $\mathbf{e}_\lambda(\mathbf{k})$  записывались следующим образом: 1) при  $0 \leq \theta \leq \pi/2$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_I(\mathbf{k}) &\equiv \begin{pmatrix} e_{Ix} \\ e_{Iy} \\ e_{Iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - (1 - \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -(1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ -\sin \theta \cos \varphi \end{pmatrix}; \\ \mathbf{e}_{II}(\mathbf{k}) &\equiv \begin{pmatrix} e_{IIx} \\ e_{IIy} \\ e_{IIz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \cos \theta + (1 - \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\theta$  и  $\varphi$  задают вектор  $\mathbf{k}$  в сферической системе координат;

2) при  $\pi/2 < \theta \leq \pi$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_I(\mathbf{k}) &\equiv \begin{pmatrix} e_{Ix} \\ e_{Iy} \\ e_{Iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - (1 + \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -(1 + \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \theta \cos \varphi \end{pmatrix}; \\ \mathbf{e}_{II}(\mathbf{k}) &\equiv \begin{pmatrix} e_{IIx} \\ e_{IIy} \\ e_{IIz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 + \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \cos \theta - (1 + \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

В [1, 16-18] констатировалось, что при  $t = 0$  случай  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \equiv \alpha$  дает практически сферически-симметричную пространственную форму волнового пакета. На оси  $z$ , которая является осью симметрии волнового пакета, плотность вероятности обнаружить фотон в авангарде пакета перемещается почти точно со скоростью света  $c$  в вакууме. Чем дальше от этой оси, тем меньше скорость перемещения соответствующей плотно-

сти вероятности. Таким образом, происходит трансформирование первоначальной «шарообразной» формы пакета в некую «конусообразную», «напоминающую» излучение Вавилова-Черенкова. Скорость расплывания пакета (2) тем больше, чем меньше его начальный «радиус», в согласии общими положениями квантовой механики. Эти выводы находятся в согласии [18] также с экспериментально установленным «уменьшением» «групповой» скорости фотонов по сравнению с фазовой скоростью света в вакууме, что выявляет адекватность модели (5)–(7).

**Классическая и квантовая плотности вероятности обнаружения фотона**

Модель (5)–(7) соответствует состоянию фотона с нулевым средним значением спиральности, отвечающей линейной поляризации в классической электродинамике. Единственной ненулевой электрической компонентой поля оказывается  $E_x$ , извлекаемая из (2), (5)–(7) с помощью метода, разработанного в [12, 14]. Для точек на оси  $z$  аналитически вычисляются как плотность вероятности  $\rho_P(\mathbf{r}, t) = [\Psi(\mathbf{r}, t)]^+ \Psi(\mathbf{r}, t)$ , так и проекция  $E_x$ . При  $t=0$  волновая функция (2) имеет наименее громоздкий явный вид (полагаем  $b = \pm \alpha^2 k_0 + iz$ ):

$$\Psi^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_{ux}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ \Psi_{uy}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_{ux}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ -\Psi_{uy}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где

$$\Psi_{ux}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\alpha}{\sqrt{\pi}}} \left[ 1 + \left( \frac{2b^2}{\alpha^2} - 1 \right) \exp\left(\frac{b^2}{2\alpha^2}\right) \right], \quad (9)$$

$$\Psi_{uy}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \pm \frac{i}{4} \sqrt{\frac{\alpha}{\sqrt{\pi}}} \left[ \frac{b}{\alpha} \sqrt{\frac{2}{\pi}} + \left( \frac{2b^2}{\alpha^2} - 1 \right) \exp\left(\frac{b^2}{2\alpha^2}\right) \right]. \quad (10)$$

Проекцию напряженности  $E_x$  приводим для любого момента времени  $t \geq 0$ :

$$E_x = \text{Re} \left\{ \frac{\sqrt{\hbar c} \exp(S)}{4\pi^{3/4} \alpha^{3/2} \zeta^2} \left[ -\frac{q\pi \exp(Q)}{(-q^2)^{1/4}} (2\zeta F_1 + qF_2) - (1-i)\sqrt{p} (2\zeta F_3 - pF_4) \exp(P) + 2(1-i)(ct)^{3/2} F_5 \exp(R) \right] \right\}, \quad (11)$$

где

$$b = \pm \alpha^2 k_0 + iz, \quad \zeta = z - i\alpha^2 k_0, \quad p = ct + \zeta, \\ q = ct - \zeta, \quad P = -\frac{p^2}{4\alpha^2}, \quad Q = -\frac{q^2}{4\alpha^2}, \quad R = -\frac{c^2 t^2}{4\alpha^2},$$

$$S = -\frac{\alpha^2 k_0^2}{2},$$

$$F_1 = (1+4Q) [I_{-1/4}(Q) + I_{1/4}(Q)] + 4Q [I_{-3/4}(Q) + I_{3/4}(Q)],$$

$$F_2 = I_{-1/4}(Q) + I_{1/4}(Q) + I_{-3/4}(Q) + I_{3/4}(Q),$$

$$F_3 = (1+4P) K_{1/4}(P) - 4P K_{3/4}(P),$$

$$F_4 = K_{3/4}(P) - K_{1/4}(P), \quad F_5 = K_{3/4}(R) - K_{1/4}(R);$$

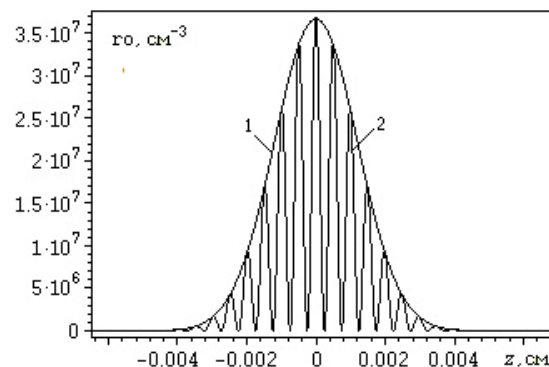
$I_\nu$  и  $K_\nu$  – функции Бесселя мнимого аргумента. При  $t=0$  формула (11) имеет существенно более простой вид, приведенный в [19].

На рисунке линией 1 показана плотность вероятности при  $t=0$  для излучения лазера длительностью  $\tau_{rad} = 80$  фс с центральной длиной волны  $\lambda_0 = 10$  мкм, при которых  $\alpha = 0,00169$  см находится из соотношения  $\Delta E \Delta t \approx \hbar/2$ , где  $\Delta t$  полагается  $\tau_{rad}/2$ , а  $\Delta E$  вычисляется формулами квантовой механики фотона.

Также линией 2 изображена «классическая» плотность вероятности

$$\rho_{P, class}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \frac{E_x^2}{4\pi} \frac{1}{E}, \quad (12)$$

определенная как половина отношения классической плотности энергии  $w_{class} = (E_x^2 + H_y^2)/8\pi$  к средней энергии  $\bar{E}$  фотона. Деление на 2 учитывает, что в (12) усреднение по периоду колебаний плотности энергии не производится.



Таким образом, квантово-механическая плотность вероятности является огибающей линией максимумов «классической» плотности.

**Связь структуры волновой функции фотона в координатном представлении с поляризацией фотона в формализме квантовых амплитуд перехода**

Строго говоря, понятия напряженностей электромагнитного поля к отдельному фотону непри-



менимы в силу того, что они являются понятиями «чисто» классической электродинамики. Однако в квантовой электродинамике они все же используются как источники процедуры вторичного квантования поля, а также при формальном описании состояний фотонов (так называемых мод) и амплитуд переходов фотонов из одного состояния в другое. Одной из характеристик мод является поляризация фотона. Само по себе это понятие может мыслиться как некоторое квантовое число, являющееся обычным атрибутом квантовой механики. Однако когда анализируются однофотонные и двухфотонные интерференционные явления, то, по сути, используется язык именно классической электродинамики. Например, пропуская фотоны через поляризатор, ориентированный определенным образом, добиваются изменения «поляризации» фотона и его вероятности прохождения в соответствии с законом Малюса. Этот закон строго установлен лишь в классической электродинамике, а в квантовой – постулируется. Его, кстати, с другой стороны, можно формально обосновать и в рамках квантовой физики, основываясь на квантовой механике фотона [20]. Очевидно, когда говорят о линейной поляризации, например горизонтальной или вертикальной, в состоянии запутанных фотонов (и суперпозиции в этом состоянии), то подразумевают, в первую очередь, ориентацию плоскости, в которой «должен колебаться, будучи рассматриваемым в классической электродинамике, вектор напряженности электрического поля». И хотя к фотону напряженность поля неприменима, она тем не менее по факту, таким образом, используется в некотором метафизическом смысле.

Возникает вопрос, можно ли придать этому понятию некий «более физический смысл», чем «просто» метафизический? Ответ – положительный. Действительно, в один из полных наборов физических величин, характеризующих состояние свободного фотона, входят его энергия, импульс и спиральность [12, 14]. Состоянию фотона с определенной спиральностью в классической электродинамике соответствует поляризованная по кругу волна. А линейной поляризации классической волны в квантовой механике не соответствует ни одна величина, которая бы входила в какой-нибудь полный набор и имела бы определенное значение в состоянии с «линейной поляризацией» фотона. Но тогда возникает вопрос, как характеризовать, например, волновой пакет (2) с коэффициентами (5)? Среднее значение спиральности фотона в этом состоянии равно нулю – это все, что можно утверждать, используя лишь квантовые характеристики. Можно еще добавить, что векторы поляризации были выбраны в виде (6), (7), и они тоже,

очевидно, характеризуют состояние фотона (2). Однако гораздо проще сказать, что извлекаемая, определенной процедурой, «напряженность электрического поля» из всех формул (2), (5), (6), (7) имеет только одну («почти») ненулевую компоненту –  $E_x$ . Она и может служить дополнительной характеристикой состояния фотона, выражающей собой некое свойство «его поляризации», отвечающее линейной поляризации классической волны. Ее возможности, «адекватность» и «правомерность» проиллюстрированы выше.

Можно ли сконструировать волновой пакет, в котором средняя спиральность снова была бы равна нулю, и волновой пакет ничем бы не отличался от предыдущего, кроме того, чтобы фотон в этом состоянии характеризовался лишь одной («почти») ненулевой компонентой  $E_y$ ? Ответ – снова положительный. Для этого надо выбрать векторы поляризации в следующем виде:

1) при  $0 \leq \theta \leq \pi/2$

$$\tilde{e}_I(\mathbf{k}) \equiv \begin{pmatrix} \tilde{e}_{Ix} \\ \tilde{e}_{Iy} \\ \tilde{e}_{Iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ 1 - (1 - \cos \theta) \sin^2 \varphi \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{pmatrix};$$

$$\tilde{e}_{II}(\mathbf{k}) \equiv \begin{pmatrix} \tilde{e}_{IIx} \\ \tilde{e}_{IIy} \\ \tilde{e}_{IIz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \theta - (1 - \cos \theta) \sin^2 \varphi \\ (1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \theta \cos \varphi \end{pmatrix}; \quad (13)$$

2) при  $\pi/2 < \theta \leq \pi$

$$\tilde{e}_I(\mathbf{k}) \equiv \begin{pmatrix} \tilde{e}_{Ix} \\ \tilde{e}_{Iy} \\ \tilde{e}_{Iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(1 + \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ 1 - (1 + \cos \theta) \sin^2 \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \end{pmatrix};$$

$$\tilde{e}_{II}(\mathbf{k}) \equiv \begin{pmatrix} \tilde{e}_{IIx} \\ \tilde{e}_{IIy} \\ \tilde{e}_{IIz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \theta + (1 + \cos \theta) \sin^2 \varphi \\ -(1 + \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \theta \cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (14)$$

В этом случае напряженность  $E_y$  будет снова определяться формулой (11) для точек для оси  $z$  в состоянии фотона (2) с коэффициентами (5).

Таким образом, будем полагать, что формулы (13), (14) задают горизонтальную ( $H$ ) поляризацию, а (6), (7) – вертикальную ( $V$ ) в состоянии фотона (2).

### Волновая функция двух фотонов в запутанном состоянии

Источником двух запутанных фотонов обычно является нелинейный кристалл, на который падает луч лазера. В результате спонтанного параметрического рассеяния на выходе возникают два ко-

нуса поляризации  $H$  и  $V$ , несущие пары фотонов в запутанном состоянии (бифотоны). В частном случае, состояние, наиболее запутанное по поляризациям фотонов, описывается вектором

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{2}(|H\rangle_1|m\rangle_1 \cdot |H\rangle_2|n\rangle_2 + |H\rangle_1|n\rangle_1 \cdot |H\rangle_2|m\rangle_2 + |V\rangle_1|m\rangle_1 \cdot |V\rangle_2|n\rangle_2 + |V\rangle_1|n\rangle_1 \cdot |V\rangle_2|m\rangle_2), \quad (15)$$

где номера 1 и 2 относятся к первому и второму фотону одной пары,  $|m\rangle$  и  $|n\rangle$  описывают пространственные состояния в первом и втором пучке. Переходя к волновой функции системы в координатном представлении, каждой из восьми одночастичных мод, содержащихся в (15), следует сопоставить волновую функцию в виде волнового пакета (2) с гауссовским, например, распределением (5) по импульсам и соответствующим выбором векторов поляризации. При этом следует, во-первых, учесть, что в (15) одночастичные моды означают состояния фотона с определенным импульсом и поляризацией, а волновой пакет (2) для каждого фотона является суперпозицией плоских волн. Состояние (2) можно сколь угодно близко приближать к плоской волне, устремляя параметры  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  к бесконечности. Во-вторых, в (15) состояния  $|m\rangle$  и  $|n\rangle$  образуют ортонормированный базис для каждого фотона в отдельности. Для осуществления этого свойства при записи одночастичной волновой функции, соответствующей каждой из восьми мод в (15), вида  $|H\rangle_1|m\rangle_1$ ,

$|H\rangle_2|n\rangle_2$  и т.д., можно волновой пакет (2) дополнить множителем  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  – для состояния  $|m\rangle$  и

$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  – для  $|n\rangle$ . Поскольку функция (2) является 6-компонентной, получающаяся конструкция с таким дополнительным множителем будет иметь 12 комплексных компонент.

Запишем волновую функцию двух запутанных фотонов в координатном представлении, полагая, что при  $t=0$  их средние значения координат ( $x, y, z$ ) соответственно равны  $(0, -y_0, 0)$  и  $(0, y_0, 0)$ , средние значения проекций импульсов ( $p_x, p_y, p_z$ ) равны  $(0, -\hbar k_{0y}, \hbar k_{0z})$  и  $(0, \hbar k_{0y}, \hbar k_{0z})$  и определяют направления соответствующих осей пучков  $|m\rangle$  и  $|n\rangle$ ; ось симметрии всей системы совпадает с осью  $z$ . Пусть пучок  $|m\rangle$  формирует  $H$ -поляризацию, а  $|n\rangle$  –  $V$ -поляризацию. Тогда для пучка  $|m\rangle$  следует выбрать формулы (13) и (14), а для пучка  $|n\rangle$  – (6) и (7). В результате, в случае  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \equiv \alpha$ , что соответствует одинаковому (гауссовскому) разбросу проекций импульса для каждого фотона, получаем для первого и второго множителя в первом слагаемом в (15):

$$\Psi_{Hm}^{(\pm)}(\mathbf{r}_1, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sqrt{\frac{\alpha^3}{\sqrt{\pi}}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \int \exp \left[ -\frac{\alpha^2}{2} (k_x^2 + (k_y \mp k_{0y})^2 + (k_z \mp k_{0z})^2) + i(\mathbf{k}\mathbf{r}_1 \mp kct - k_y y_0) \right] \begin{pmatrix} \tilde{e}_{\pm 1}(\mathbf{k}) \\ \tilde{e}_{\mp 1}(\mathbf{k}) \end{pmatrix} d^3\mathbf{k},$$

$$\Psi_{Hn}^{(\pm)}(\mathbf{r}_2, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sqrt{\frac{\alpha^3}{\sqrt{\pi}}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \int \exp \left[ -\frac{\alpha^2}{2} (k_x^2 + (k_y \pm k_{0y})^2 + (k_z \mp k_{0z})^2) + i(\mathbf{k}\mathbf{r}_2 \mp kct + k_y y_0) \right] \begin{pmatrix} \tilde{e}_{\pm 1}(\mathbf{k}) \\ \tilde{e}_{\mp 1}(\mathbf{k}) \end{pmatrix} d^3\mathbf{k}.$$

Двум множителям второго слагаемого в (15) будут соответствовать функции

$$\Psi_{Hn}^{(\pm)}(\mathbf{r}_1, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sqrt{\frac{\alpha^3}{\sqrt{\pi}}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \int \exp \left[ -\frac{\alpha^2}{2} (k_x^2 + (k_y \pm k_{0y})^2 + (k_z \mp k_{0z})^2) + i(\mathbf{k}\mathbf{r}_1 \mp kct + k_y y_0) \right] \begin{pmatrix} \tilde{e}_{\pm 1}(\mathbf{k}) \\ \tilde{e}_{\mp 1}(\mathbf{k}) \end{pmatrix} d^3\mathbf{k},$$

$$\Psi_{Hm}^{(\pm)}(\mathbf{r}_2, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sqrt{\frac{\alpha^3}{\sqrt{\pi}}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \int \exp \left[ -\frac{\alpha^2}{2} (k_x^2 + (k_y \mp k_{0y})^2 + (k_z \mp k_{0z})^2) + i(\mathbf{k}\mathbf{r}_2 \mp kct - k_y y_0) \right] \begin{pmatrix} \tilde{e}_{\pm 1}(\mathbf{k}) \\ \tilde{e}_{\mp 1}(\mathbf{k}) \end{pmatrix} d^3\mathbf{k}.$$

Последующие 4 множителя будут отличаться от 4-х предыдущих лишь заменой векторов поляризации  $\tilde{e}_{\pm 1}(\mathbf{k})$  и  $\tilde{e}_{\mp 1}(\mathbf{k})$ , определяемых формулами (13), (14), на соответствующие векторы  $e_{\pm 1}(\mathbf{k})$  и  $e_{\mp 1}(\mathbf{k})$ , задаваемые формулами (6), (7).

Складывая все 4 слагаемых в соответствии с (15), получаем волновую функцию в координатном представлении, нормированную на единичную вероятность, описывающую состояние двух запутанных фотонов сразу после их вылета из кристалла момента их неразделения по разным волоконным каналам.

## Список литературы

1. Davydov A.P., Zlydneva T.P. The Young's interference experiment in the light of the single-photon modeling of the laser radiation // Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016) [Электронный ресурс]. Tomsk: Atlantis Press, 2016. P. 208–215. URL: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/itsmssm-16/25856147>. (дата обращения: 08.01.2019).
2. Davydov A.P., Zlydneva T.P. The Modeling of the Young's Interference Experiment in terms of Single-photon wave function in the coordinate representation // Proc. of the IV International research conf. "Information technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine" (ITSMSSM 2017) [Электронный ресурс]. Tomsk: Atlantis Press, 2017. P. 257–265. URL: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/itsmssm-17/25887885>. (дата обращения: 08.01.2019).
3. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Об интерференции света с точки зрения волновой функции фотона в координатном представлении // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 75-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. Т. 2. С. 109–112.
4. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Моделирование и анализ волновой функции фотона при квантовомеханическом объяснении опыта Юнга // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: сб. науч. тр. I всерос. науч. конф. Ч.1. Тольятти: Изд-во Качалин А.В., 2017. С. 66–74.
5. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Интерференция электромагнитных волн с точки зрения волновой функции фотона в координатном представлении // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 8. С. 27–40.
6. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Моделирование классической и квантовой плотностей вероятности обнаружения фотона фемтосекундного лазерного излучения // Физика конденсированного состояния и ее приложения: сб. тр. всерос. науч.-практ. конф. Т. II. Уфа: Изд-во РИЦ БашГУ, 2018. С. 214–220.
7. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Однофотонная интерференция света в терминах волновой функции фотона в координатном представлении // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. Т. 10. №1. 156–162.
8. Davydov A.P., Zlydneva T.P. On the wave-particle duality within the framework of modeling single-photon interference // J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 1399. Pap. 02219. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/2/022019.
9. Bialynicki-Birula I. On the Wave Function of the Photon // Acta Phys. Pol. A. 1994. V. 86. P. 97–116
10. Давыдов А.П. Квантовая механика фотона // Наука и школа: тезисы XXXIII науч. конф. МГПИ. Магнитогорск: Изд-во МГПИ, 1995. С. 206–207.
11. Bialynicki-Birula I. Photon Wave Function // Progress in Optics / edited by E. Wolf (North-Holland, Elsevier, Amsterdam, 1996). V. XXXVI. P. 248–294.
12. Давыдов А.П. Волновая функция фотона в координатном представлении // Вестник МаГУ. Вып. 5. Магнитогорск: МаГУ, 2004. С. 235–243.
13. Давыдов А.П. О волновой функции фотона в координатном представлении в терминах электромагнитных потенциалов // Современные проблемы науки и образования: материалы L внутривузовской научной конференции преподавателей МаГУ. Магнитогорск: МаГУ, 2012. С. 228–229.
14. Давыдов А.П. Квантовая механика фотона: волновая функция в координатном представлении // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. Т. 20. № 5. С. 43–61.
15. Mignani R., Recami E., Baido M. About Diraclike Equation for the Photon, According to Ettore Majorana // Lett. N. Cim. 1974. V. 11. No 12. P. 568–572.
16. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Однофотонный подход к моделированию короткоимпульсного лазерного излучения // Вестник науки и образования Северо-Запада России [Электронный ресурс]. 2015. Т.1. № 4. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2015/11/2015-№4-Давыдова.pdf> (дата обращения: 19.03.2019).
17. Davydov A., Zlydneva T. Modeling of short-pulse laser radiation in terms of photon wave function in coordinate representation // Приборостроение, электроника и телекоммуникации: сб. статей I междунар. форума ИЕЕТ-2015 [Электронный ресурс]. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2016. URL: <http://pribor21.istu.ru/proceedings/ИЕЕТ-2015.pdf> (дата обращения: 16.02.2019).
18. Davydov A.P., Zlydneva T.P. On the reduction of free photons speed in modeling of their propagation in space by the wave function in coordinate representation // 2016 13<sup>th</sup> International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE – 2016). Novosibirsk: Novosibirsk state technical university, 2016. V. 1. Part 2. P. 233–240.
19. Davydov A.P., Zlydneva T.P. Space-Time Probability Density of Detection of a Photon in Laser Beam of the Femtosecond Range // 2018 14th International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 44894 proceedings. – Novosibirsk: Novosibirsk state technical university, 2018. V. 1. Part. 4. P. 58–69. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545314.
20. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Обоснование закона Малюса в рамках квантовой механики фотона // Инженерная физика. 2019. № 7. С. 13–16.

## Сведения об авторе

**Давыдов Александр Петрович** – канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. физики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. <https://orcid.org/0000-0002-2819-3372>. E-mail: ap-dav@yandex.ru

**Злыднева Татьяна Павловна** – канд. пед. наук, доц., доц. каф. ПМИИ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. E-mail: tapazl@yandex.ru

---

---