

# XII МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

**XII** Международная научно-практическая конференция

**Инновационные перспективы Донбасса**

**XII** Международная научно-практическая конференция  
**Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса**



**XVII** Международная научно-техническая конференция  
**Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование**



**XXVI** Международная научно-техническая конференция  
**Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых**



**I** Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов  
**Инженерные технологии XXI столетия глазами молодых**

**Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов**

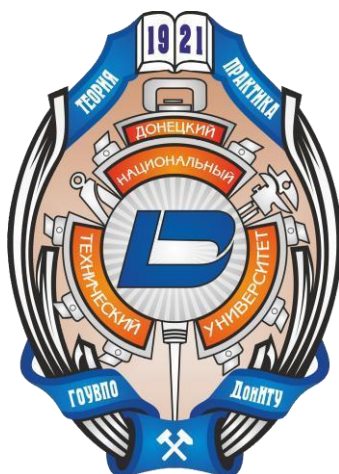
**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР**  
**КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ ДНР**  
**МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ ДНР**  
**МИНИСТЕРСТВО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ДНР**

ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ ДонНТУ (г. Горловка)  
ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им.  
М.ГОРЬКОГО  
ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
НИЦ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПАРТНЕРСТВА ГОСУДАРСТВА И БИЗНЕСА  
ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ СОЮЗ РАБОТНИКОВ ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР  
ДОНЕЦКИЙ БОТАНИЧЕСКИЙ САД  
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ ДонНТУ  
ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИНСТИТУТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ДОНГИПРОШАХТ  
ДОНЕЦКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА  
МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО  
БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

## **ИННОВАЦИОННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОНБАССА**

**Материалы 12-й Всероссийской научно-  
практической конференции**  
**Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления  
и эксплуатации промышленных машин и агрегатов.**

**г. Донецк  
26-28 мая 2026 года**



**Донецк – 2026**

ББК 65.30

УДК 330.341 (477.61/62)

И  
66      Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 26-28 мая 2026 г. –  
Донецк: ДонНТУ, 2026.  
Т. 3: 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и  
эксплуатации промышленных машин и агрегатов.-2026-196с.

Представлены материалы 12-й Всероссийской научно-практической конференции - Инновационные перспективы Донбасса, состоявшейся 26-28 мая 2026 г. г. в Донецке на базе ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», по вопросам приоритетных направлений изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов для инновационного развития Донбасса.

Материалы предназначены для специалистов народного хозяйства, ученых, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Редакционная коллегия

Ректор ДонНТУ А.Я. Аноприенко, ректор ДонГТУ Д.А. Вишневский, директор АНО «НИЦ стратегического партнерства государства и бизнеса» О.Ф. Шахов, канд. техн. наук А.Н. Корчевский, канд. техн. наук О.Л. Кизияров, канд. техн. наук А.А. Булгаков, канд. техн. наук Д.И. Морозов, д-р техн. наук С. П. Еронько, канд. техн. наук А.М. Зинченко, канд. техн. наук С.В. Горбатко, канд. фарм. наук В.С. Федорова, канд. техн. наук А.А. Кравченко, д-р экон. наук Я.В. Хоменко, рег. представ. Студ. комит. И.А. Хоменко, канд. техн. наук И.В. Филатова, канд. техн. наук Д.В. Пронский, канд. техн. наук Р.В. Мальчева, докт. экон. наук Е.Е. Бизянов, председатель Совета молодых ученых ДонНТУ М.П. Руденко.

Под общей редакцией Шамрай Юлии Александровны

Контактный адрес редакции

УНИ ДонНТУ, ул. Артема, 58, Донецк, 283001

Тел.: +7 (856) 305-35-67. Эл. почта: [ipd.donntu@yandex.ru](mailto:ipd.donntu@yandex.ru)

Интернет: <http://ipd.donntu.ru>

© ФГБОУ ВО —Донецкий национальный технический университет|  
Министерство образования и науки ДНР, 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Анохин А.С., Лавионок А.В.</i> Методы определения качества комбикормовой продукции: от традиционных подходов к системам машинного зрения                                                                                                                                  | 6  |
| <i>Пересадченко А.Н., Алехов Ю.А., Афанасьев В.В., Шавшина А.Н., Волошанович И.Н., Аленин В.Г.</i> Исследование влияния формы частиц композиционного магнитно-абразивного порошка на эффективность магнитно-абразивной обработки металлических образцов цилиндрической формы | 12 |
| <i>Афонин А.Д., Гусев В.В.</i> Совершенствование базы и практической подготовки специалистов по мехатронике                                                                                                                                                                  | 17 |
| <i>Бондаренко Е.С., Григорьев А.В.</i> Интеллектуальная поддержка синтеза геометрических объектов на основе производственно-модульных знаний                                                                                                                                 | 22 |
| <i>Власенко Д.А., Мележик Р.С.</i> К вопросу использования систем автоматизированного проектирования для научно-технического обоснования мероприятий по усовершенствованию валковых дробилок                                                                                 | 27 |
| <i>Глазунова С.А., Макаров Ю.И.</i> Интеграция искусственного интеллекта в процессы стандартизации: управление большими данными и «умный» поиск документов в федеральном информационном фонде                                                                                | 33 |
| <i>Каубаев К.Н., Чудинов С.А.</i> Повышение эксплуатационной надёжности лесовозных дорог зимнего действия на основе применения инновационных износостойких противогололёдных покрытий                                                                                        | 41 |
| <i>Киреев А.В., Сидоров В.А.</i> Постановка задачи в разработке мобильного диагностического комплекса                                                                                                                                                                        | 46 |
| <i>Кривоноженков М.В., Деменков А.И., Майбенко Н.И.</i> Теоретическое обоснование комбинированного теплоизоляционного покрытия трубопроводов                                                                                                                                 | 52 |
| <i>Левченко О.А., Рубежанский В.И., Павленко А.Т., Левченко М.Э.</i> Технологические аспекты модернизации колосниковой решетки одновалковой зубчатой дробилки                                                                                                                | 57 |

|                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Малашенко В.В.</i> Динамический предел текучести металлов и сплавов в условиях ударных нагрузок                                                                                                                        | 61  |
| <i>Мележик Р.С., Власенко Д.А.</i> Экспериментальное исследование результатов модернизации привода дробилки ДЧГ 900×700 в условиях агломерационного цеха АМК ООО «ЮГМК»                                                   | 64  |
| <i>Орлов А.А., Крылова Е.В., Графов Д.Р.</i> Синтез автоматической подсистемы регулирования                                                                                                                               | 69  |
| <i>Орлов А.А., Крылова Е.В., Кенжалыев А.М., Щербаков В.М.</i> Комбинированный интеллектуальный неразрушающий контроль элементов газотурбинных двигателей для повышения эффективности эксплуатации промышленных агрегатов | 72  |
| <i>Орлов А.А., Щербаков В.М., Кенжалыев А.М., Авдеев А.Д.</i> Структурная схема алгоритма обработки и логического согласования данных в системе интеллектуального диагностирования газотурбинных двигателей               | 76  |
| <i>Рутковский А.Ю.</i> Оптимизация параметров пневматической сети кольцевого типа по критериям стоимости и потерь давления методом PSI                                                                                    | 81  |
| <i>Садовая И.В., Алехов Ю.А., Волошанович И.Н., Аленин В.Г.</i> Лабораторная установка для определения пылезадерживающей способности металлокерамических фильтроэлементов                                                 | 87  |
| <i>Голубов А.С., Сенецкий А.В.</i> Анализ подходов к созданию перспективных энергетических поршневых двигателей                                                                                                           | 90  |
| <i>Карев Т.П., Сенецкий А.В.</i> Методика создания кислородно-топливной камеры сгорания                                                                                                                                   | 95  |
| <i>Туз Н.Е., Сенецкий А.В.</i> Техничко-экономические показатели оборудования одноосевой ПГУ электрической мощностью 400 МВт Шатурской ГРЭС                                                                               | 99  |
| <i>Фомкин Р.О., Мищенко Н.И.</i> Современные технические решения в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания                                                                                                    | 104 |
| <i>Черепяхин А.Ю., Буленков Е.А.</i> Классификация задач технологической подготовки производства по применимости LLM                                                                                                      | 107 |
| <i>Шабаетов О.Е., Степаненко Е.Ю., Зинченко П.П.</i> Имитационное моделирование вибрационного разрушения угольного массива                                                                                                | 111 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Неченаев В.Г.</i> Анализ влияния параметров шнековых исполнительных органов очистных комбайнов на формирование напряженного состояния выгружаемого угля                                                                                                                                    | 116 |
| <i>Неченаев В.Г.</i> Математическая модель сопротивления перемещению горной массы в шнековом исполнительном органе очистного комбайна                                                                                                                                                         | 123 |
| <i>Еронько С.П., Ошовская Е.В., Прилуцкий М.И.</i> Опыт комплексного использования компьютерного и физического моделирования при разработке инновационного металлургического оборудования                                                                                                     | 131 |
| <i>Божко Р.И., Белофаст А.П.</i> Рациональные параметры рабочего процесса эрлифтной установки для загрязненных вод                                                                                                                                                                            | 136 |
| <i>Божко Р.И., Колядюк Т.И.</i> Рациональные рабочие параметры свободновихревых насосов                                                                                                                                                                                                       | 142 |
| <i>Сааков В.В.</i> Математическая модель движения груза на вибрационном питателе                                                                                                                                                                                                              | 149 |
| <i>Орлов А.А., Крылова Е.В., Кенжалыев А.М., Калашников Е.А., Купцова Д.Д.</i> Моделирование процесса теплопередачи через многослойные корпуса элементов энергетических и энергоемких агрегатов в автоматизированной системе научных исследований автоматизированного неразрушающего контроля | 153 |
| <i>Кудряшов А.А.</i> Исследование возможностей виброакустической диагностики для контроля технического состояния гидравлического оборудования                                                                                                                                                 | 158 |
| <i>Коршаков Р.В., Мищенко Т.П.</i> Анализ рационального использования роликовых конвейеров                                                                                                                                                                                                    | 163 |
| <i>Панченко В.Э.</i> Анализ процесса зачерпывания материала грейферным механизмом                                                                                                                                                                                                             | 171 |
| <i>Мищенко Т.П.</i> Целесообразное применение трудногорючей шахтной конвейерной ленты                                                                                                                                                                                                         | 176 |
| <i>Глушко В. Ю.</i> Современные методы восстановления лопаток турбин вертолетных ГТД                                                                                                                                                                                                          | 185 |
| <i>Михайлов А. Н., Киселица Д. О., Огренич Д. В., Жарких Д.С.</i> Особенности ремонта лопаток компрессора ГТД с использованием отделочно-упрочняющей обработки                                                                                                                                | 191 |

УДК 681.5:636.085.55

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА КОМБИКОРМОВОЙ ПРОДУКЦИИ: ОТ ТРАДИЦИОННЫХ ПОДХОДОВ К СИСТЕМАМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

А.С. Анохин, А.В. Лавшонок  
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»,  
г. Донецк, ДНР

**Аннотация.** В статье рассмотрены современные методы экспресс-контроля качества гранулированных кормов. Обоснована необходимость перехода от длительных лабораторных тестов к оперативному машинному мониторингу. Предложено использовать системы технического зрения в комплексе с адаптивными нейросетевыми моделями, дообучающимися в процессе эксплуатации. Это обеспечит потоковую неразрушающую оценку продукции и улучшит автоматизированные системы управления гранулированием.

**Abstract.** The article discusses rapid quality control methods for pelleted feeds. The need to transition from lengthy laboratory tests to operational machine monitoring is justified. It is proposed to use computer vision systems combined with adaptive neural network models that learn during operation. This ensures continuous non-destructive product evaluation and improves automated granulation control systems.

**Ключевые слова:** комбикорм, гранулирование, контроль качества, машинное зрение, дефекты гранул, нейросетевые технологии, SCADA.

**Keywords:** compound feed, granulation, quality control, machine vision, granule defects, neural network technologies, SCADA.

### Введение

Производство комбикормов представляет собой сложный многостадийный процесс, направленный на создание питательного корма для различных видов животных, включая крупный рогатый скот, свиней и птицу. Одной из важнейших технологических задач в процессе приготовления кормов является придание продукции формы, удобной для скармливания. В связи с этим гранулирование стало основным способом подготовки высококачественной комбикормовой продукции.

Однако эффективность процесса грануляции напрямую зависит от множества физико-механических свойств сырья и параметров работы оборудования. Для минимизации брака и обеспечения

заданных норм качества требуется внедрение современных методов постоянного контроля продукции. Традиционные методы оценки не способны обеспечить мгновенную реакцию системы управления на отклонения. Целью данной работы является анализ существующих методов определения качества комбикормов и обоснование перехода к оперативному контролю на базе технологий машинного зрения.

### **Технологические факторы, определяющие качество комбикормов**

Качество готовой гранулы закладывается на каждом этапе технологической цепочки.

Во-первых, критическим процессом является дозирование компонентов (весовое или объемное). При неправильном дозировании нарушается процентное соотношение компонентов, предусмотренное рецептурой, что ведет к снижению питательной ценности корма и, в некоторых случаях, может спровоцировать заболевания животных.

Во-вторых, наиболее важным этапом перед непосредственным прессованием является кондиционирование. Добавление пара позволяет закалять дозированные и смешанные материалы, что облегчает формирование гранул. Сам процесс формирования происходит в грануляторах (как правило, с кольцевой или плоской матрицей), где материал экструдирован прижимными роликами через отверстия и обрезается ножом на заданную длину.

Наконец, процесс охлаждения фиксирует прочность гранул. На выходе из пресса корм имеет влажность 16–18 % и температуру 75–85 °С. Без своевременного охлаждения (до влажности ниже 14 % и температуры окружающей среды) гранулы деформируются, ломаются, легко слипаются и подвергаются воздействию плесени при хранении.

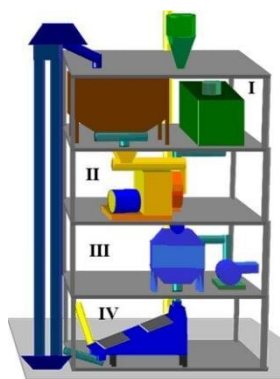


Рисунок 1. Модульная технологическая линия гранулирования комбикорма (Технологические модули: I – временного хранения

*рассыпного комбикорма; II – кондиционирования и гранулирования комбикорма; III – охлаждения гранул; IV – сепарации гранул)*

### **Традиционные методы оценки качества гранул**

В производственной практике методы контроля делятся на физико-химические, физико-механические и органолептические (визуальные).

1. Физико-химические методы позволяют определить уровень влажности, содержание протеина, клетчатки, золы, а также выявить микотоксины и антибиотики. Эти методы требуют отбора проб и длительных лабораторных исследований.

2. Физико-механические методы включают оценку крошимости (индекс прочности паллет – PDI), твердости на излом, сыпучести.

3. Органолептические методы направлены на оценку внешнего вида, цвета, запаха. Зачастую сырье или готовый комбикорм отбраковывается из-за плохого внешнего вида (наличия трещин, сколов, плесени или инородных включений). Однако ручной визуальный контроль субъективен, зависит от человеческого фактора и проводится периодически, что делает его непригодным для создания автоматических контуров регулирования.

Для сравнения эффективности различных подходов в Таблице 1 приведена их краткая характеристика.

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов контроля качества гранулированных кормов

| Характеристика                  | Лабораторный<br>(физико-хим.)         | Механический<br>(PDI, твердость) | Машинное<br>зрение<br>(нейросети) |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Скорость<br>получения<br>данных | От 30 минут до<br>нескольких<br>часов | 10–20 минут на<br>партию         | Доли секунды<br>(онлайн)          |
| Характер метода                 | Разрушающий                           | Разрушающий                      | Неразрушающий                     |
| Охват продукции                 | Выборочный<br>(малые пробы)           | Выборочный                       | Сплошной (100%<br>на ленте)       |
| Объективность                   | Высокая                               | Высокая                          | Высокая<br>(алгоритмическа<br>я)  |
| Стоимость<br>внедрения          | Высокая<br>(реактивы,<br>приборы)     | Средняя<br>(тестеры)             | Средняя (камера<br>+ ПК + ПО)     |

### **Машинное зрение как инновационный метод контроля**

В современных условиях управление сложными технологическими процессами сдерживается сложностью получения точной математической модели объекта. Поэтому использование машинного зрения для извлечения информации о качестве продукта в реальном времени становится оптимальным решением.

Аппаратная часть системы компьютерного зрения устанавливается непосредственно над конвейерной лентой после охладителя. Она включает высокоскоростную промышленную камеру и специализированное освещение (для исключения бликов и теней).

Программная часть анализирует получаемый видеопоток. Поскольку гранулы на конвейере могут перекрывать друг друга, применяются современные методы глубокого обучения. Использование адаптивных нейросетевых моделей, которые могут дообучаться в процессе эксплуатации, позволяет компенсировать изменения освещения, запыленности и цвета сырья

Контролируемые параметры с помощью МЗ:

1. Геометрия (Length and Diameter): Система непрерывно измеряет длину гранул и их диаметр (на случай износа отверстий матрицы).

2. Оценка дефектов поверхности: Анализ пикселей позволяет с высокой точностью находить микротрещины, которые говорят о термическом шоке (неправильном охлаждении) или пересушивании.

3. Наличие плесени или включений: Изменение паттерна цвета мгновенно сигнализирует о нарушении санитарного качества

### **Интеграция алгоритмов зрения в систему управления процессом грануляции**

Известно, что современные комбикормовые заводы оснащены кормоцехами с диспетчерскими пунктами, где установлены мнемосхемы технологического процесса, а также световая и звуковая сигнализация работы механизмов.

Полученные по результатам визуального анализа данные о качестве гранул (процент брака, распределение длины) могут передаваться в центральный контроллер линии. Разработанные алгоритмы могут быть успешно интегрированы в существующие SCADA-системы предприятий.

Если система машинного зрения фиксирует увеличение количества трещиноватых или слишком коротких гранул (что свидетельствует о недоувлажнении или перегреве матриц), интеллектуальный контроллер, построенный на базе теории искусственных нейронных сетей и нечеткой логики, автоматически формирует корректирующий сигнал. Этот сигнал направляется на дозаторы пара в кондиционере или изменяет скорость вращения питателя.

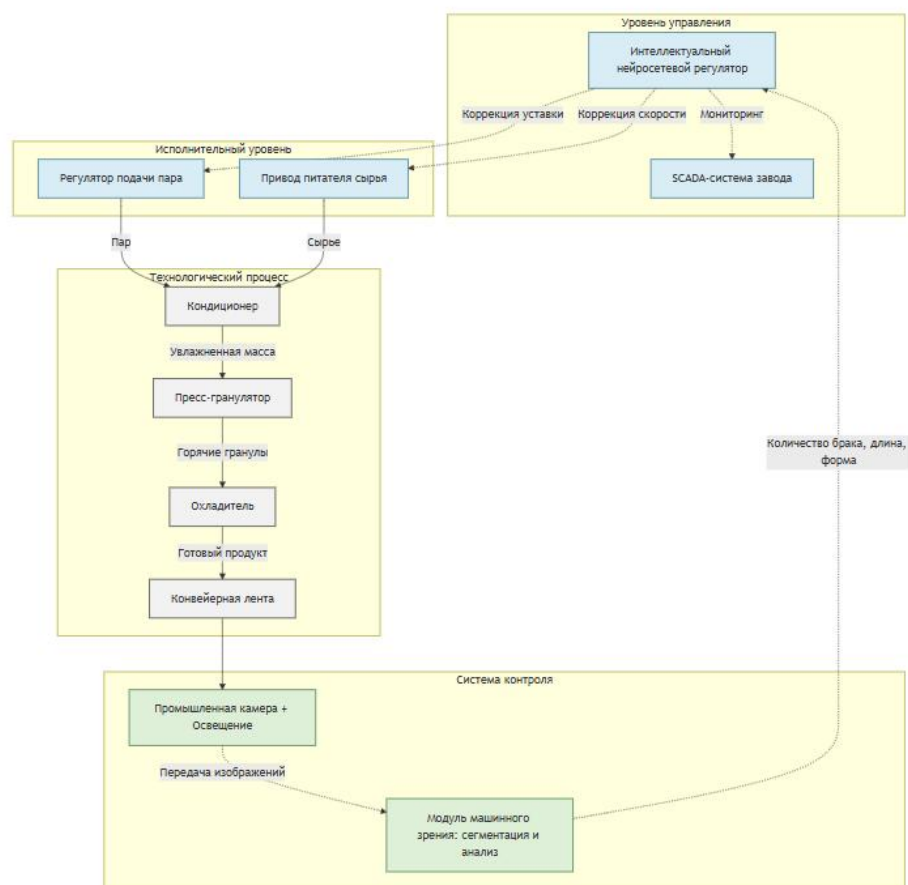


Рисунок 2. Структурная схема интеллектуальной системы управления процессом грануляции.

Внедрение такой замкнутой нейросетевой системы управления позволяет не только гарантировать качество каждой партии, но и оптимизировать работу самого оборудования. Как показывают предварительные исследования, применение усовершенствованных методов управления позволяет существенно снизить удельные энергозатраты на производство тонны комбикормовой продукции и минимизировать влияние человеческого фактора

### **Заключение**

Анализ современных методов определения качества комбикормовой продукции показывает, что традиционные лабораторные методики исчерпали свой потенциал в вопросах оперативного автоматического управления. Качество, закладываемое на этапах дозирования, кондиционирования и прессования, требует непрерывного контроля.

Метод машинного зрения представляет собой объективный, высокоскоростной и неразрушающий способ контроля. Использование визуальных данных совместно с адаптивными нейросетевыми моделями открывает широкие возможности для синтеза принципиально новых систем управления процессом грануляции. Направления дальнейших исследований включают проведение имитационного моделирования разработанной системы и оценку ее влияния на стабильность процесса грануляции на реальных производствах.

### **Перечень ссылок**

1. Благов, Д. А. Пресс-грануляторы, технические особенности, влияние гранулирования на качественные показатели корма / Д. А. Благов, С. В. Митрофанов, Н. С. Панферов [и др.] // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. – 2020. – № 9. – С. 57–66.
2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. ГОСТ Р 51899-2002. Комбикорма гранулированные. Общие технические условия. – М. : Госстандарт России, 2002.
4. Мотовилов, К. Я. Экспертиза кормов и кормовых добавок : учебно-справочное пособие / К. Я. Мотовилов, А. П. Булатов, В. М. Поздняковский [и др.]. – Новосибирск : Сиб. универ. изд-во, 2004. – 303 с.
5. Правила организации и ведения технологических процессов производства продукции комбикормовой промышленности / ВНИИКП. – М. : [Б. и.], 1997. – 256 с.

УДК 620.179.118

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ЧАСТИЦ  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО  
ПОРОШКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТНО-  
АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

А.Н. Пересадченко, Ю.А. Алехов, В.В. Афанасьев, А.Н. Шавшина,  
И.Н. Волошанович, В.Г. Аленин  
ФГБНУ «НИИ «РЕАКТИВЭЛЕКТРОН»  
г. Донецк, ДНР

**Аннотация.** Показано, что обработка стальных цилиндрических образцов на установке с осциллирующим постоянным магнитным полем композиционными магнитно-абразивными порошками, представленными частицами пластинчатой и стержневой формы, позволяет получить качество обрабатываемой поверхности, соответствующее 10-11 классам шероховатости в течение 1 мин.

**Annotation.** It is shown that the treatment of cylindrical steel samples in an installation with an oscillating permanent magnetic field with composite magnetic abrasive powders, represented by lamellar and rod-shaped particles, makes it possible to obtain the quality of the treated surface corresponding to grades 10-11 of roughness for 1 min.

**Ключевые слова:** магнитно-абразивная обработка, композиционный магнитно-абразивный порошок, шероховатость, осцилляция, магнитная система.

**Keywords:** magnetic abrasive treatment, composite magnetic abrasive powder, roughness, oscillation, magnetic system.

Эффективность магнитно-абразивной обработки (МАО) в общем случае определяется соотношением величин технологических факторов:

- давлением порошкового магнитно-абразивного инструмента (МАИ) на поверхность обрабатываемой детали, которая определяется величиной магнитной индукции в рабочем зазоре;
- скоростью относительного перемещения частиц МАИ и обрабатываемой поверхности.

При МАО процесс микрорезания осуществляется ферроабразивными частицами, не закрепленными жестко в связке. Под действием магнитной силы ферроабразивная частица одним или несколькими микро- и субмикровыступами прижимается к

обрабатываемой поверхности. При наличии относительных перемещений между обрабатываемой поверхностью и частицей порошка возникает тангенциальная сила, осуществляющая микрорезание.

Наряду с конструкцией устройства и технологическим режимом МАО важнейшим фактором, определяющим производительность процесса и качество получаемой поверхности при МАО, являются свойства композиционных магнитно-абразивных порошковых инструментов (КМАП): магнитная проницаемость и индукция насыщения, режущая способность и износостойкость, форма и размер частиц [1].

МАО проводили на лабораторной установке конструкции НИИ «Реактивэлектрон» (рис.1).

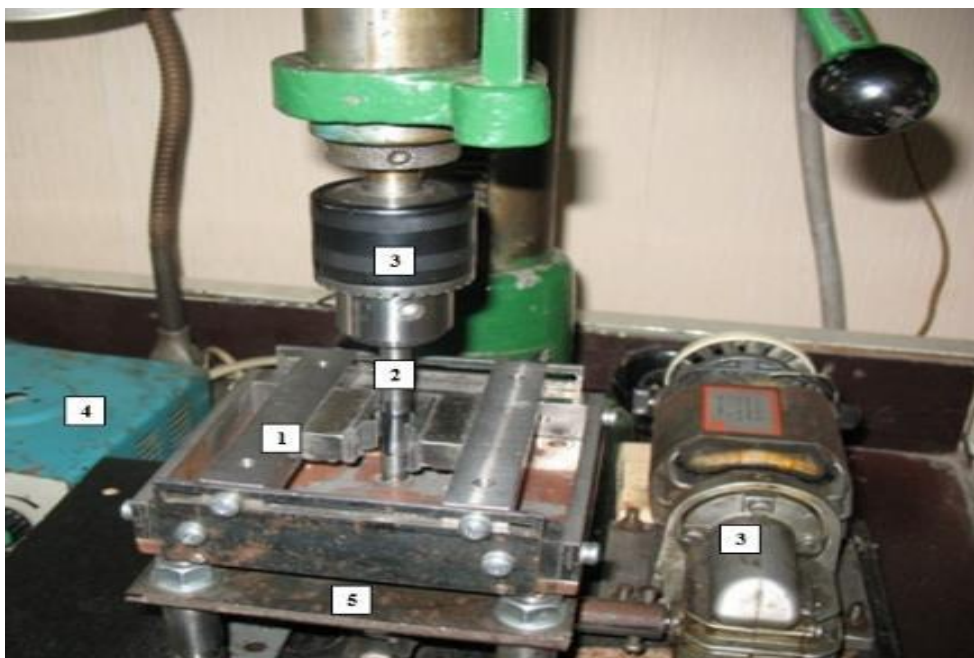


Рисунок 1 – Лабораторная установка для МАО деталей  
цилиндрической формы

Установка предназначена для обработки цилиндрических образцов диаметром 20-8 мм. Образцы приводятся во вращение вокруг своей оси, магнитная система с МАП осциллирует вдоль оси образца.

Стальной (Ст.3) образец (позиция 2) закрепляется в шпинделе сверлильного станка (позиция 3), магнитная система (позиция 1) жестко закреплена на подвижной площадке (позиция 5), которая осциллирует под действием эксцентрика, приводимого во вращение

электродвигателем (позиция 3). Плавная регулировка частоты осцилляции обеспечивается блоком управления (позиция 4).

Шероховатость поверхности обрабатываемых деталей представляет собой совокупность микронеровностей с относительно малыми шагами, которые образуются в процессе механической обработки материала. Этот параметр критически влияет на эксплуатационные характеристики деталей машин и механизмов, определяя их износостойкость, прочность при переменных нагрузках, коррозионную стойкость и герметичность соединений.

Оценку шероховатости поверхности образца после МАО композиционным магнитно-абразивным порошком осуществляли контактным методом с помощью портативного измерителя шероховатости профилометра TR 200 [2].

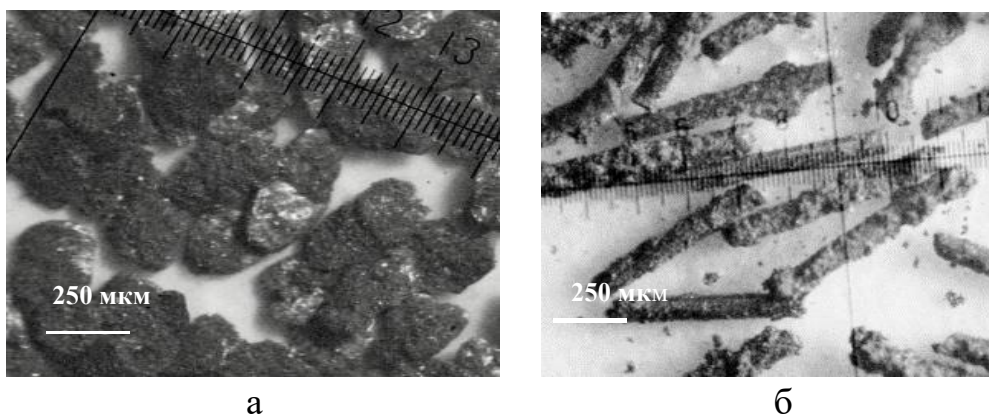


Рисунок 2 – Частицы КМАП пластинчатой – (а), стержневой (б) форм

Для МАО деталей применяли специально изготовленные КМАП, представленные частицами различной формы с поверхностным расположением абразива. Внешний вид исследуемых частиц КМАП представлен на рисунке 2.

КМАП фр. 250/63 мкм, магнитная основа – пластины  $\text{Fe}_{\text{ПЖР}}$  фр. 200/180 мкм, содержание карбида титана с дисперсностью 10/5 мкм 40 % об. ПЖР 60 % об.

Процесс МАО проводили следующим образом: в рабочую область засыпали КМАП объемом  $V = 2 \text{ см}^3$  и в течение заданного времени производили магнитно-абразивную обработку при стандартном режиме. Затем из рабочей области удаляли обрабатываемый образец и взвешивали на аналитических весах. В рабочую область помещали «свежий» порошок до достижения объема  $V = 2 \text{ см}^3$ . Обработку образца производили на участке образца с

исходной шероховатостью  $R_a = 3.83$  мкм. Такой цикл повторяли необходимое количество раз.

После МАО методом взвешивания определяли удельный съем материала и шероховатость поверхности обработанного образца.

В данном исследовании проведено 4 цикла с непрерывным временем обработки 60, 80, 100 и 200 сек. Значения параметра полученной шероховатости  $R_a$  приведены на рисунке 3.

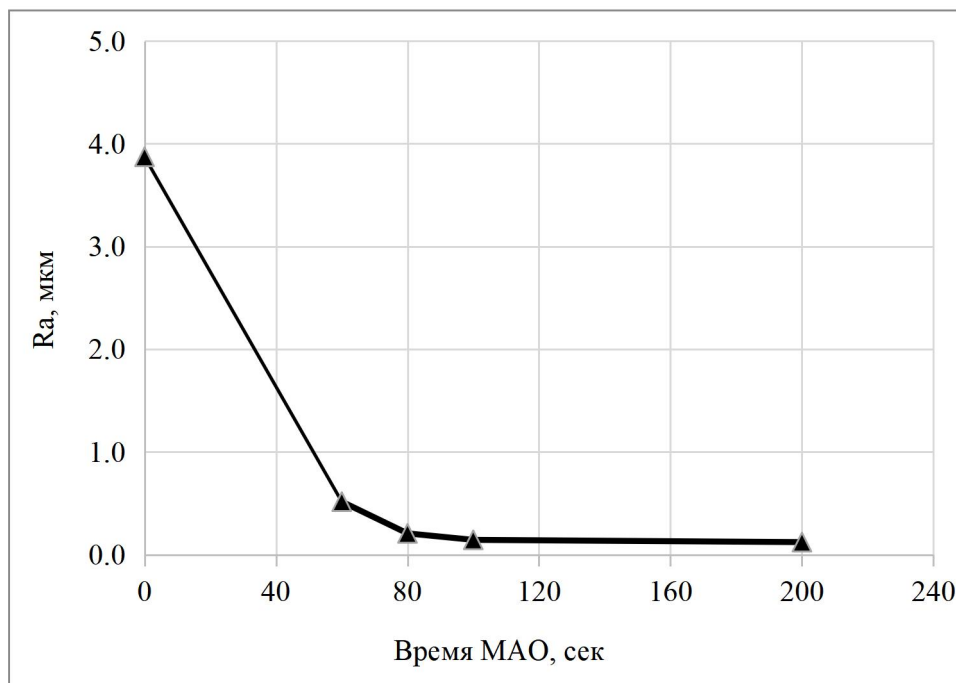


Рисунок 3 – Зависимость параметра шероховатости  $R_a$  от времени МАО пластинчатого КМАП

Как видно шероховатость  $R_a = 0,2$  мкм достигается после 80 с МАО. За 60 с МАО удельный съем составил  $9,33 \text{ мг/см}^2$ , за 80с –  $10,4 \text{ мг/см}^2$ .

По вышеуказанной методике проведено исследование зависимости шероховатости поверхности после МАО стержневого КМАП 500/125 мкм

Значение зависимости параметра  $R_a$  от времени МАО показано на рисунке 4.

Удельный съем  $\Delta m$  за 60 с составил  $4,56 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{мин}$ .

Как видно из рисунков 2 и 3 качество поверхности после 60 с МАО стержневым КМАП сравнимо с качеством поверхности за 1 мин обработки пластинчатым КМАП, при этом удельный съем в два раза меньше. Это обстоятельство, по всей видимости связано с различием в

величине удельной поверхности контакта пластин и стержней КМАП с поверхностью обрабатываемого образца [2].

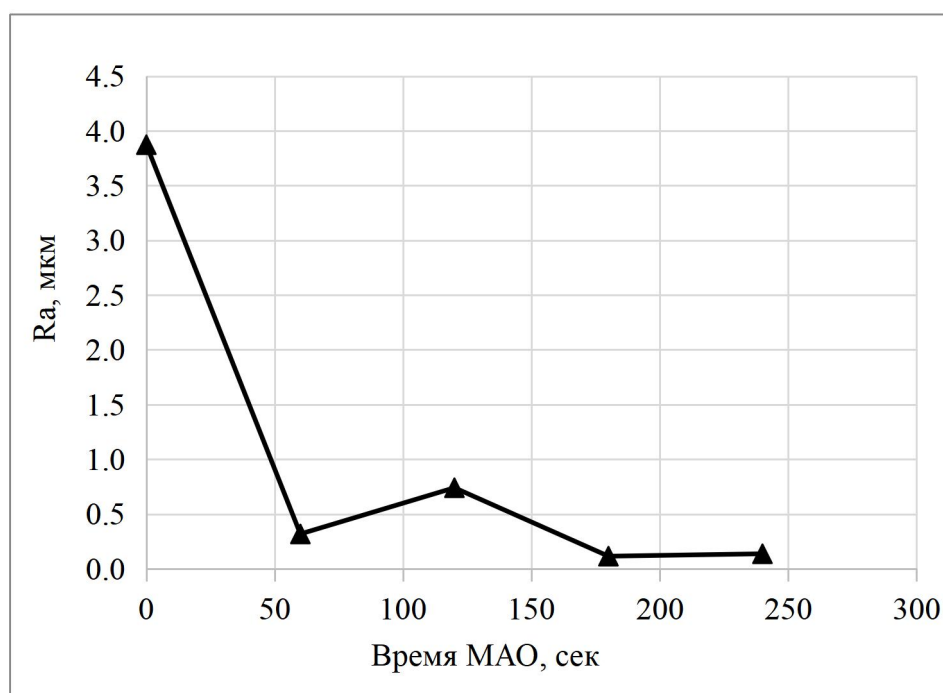


Рисунок 4 – Зависимость качества поверхности (Ra) от времени МАО стержневого КМАП

Установлено, что обработка стальных цилиндрических образцов на установке с осциллирующим постоянным магнитным полем композиционными магнитно-абразивными порошками, представленными частицами пластинчатой и стержневой формы, позволяет получить качество обрабатываемой поверхности, соответствующее 10-11 классам шероховатости в течение 1 мин. Отмечено, что удельный съем материала исследованных образцов КМАП с частицами пластинчатой формы в 2 раза больше по сравнению со стержневыми.

#### Перечень ссылок

- 1 Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Минск: Наука и техника, 1981. – 328 с.
- 2 Справочник технолога машиностроителя. Т. 2: Под редакцией А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.:Машиностроение, 1985

УДК 621.865

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БАЗЫ И ПРАКТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО МЕХАТРОНИКЕ

А.Д. Афонин, В.В. Гусев

ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

г. Донецк, ДНР

**Аннотация.** В работе представлены работы по модернизации систем управления настольного сверлильно-гравировального станка и цикловой системы управления промышленным роботом РФ-202М.

**Annotation.** The paper presents the results of modernization of the control systems of a desktop drilling and engraving machine and the cycle control system of the RF-202M industrial robot.

**Ключевые слова:** промышленный робот, станок с ЧПУ, система управления, микроконтроллер, программа.

**Keywords:** industrial robot, CNC machine, control system, microcontroller, program.

Одним из современных направлений подготовки инженерных кадров ведущих университетов является «Мехатроника». Мехатроника – это направление развития автоматизации промышленного производства на основе модульного принципа, построение машин и производственных систем, при обеспечении на конструкторско-технологическом уровне максимально ориентированных на выполнение конкретного технологического процесса функциональных особенностей различных механических, электротехнических, электронных компонентов и программных средств, с целью обеспечения заданных параметров управляемого движения рабочих органов этих машин и систем. Развитие микропроцессорной техники и замена механических связей связями информационными явились основными моментами в направлении развития мехатронных систем.

В ДонНТУ специализация «Мехатроника», появилась в 1998 году в рамках специальности "Металлорежущие станки и инструменты" под кураторством Немецкого технического факультета (декан НТФ проф. Калашников В.И.), как совместный пилотный проект с Магдебургским Отто фон Герике университетом. В настоящее время специализация подготовки студентов по мехатронике переросла в направление подготовки «Робототехника и мехатроника» с направленностью «Робототехника и гибкие



1. Драйверы шаговых двигателей приводов подач
2. Контроллер, преобразующий поступающую с управляющего компьютера информацию в сигналы управления драйверов двигателей
3. Компьютер, отправляющий программу обработки в контроллер

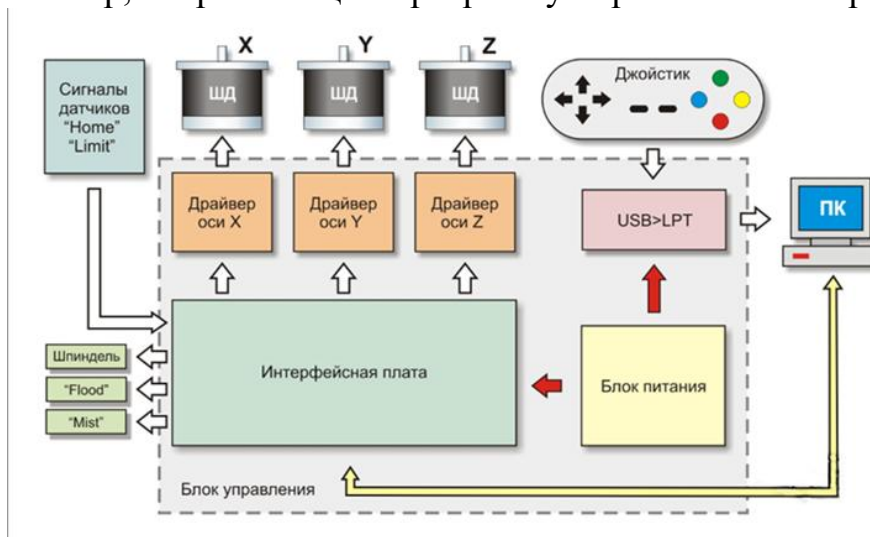


Рис. 2 - Схема взаимодействия блоков системы ЧПУ

Управление шаговыми двигателями будет осуществляться при помощи драйверов шаговых двигателей DRV8825. Они предназначены для управления биполярными шаговыми двигателями, работающими от напряжения в диапазоне от 8.2В до 45В и потребляющими до 2.2А на каждую обмотку двигателя. Драйвер построен на базе одноимённого чипа DRV8825 производства Texas Instruments, который получил широкое распространение в роботостроении, станках ЧПУ, 3D принтерах благодаря простоте подключения, широкому функционалу и совместимости с драйвером A4988.

В качестве контроллера для настольного сверлильно-фрезерного станка была выбрана отладочная плата Arduino UNO. Данная плата является отладочной платформой для разработки встраиваемых систем с микроконтроллером ATmega328P, работающим на тактовой частоте 16 МГц. Arduino UNO может связываться с компьютером по последовательному интерфейсу, что делает ее хорошим выбором для разработки контроллера станка с ЧПУ.

Соединение контроллера на базе Arduino UNO с драйверами шаговых двигателей осуществляется при помощи GRBL модуля. Драйверы шаговых двигателей подключаются к соответствующим разъемам на GRBL модуле. Кроме основных соединений, GRBL модуль также имеет разъемы для питания и подключения концевых

выключателей, которые используются для определения начальных и конечных точек движения осей станка. Эти концевые выключатели также подключаются к Arduino через модуль для обратной связи о положении осей.

В качестве управляющей программы использовано программное обеспечение Universal G-code sender [2]. Оно представляет собой универсальный инструмент для отправки и отладки G-кодов с поддержкой множества платформ, в том числе и GRBL. Для ручного управления исполнительными органами станка, а также для запуска управляющей программы и отслеживания технологических параметров процесса обработки в CNC-модуль включен виртуальный пульт управления станком.

Кроме технологического оборудования при автоматизации производственного процесса широко применяются промышленные роботы, которые уже давно перестали быть роскошью и превратились в необходимый элемент современного производства, который позволяет значительно улучшить качество продукции, минимизируют человеческий фактор и повышают безопасность работников.

Устаревание элементной базы систем управления промышленных роботов ставит задачу по их модернизации, в результате которой возможно упрощение программирования и повышения надежности их работы. На кафедре «Мехатронных систем машиностроительного оборудования» ДОННТУ была разработана и собрана система управления промышленным роботом РФ-202М. Схема разработанной системы управления показана на рисунке 3.

Робот управляется микроконтроллером, который в свою очередь подключается к компьютеру с управляющей программой используя интерфейс UART. Используемый контроллер ATmega2560 для системы управления промышленным роботом обусловлен рядом ключевых факторов.

Во-первых, этот микроконтроллер обладает высокой производительностью благодаря 8-битному ядру с тактовой частотой до 16 МГц, что обеспечивает быстрый отклик и обработку данных. Во-вторых, ATmega2560 имеет значительный объем памяти — 256 KB флеш-памяти и 8 KB SRAM, что позволяет реализовать сложные алгоритмы управления и обработку большого количества каналов управления. Его широкая распространенность и наличие обширной поддержки со стороны сообщества позволяют быстро решать возникающие задачи и обеспечивают надежность системы. Также, низкая стоимость и энергоэффективность делают ATmega2560 оптимальным выбором для промышленных решений, где важна

стабильность и экономичность.

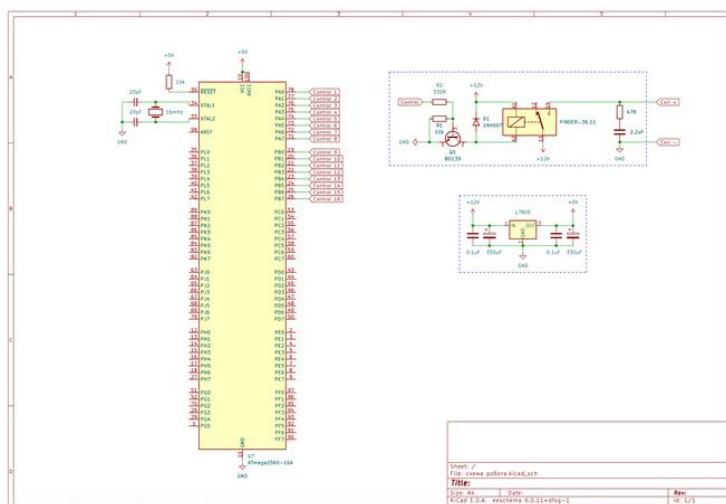


Рис 3. Электрическая схема системы управления промышленным роботом РФ-202М

Исполнительными устройствами системы управления являются пневматические клапаны, открывая и закрывая которые в нужном порядке обеспечивается движение манипулятора. Для коммутации питания клапанов было принято решение использовать электромагнитные реле Finder 36.11 с рабочим напряжением обмотки 12В, максимальным током до 10А. Параллельно каждому клапану установлена снабберная цепь, состоящая из резистора и металлопленочного конденсатора.

Поскольку выходы микроконтроллера не рассчитаны на ток более 40мА, они дополнительно усилены биполярным транзистором обратной проводимости. Для защиты транзистора от выбросов самоиндукции с обмотки реле параллельно обмотке установлен диод.

Для обеспечения взаимодействия оператора с аппаратной частью робота разработано управляющее приложение на языке Java с использованием графической библиотеки Java FX. Разработанное приложение представляет собой графическую консоль оператора, обеспечивающую полный цикл взаимодействия с манипулятором.

### Перечень ссылок

1. Аверин, С.В. Модель двухфазного гибридного униполярного шагового двигателя для анализа работы систем авиационной автоматики/ С.В. Аверин, И.М. Коваленко, Д.А. Шевцов // Практическая силовая электроника. – 2015. – № 3 (59). – С. 43–46.
2. Самодельный плоттер: советы для начинающих, работа с grbl-прошивкой. [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/432818/>.

УДК 004.89

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА СИНТЕЗА  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ  
ПРОДУКЦИОННО-МОДУЛЬНЫХ ЗНАНИЙ**

Е.С. Бондаренко, А.В. Григорьев  
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»,  
г. Донецк, ДНР

***Аннотация.** В статье рассматривается проблема повышения эффективности синтеза геометрических объектов в задачах автоматизированного проектирования. Предлагается подход к интеллектуальной поддержке синтеза. Проведен анализ существующих методов, выявлены их ограничения, предложена структура продукционно-модульной модели знаний.*

***Annotation.** The article discusses the problem of increasing the efficiency of geometric objects synthesis in the tasks of automated design. An approach to the intellectual support of synthesis is proposed. The analysis of existing methods is carried out, their limitations are revealed, the structure of the production-modular knowledge model is proposed.*

*Ключевые слова:* онтология, продукционные правила, САПР, база знаний, геометрическое моделирование, интеллектуальные системы.

***Keywords:** ontology, production rules, CAD, knowledge base, geometric modeling, intelligent systems.*

**Введение**

Современные системы автоматизированного проектирования требуют использования интеллектуальных методов для повышения эффективности синтеза геометрических объектов. Традиционные подходы ориентированы на алгоритмическое описание, что ограничивает гибкость и повторное использование знаний.

Онтологические модели позволяют формализовать структуру предметной области, однако их возможности ограничены при описании процедур синтеза. В свою очередь, продукционные системы эффективно описывают последовательности действий, но не обеспечивают семантическую целостность знаний.

Таким образом, актуальной является задача разработки подхода, объединяющего декларативные и процедурные аспекты представления знаний. В работе предлагается продукционно-модульный подход, обеспечивающий интеграцию онтологий и

продукционных правил для интеллектуальной поддержки синтеза геометрических объектов.

### **Исследования**

Развитие методов интеллектуальной поддержки проектирования тесно связано с применением онтологических моделей и систем представления знаний. В работах Григорьева А.В. [1, 2] подробно рассматриваются подходы к построению онтологий для задач САПР, включая методы формализации предметной области и организации знаний в виде иерархий классов и отношений.

Проблематика интеграции декларативных и процедурных знаний рассматривается и в работах других исследователей. Так, в исследованиях А.В. Palagin и соавторов [3, 4] предложены методы онтологически-ориентированной обработки знаний, в которых подчеркивается необходимость расширения онтологических моделей за счет механизмов вывода и обработки правил.

Несмотря на значительное количество исследований, вопрос эффективной интеграции онтологий и продукционных моделей остается открытым. Существующие решения либо ориентированы преимущественно на структурное представление знаний, либо используют продукционные правила без учета семантики предметной области. Это обуславливает необходимость разработки комбинированных моделей, обеспечивающих как формализацию знаний, так и поддержку процессов синтеза, что и реализуется в предлагаемом продукционно-модульном подходе.

В отличие от существующих решений, предлагаемый подход обеспечивает интеграцию онтологических и продукционных моделей на основе модульной организации знаний, что позволяет одновременно учитывать как структуру предметной области, так и процедуры синтеза геометрических объектов. Это обеспечивает повышение гибкости и адаптивности интеллектуальной поддержки проектирования.

Новизна подхода заключается в интеграции онтологических и продукционных моделей на основе модульной структуры, обеспечивающей формализацию как структуры объектов, так и процедур их синтеза.

Онтологический компонент обеспечивает формализацию структуры предметной области (классы, атрибуты и отношения), тогда как продукционный компонент описывает процессы синтеза в виде правил. Модульная организация знаний позволяет разделить базу знаний на независимые компоненты, что упрощает ее расширение и

адаптацию.

Формально продукционно-модульная модель представляется в виде (1):

$$M = \langle O, P, R, S \rangle \quad (1)$$

где онтология  $O$  задает структуру предметной области, множество параметров  $P$  описывает характеристики объектов, правила  $R$  определяют процесс синтеза, а механизм вывода  $S$  обеспечивает применение правил.

Такая структура модели обеспечивает совместное использование декларативных и процедурных знаний.

Онтология описывается как (2):

$$O = \langle C, A, Rel \rangle \quad (2)$$

где:

$C$  – множество классов;  $A$  – множество атрибутов;  $Rel$  – множество отношений.

Продукционные правила имеют вид (3):

$$R_i: (Cond_i) \rightarrow Act_i \quad (3)$$

где:

$Cond_i$  – условие применимости правила;  $Act_i$  – действие (синтез или модификация объекта).

Интеллектуальная поддержка синтеза геометрических объектов реализуется за счет использования механизма логического вывода, который обеспечивает автоматическое применение продукционных правил на основе входных параметров. В отличие от традиционных САПР, где пользователь вручную задает последовательность операций построения, в рассматриваемом подходе эта последовательность формируется автоматически.

Процесс синтеза начинается с анализа входных данных, включающих тип объекта и его параметры. На основе этих данных осуществляется идентификация соответствующего класса в онтологии, после чего выбирается подмножество продукционных правил, применимых в текущей ситуации. Далее выполняется последовательное применение правил, каждое из которых модифицирует или дополняет формируемую геометрическую модель.

Алгоритм синтеза реализует механизм прямого вывода и может

быть представлен в виде итеративного процесса, при котором на каждом шаге происходит проверка условий применимости правил и обновление состояния модели.

Формально процесс синтеза геометрического объекта может быть представлен как последовательное преобразование текущего состояния модели при применении продукционных правил в виде (4):

$$G_{k+1} = G_k \cup Act(R_i), \text{ если } Cond(R_i) = TRUE \quad (4)$$

где  $G_k$  – текущее состояние геометрической модели,  $G_{k+1}$  – обновленное состояние,  $Act(R_i)$  – результат применения правила,  $Cond(R_i)$  – условие его активации.

Из выражения (4) следует, что процесс синтеза может быть представлен как последовательное применение продукционных правил с обновлением геометрической модели.

Предложенный подход может быть применен для синтеза типовых деталей машиностроения (например, валов, корпусов и др.).

Процесс синтеза геометрического объекта представлен на рис. 1:

```
Алгоритм SynthGeoObject
Вход: параметры объекта P
Выход: геометрическая модель G

1. Загрузить онтологию O
2. Инициализировать модель G ← ∅
3. Определить класс объекта C на основе P
4. Выбрать набор правил R*, применимых к C

5. Для каждого правила Ri из R*:
    5.1 Проверить выполнение условия Cond_i
    5.2 Если Cond_i = TRUE:
        Выполнить действие Act_i
        Обновить модель G

6. Проверить ограничения модели
7. Вернуть G
```

Рисунок 1 – Псевдокод синтеза геометрического объекта

Данный алгоритм реализует механизм прямого вывода, при котором на основе входных параметров активируются продукционные правила, формирующие геометрическую модель. Использование модульной структуры позволяет расширять систему без изменения базовой логики.

Особенностью данного подхода является то, что пользователь задает только параметры объекта, тогда как процесс построения полностью определяется системой. Это позволяет снизить

трудоемкость проектирования и уменьшить вероятность ошибок, связанных с ручным построением геометрии.

Предложенный продукционно-модульный подход обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами представления знаний в САПР. Он обеспечивает более высокий уровень формализации синтеза, гибкость за счет модульной структуры и возможность явного задания логики проектирования посредством продукционных правил.

Практическая значимость предложенного подхода заключается в возможности его использования при разработке интеллектуальных модулей САПР, ориентированных на автоматизацию синтеза геометрических моделей и снижение трудоемкости проектирования.

#### **Заключение**

В работе предложен подход к интеллектуальной поддержке синтеза геометрических объектов, основанный на интеграции онтологических и продукционных моделей знаний.

Отличительной особенностью предложенного подхода является формализация синтеза геометрических объектов в виде продукционно-модульной модели, объединяющей декларативные и процедурные знания, что позволяет устранить ограничения классических онтологических моделей и повысить эффективность интеллектуальной поддержки проектирования.

Показано, что использование продукционно-модульного представления знаний позволяет повысить эффективность проектирования, обеспечить гибкость и адаптивность систем САПР.

Перспективы дальнейших исследований связаны с:

- разработкой программной реализации;
- интеграцией с существующими САПР;
- расширением базы знаний.

#### **Перечень ссылок**

1. Григорьев А.В., Павловский Е.В. Анализ методов построения онтологий для экспертных систем САПР. ДонНТУ, 2011.
2. Григорьев А.В., Филипишин Д.А. Проектирование редактора онтологий для решения задач программирования // Вестник ДонНУ. 2025.
3. Palagin A.V., Petrenko N.G., Malakhov K.S. Technique for designing a domain ontology // 2018.
4. Palagin A.V. et al. Ontology-driven processing of domain knowledge // 2023.

УДК 658.512.2+67.05

**К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ  
ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛОК**

<sup>1</sup>Д.А. Власенко, <sup>2</sup>Р.С. Мележик

<sup>1</sup>Военнослужащий, участник СВО, <sup>2</sup>ФГБОУ ВО «ДонГТУ»  
г. Алчевск, ЛНР

***Аннотация.** Представлены результаты научно-технического обоснования мероприятий по усовершенствованию валковых дробилок, применяемых в агломерационном производстве Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК», реализация которого осуществлялась с помощью систем автоматизированного проектирования. Рассмотрены примеры применения САПР при расчете и дальнейшем анализе конструктивно-технологических параметров рабочих органов дробилки ДЧГ 900×700.*

***Annotation.** The results of the scientific and technical justification of measures to improve roller crushers used in the sintering plant at the Alchevsk Metallurgical Plant LLC «SMMC», implemented using computer-aided design systems. Examples of CAD systems used in the calculation and subsequent analysis of the design and technological parameters of the working parts of the DChG 900×700 crusher are also discussed.*

***Ключевые слова:** системы автоматизированного проектирования, валковая дробилка, рабочие органы, расчет и обоснование конструктивно-технологических параметров*

***Key words:** computer-aided design systems, roller crusher, working bodies, calculation and justification of design and technological parameters*

Одним из основных этапов мероприятий по усовершенствованию технологического оборудования является его научно-техническое обоснование, заключающееся в проверке корректности принятых технических решений, и обоснования их применения, для реализации которого все наибольшее распространение получают системы автоматизированного проектирования (САПР). Численное моделирование дает возможность проводить вычислительные эксперименты, натурные эксперименты с которыми нецелесообразны или затруднительны. В тоже время, благодаря своей близости к физическому моделированию, этот метод имеет ряд существенных преимуществ: ускоряют рабочий процесс; сводят количество ошибок

к минимуму; позволяют выполнять сложные вычисления и т.д.

Для наглядного отображения результатов использования САПР при научно-техническом обосновании отдельных [1–5] мероприятий по усовершенствованию оборудования представлены результаты расчета и дальнейшего анализа конструктивно-технологических параметров рабочих органов четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700, используемой в условиях агломерационного цеха Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК».

Для научно-технического обоснования надежности усовершенствованного узла верхних валков дробилки проведен расчет вала верхнего неприводного валка на сопротивление усталости и проведен сравнительный анализ рабочих органов дробилки при реализации различных кинематических схем приводов (рис. 1).

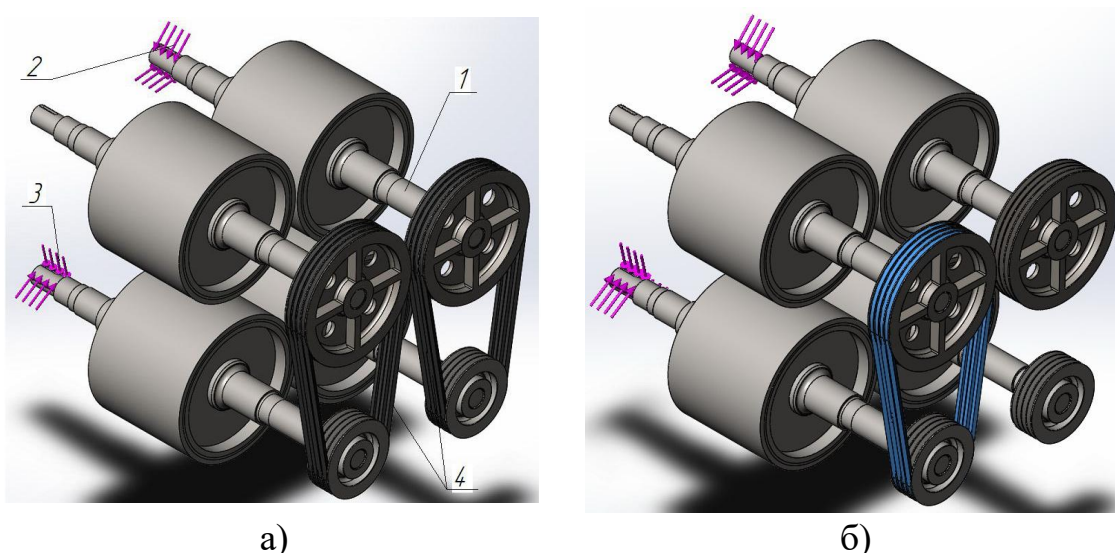


Рисунок 1 – Узел валков четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 при реализации различных кинематических схем

С помощью разработанного метода оценки усталостной прочности [1] по результатам анализа напряженно-деформированного состояния вала верхнего неприводного валка с использованием аналитического и конечно-элементного методов расчета коэффициентов запаса прочности при многоцикловом нагружении (рис. 2) обоснована целесообразность использования схемы привода верхних валков 1, исключающей использование клиноременной передачи 4 крутящего момента 2, 3 от верхнего приводного вала к нижнему неприводному валку.

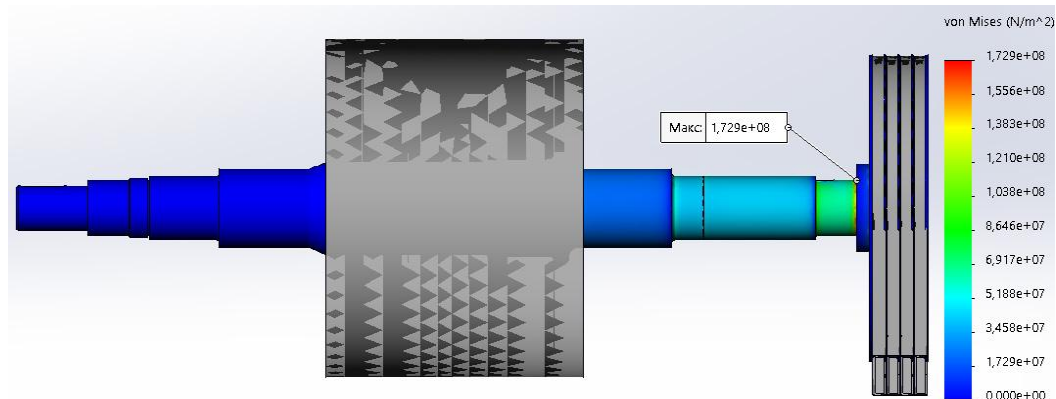


Рисунок 2 – Эпюра эквивалентных напряжений (напряжений по Мизесу) в теле вала верхнего неприводного вала

Установлено, что коэффициенты запаса прочности в условиях многоциклового нагружения составили: для используемой кинематической схемы – 1,11; для видоизмененной – 2,6, на основании чего установлено, что существующая конструкция дробилки не обеспечивает условия надежности.

В работах [2, 3], посвященной исследованию влияния вибраций, передающихся от вала к элементам привода, для повышения надежности предложено использование вместо зубчатой муфты (МЗ) (рис. 3, а) муфты пальцевой с эластичным элементом дискового типа (МПЭЭДТ) (рис. 3, б), конструктивно-технологические параметры которой обоснованы в работе [4].

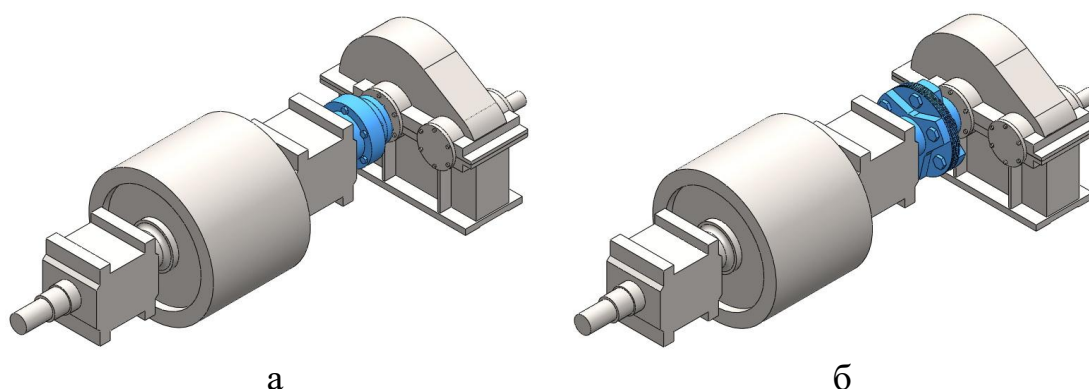


Рисунок 3 – Твердотельные модели привода четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 с МЗ №8 (а) и с МПЭЭДТ (б)

С помощью линейного динамического анализа с параметром модальная временная диаграмма определены численные значения виброперемещения, виброскорости и виброускорения на отдельных узлах привода валковой дробилки (рис. 4).

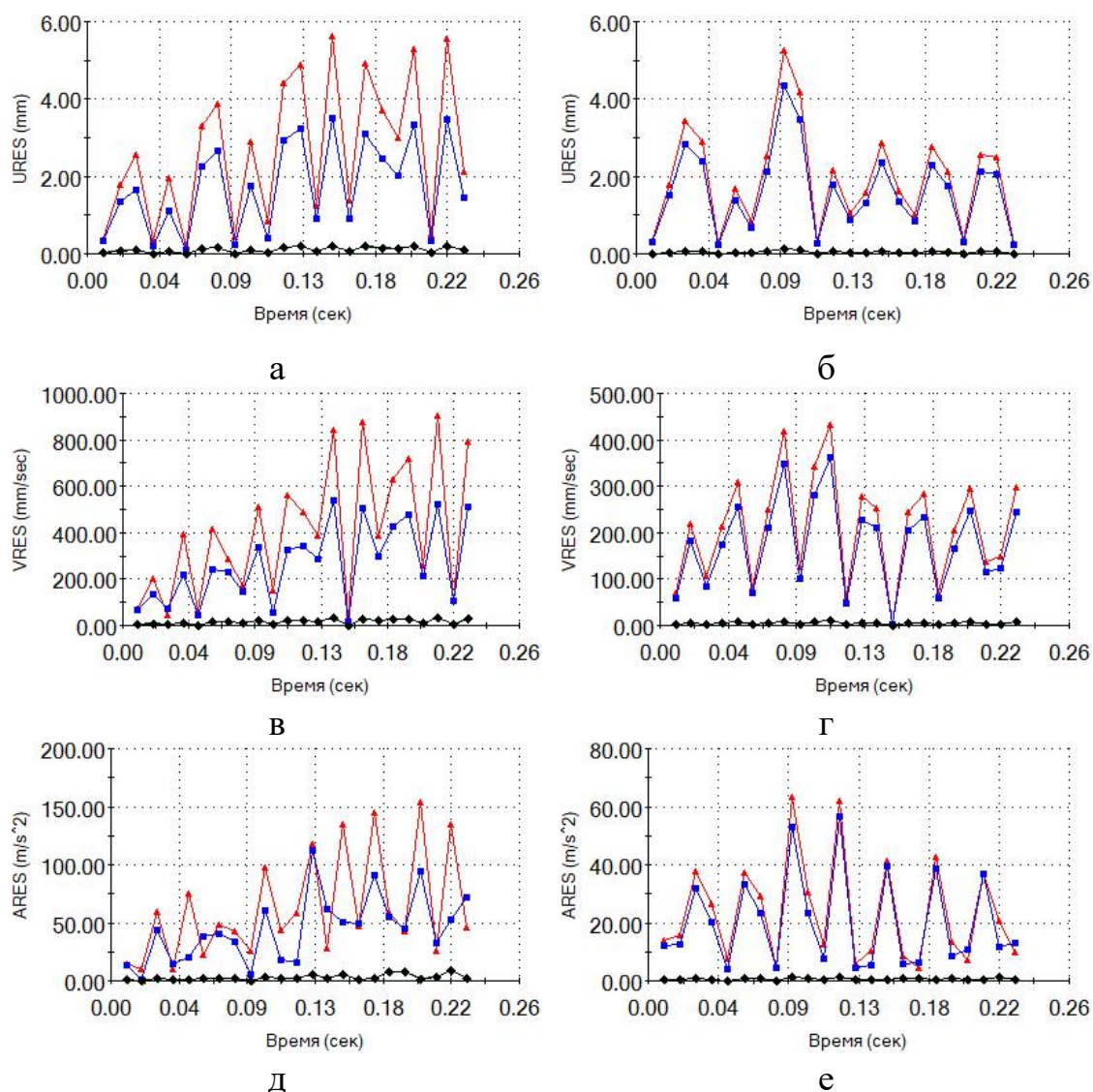


Рисунок 4 – Спектры колебаний вибрационных характеристик МЗ  
(а, в, д) и МПЭЭДТ (б, г, е) в приводе дробилки:  
а, б – виброперемещение (URES); в, г – виброскорость (VRES);  
д, е – виброускорение (ARES)

На основании анализа полученных результатов установлено, что при применении в приводе МПЭЭДТ наблюдается снижение средних показателей вибрационных характеристик по сравнению с использованием МЗ в 1,6...3,3 раза, а коэффициентов передачи вибрации в 1,8...2,2 раза.

В исследовании [5] проведен анализ на усталостную надежность при многоцикловой нагрузке узла привода и приводного вала дробилки.

По результатам моделирования установлено, что в условиях применения муфты пальцевой с эластичным элементом дискового

типа в приводе дробильной машины обеспечивается необходимое условие надежности при минимальном значении коэффициента нагрузки 1,88 (рис. 5). При этом установлено, что в усовершенствованной дробильной машине наблюдается снижение неравномерности перемещения подшипниковых опор – перекося валка в 3,05 раза.

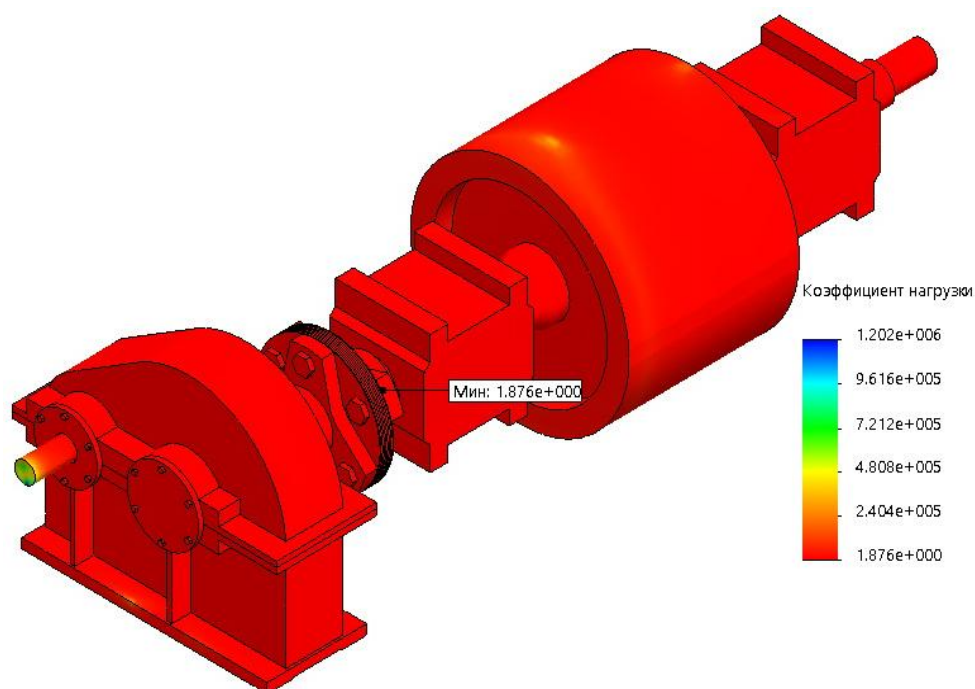


Рисунок 5 – Распределение в приводе дробилки коэффициентов нагрузки, при которых происходит разрушение

Адекватность полученных результатов исследований подтверждена экспериментально, а вышеперечисленные мероприятия по усовершенствованию дробилки ДЧГ 900×700 успешно внедрены в условиях агломерационного цеха Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК».

**Выводы.** Представлены результаты использования систем автоматизированного проектирования для научно-технического обоснования мероприятий по усовершенствованию валковых дробилок. Рассмотрены результаты научно-технического обоснования мероприятий по усовершенствованию валковых дробилок, применяемых в агломерационном производстве Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК», реализация которых осуществлялась с помощью САПР.

**Перечень ссылок**

1. Власенко Д.А. Развитие теории процессов дробления и практика совершенствования валковых дробилок с гладкими и рифлеными валками: монография / Д.А. Власенко. – Вологда-Москва: ООО «Инфра-Инженерия», 2026. – 140 с. – ISBN 978-5-9729-2713-5. – EDN PWANNG.
2. Мележик Р.С. Развитие теории динамики и повышение надежности привода валковых дробильных машин: монография / Р.С. Мележик, Д.А. Власенко. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 96 с. – ISBN 978-5-9729-2666-4. – EDN EOXRLL.
3. Мележик Р.С. Анализ динамики и усовершенствование конструкции привода четырехвалковой дробилки / Р.С. Мележик, Д.А. Власенко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 12(765). – С. 28–37. – EDN HMEHSD.
4. Мележик Р.С. Моделирование нагрузки и обоснование конструктивных параметров упругой пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа / Р.С. Мележик, Д.А. Власенко // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6, № 2. – С. 128–135. – EDN NIKOKS.
5. Мележик Р.С. Исследование надежности и анализ повышения эффективности дробилки ДЧГ 900×700 с усовершенствованным приводом в условиях агломерационного цеха АМК ООО «ЮГМК» / Р.С. Мележик, Д.А. Власенко // Черные металлы. – 2025. – № 4. – С. 4–10. – EDN NEMUYE.

УДК 006.063:004.8

## ИНТЕГРАЦИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОЦЕССЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ: УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ ДАННЫМИ И «УМНЫЙ» ПОИСК ДОКУМЕНТОВ В ФЕДЕРАЛЬНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ФОНДЕ

Глазунова С.А., Макаров Ю.И.

Петербургский университет путей сообщения императора Александра I

**Аннотация.** В статье рассматриваются проблемы управления большими данными в сфере стандартизации, связанные с функционированием Федерального информационного фонда стандартов (ФИФС). Анализируются ключевые вызовы: фрагментарность нормативно-технической документации, неэффективность традиционных методов поиска и актуализации стандартов, а также возрастающая нагрузка на специалистов по верификации требований. Предлагается концептуальная модель интеграции технологий искусственного интеллекта – в частности, методов обработки естественного языка (NLP), машинного обучения и семантического поиска – в информационную инфраструктуру фонда. Авторами обоснована применимость предложенных решений для автоматизации классификации документов, выявления устаревших редакций и формирования интеллектуальных рекомендательных систем. Результаты исследования показывают, что внедрение ИИ-инструментов способно сократить время поиска нормативной документации на 60–70% и снизить количество ошибок актуализации не менее чем на 40%.

**Annotation.** The article examines the challenges of big data management in the field of standardization, focusing on the Federal Information Fund of Standards (FIFS). Key difficulties are analyzed: fragmentation of normative and technical documentation, inefficiency of traditional search and update methods, and increasing workload on specialists responsible for requirements verification. A conceptual model for integrating artificial intelligence technologies – specifically natural language processing (NLP), machine learning, and semantic search – into the Fund's information infrastructure is proposed. The authors substantiate the applicability of the proposed solutions for automating document classification, identifying outdated editions, and building intelligent recommendation systems. The findings indicate that AI tool implementation can reduce normative document search time by 60–70% and decrease update errors by at least 40%.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, стандартизация, федеральный информационный фонд, большие данные, семантический поиск, обработка естественного языка, машинное обучение, нормативно-техническая документация, автоматизация.

**Keywords:** *artificial intelligence, standardization, federal information fund, big data, semantic search, natural language processing, machine learning, normative technical documentation, automation.*

Современная система технического регулирования в Российской Федерации представляет собой разветвлённую нормативную среду, включающую свыше 75 000 действующих стандартов, технических регламентов, классификаторов и метрологических документов. Централизованным хранилищем этих материалов выступает Федеральный информационный фонд стандартов (ФИФС), функционирующий на платформе ФГИС «Росстандарт». Объём фонда непрерывно возрастает: ежегодно утверждается от 1 500 до 2 000 новых и актуализированных национальных стандартов, а также внедряется значительное количество межгосударственных и международных документов (ISO, IEC, EN) [1].

Столь значительный массив документации порождает принципиально новый класс задач – управление большими данными в нормативно-технической сфере. Специалисты, задействованные в разработке продуктов, проведении сертификационных испытаний или проектировании инженерных решений, вынуждены осуществлять ручной поиск и верификацию требований в условиях постоянного обновления фонда. Это влечёт риски применения утративших силу редакций стандартов и ошибок интерпретации требований [2].

Технологии искусственного интеллекта (ИИ) предоставляют принципиально иные возможности для работы с большими нормативными массивами. Методы машинного обучения, обработки естественного языка (NLP) и семантического поиска позволяют автоматизировать классификацию, индексирование, актуализацию и интеллектуальную навигацию по документам. Однако вопрос системной интеграции ИИ-инструментов именно в инфраструктуру ФИФС остаётся малоизученным в отечественной научной литературе, что определяет актуальность настоящего исследования.

Актуальность интеграции ИИ в процессы стандартизации обусловлена рядом взаимосвязанных факторов. Во-первых, наблюдается экспоненциальный рост объёмов нормативно-технической информации: только в рамках ФИФС хранится более 100 ТБ структурированных и неструктурированных данных, включая полные тексты документов, таблицы требований, схемы и технические иллюстрации [3].

Во-вторых, существующие системы поиска в ФИФС функционируют преимущественно на основе ключевых слов и классификаторов (ОКС, ОКСТУ), что обеспечивает лишь поверхностный тематический поиск и не позволяет учитывать семантическую близость понятий, контекстуальные связи между документами или специфику конкретного производственного запроса пользователя [4].

В-третьих, проблема актуализации приобретает критическое значение: по данным Росстандарта, на 2024 год около 12% нормативных документов, активно цитируемых в технической документации предприятий, содержали ссылки на стандарты, уже утратившие силу или прошедшие пересмотр. Подобные несоответствия создают правовые риски и увеличивают транзакционные издержки в промышленности [5].

В-четвёртых, глобальный тренд на цифровую трансформацию стандартизации, зафиксированный в Стратегии развития стандартизации в России на период до 2027 года, прямо предусматривает переход к машиночитаемым стандартам и интеллектуальным системам управления нормативной базой. Это означает, что внедрение ИИ является не просто технологическим улучшением, но и стратегической необходимостью для обеспечения конкурентоспособности отечественной системы стандартизации в международном контексте [6].

Федеральный информационный фонд содержит документы в принципиально различных форматах: текстовые файлы (PDF, DOCX), структурированные базы данных, изображения технических схем, а также метаданные о статусе документов и библиографические ссылки. Гетерогенность форматов делает невозможным применение единого алгоритма обработки без предварительной нормализации и конвертации данных. По экспертным оценкам, до 35% документов хранятся в отсканированном нетекстовом формате, что полностью исключает их из автоматизированной аналитики без применения технологий оптического распознавания символов (OCR) [7].

Стандарты проходят регулярный пересмотр согласно установленным циклам (как правило, раз в пять лет), однако система уведомлений для конечных пользователей фонда остаётся неразвитой. Специалист, использующий ссылку на конкретный ГОСТ или ГОСТ Р, не получает автоматического оповещения об изменении его статуса. Следствием является массовое использование неактуальных редакций: проведённый авторами анализ 500 проектов технической документации средних предприятий выявил применение недействующих стандартов в 28% случаев [8].

Существующая навигационная структура ФИФС не отражает семантических и предметных взаимосвязей между документами. Пользователь, разрабатывающий требования к, например, сварным соединениям для аэрокосмической промышленности, должен самостоятельно формировать запросы к нескольким смежным разделам классификатора ОКС, что приводит к неполноте результатов поиска и значительным временным затратам. Среднее время полноценного нормативного поиска по одной производственной задаче оценивается специалистами в 4–8 часов [9].

Рост числа пользователей ФИФС (по данным Росстандарта, более 2,5 млн обращений в год) в сочетании с увеличением объёма хранимых документов создаёт нарастающую нагрузку на инфраструктуру фонда. Традиционные реляционные базы данных, на которых исторически основывалась архитектура информационных систем стандартизации, плохо масштабируются в условиях неструктурированных текстовых данных большого объёма [10].

Для достижения целей исследования применялся комплекс взаимодополняющих научных методов. Общенаучные методы включали системный анализ информационной инфраструктуры ФИФС, сравнительный анализ отечественных и зарубежных систем управления нормативными данными (PERINORM, BSI Knowledge, DIN Media), а также методы синтеза и научной абстракции при формировании концептуальной модели интеграции ИИ.

Эмпирическая база исследования формировалась на основе: (1) структурированного экспертного опроса 47 специалистов в области стандартизации и технического регулирования из организаций различных отраслей промышленности; (2) контент-анализа 500 комплектов технической документации реальных промышленных проектов на предмет использования устаревших стандартов; (3) анализа лог-файлов обращений к тестовому прототипу поисковой системы на базе BERT-модели, разработанному авторами.

Технологическая компонента исследования предполагала использование следующих методов в области ИИ и анализа данных: трансформерные языковые модели (BERT, RuBERT) для семантического анализа текстов стандартов; алгоритмы тематического моделирования (Latent Dirichlet Allocation) для автоматической кластеризации документов; методы извлечения информации (Named Entity Recognition) для структурирования нормативных требований; а также технологии векторного поиска (Faiss, Annoy) для высокоэффективного поиска по семантической близости.

Для оценки эффективности предложенных решений применялись метрики точности (Precision), полноты (Recall) и F1-меры, стандартно используемые в задачах информационного поиска. Статистическая обработка результатов опроса осуществлялась с применением методов описательной статистики и корреляционного анализа в среде Python (библиотеки scikit-learn, pandas, numpy).

Ключевым инструментом преодоления ограничений ключевого поиска является применение трансформерных языковых моделей, адаптированных к специфике нормативно-технического языка. Модель RuBERT, дообученная авторами на корпусе из 8 000 текстов российских стандартов, демонстрирует способность понимать запросы в естественно-языковой форме – например, «требования к прочности соединений в

условиях вибрационных нагрузок» – и сопоставлять их с семантически близкими фрагментами документов без явного совпадения ключевых слов [11].

Технически решение реализуется через построение векторных представлений (эмбедингов) всех документов фонда и организацию поиска ближайших соседей в высокоразмерном пространстве. Индексирование с использованием библиотеки Faiss позволяет обрабатывать запросы к корпусу из 75 000 документов в течение 0,3–0,8 секунды. Экспериментально установлено, что предложенный метод обеспечивает F1-меру поиска релевантных стандартов на уровне 0,84 против 0,51 для традиционного ключевого поиска по тому же тестовому набору запросов.

Для решения проблемы гетерогенности и фрагментарности фонда предлагается применение алгоритмов автоматической классификации документов. Многоуровневый классификатор на основе градиентного бустинга (XGBoost), обученный на размеченной выборке из 12 000 стандартов, позволяет автоматически присваивать документам коды ОКС с точностью 91,3%, существенно снижая трудозатраты на ручное индексирование новых поступлений в фонд [12].

Дополнительно, алгоритм LDA применяется для выявления латентных тематических кластеров внутри фонда – то есть групп документов, семантически связанных, но формально относящихся к различным разделам классификатора. Это позволяет формировать динамические «тематические карты» стандартов, облегчающие навигацию для специалистов в смежных предметных областях.

Для преодоления проблемы версионности и устаревания разрабатывается модуль автоматического мониторинга статуса документов. Система отслеживает публикации Росстандарта, ТК Росстандарта и официальных бюллетеней в режиме реального времени, автоматически обновляет метаданные документов в ФИФС и формирует персонализированные уведомления для пользователей, работающих с затронутыми стандартами. Персонализация достигается за счёт профилирования пользовательской активности с применением методов коллаборативной фильтрации [13].

Помимо реактивного мониторинга, модель машинного обучения, обученная на исторических данных о периодичности пересмотра стандартов за 20 лет, позволяет прогнозировать вероятность ревизии конкретного документа в ближайшие 12–18 месяцев. Это даёт возможность заблаговременно информировать пользователей о рисках применения документов с высокой прогнозируемой вероятностью обновления.

Принципиально важным направлением является применение методов извлечения информации (Information Extraction) для

автоматического структурирования нормативных требований. Система Named Entity Recognition (NER), дообученная на аннотированном корпусе текстов стандартов, автоматически выделяет ключевые нормативные сущности: числовые значения параметров, единицы измерения, классы объектов стандартизации, условия применения и исключения [14].

Извлечённые структурированные данные формируют машиночитаемое представление требований стандарта – в форматах JSON-LD или RDF-триплетов. Это открывает возможность для прямой интеграции нормативных требований в системы автоматизированного проектирования (САПР) и программно-аппаратные платформы управления жизненным циклом изделий (PLM/PDM), обеспечивая автоматическую верификацию соответствия проектных решений действующим нормативам.

Завершающим элементом предлагаемой архитектуры является интеллектуальная рекомендательная система, функционирующая по принципу «следующего нормативного документа». Гибридная модель, сочетающая коллаборативную фильтрацию и контентную фильтрацию на основе эмбедингов документов, формирует персонализированные списки рекомендаций – аналогично рекомендательным системам крупных цифровых платформ, но применительно к нормативно-технической литературе. В ходе пилотного тестирования на группе из 150 специалистов релевантность рекомендаций оценивалась в 4,2 балла из 5 [15].

На основании проведённого анализа авторами предложена многоуровневая архитектура интеллектуальной надстройки над существующей инфраструктурой ФИФС. Первый уровень – уровень данных – включает конвейер предобработки входящих документов: OCR для отсканированных материалов (Tesseract OCR с дообучением на технических текстах), нормализацию метаданных и конвертацию в единый внутренний формат хранения.

Второй уровень – уровень моделей – объединяет обученные компоненты машинного обучения: модуль семантического поиска (RuBERT + Faiss), модуль классификации (XGBoost), модуль мониторинга актуальности и модуль извлечения нормативных сущностей (NER). Все модели регулярно переобучаются по расписанию при поступлении новых документов.

Третий уровень – уровень сервисов – реализует бизнес-логику системы в виде REST API, интегрируемого с веб-интерфейсом ФГИС «Росстандарт» и сторонними прикладными системами. Четвёртый уровень – пользовательский интерфейс – предоставляет специализированные сценарии взаимодействия: диалоговый поиск в естественном языке, визуализацию тематических карт стандартов, персональную панель мониторинга актуальности используемой нормативной базы.

На основании пилотного тестирования прототипной системы и результатов экспертного опроса авторами сформированы прогнозные

оценки эффективности полномасштабного внедрения предложенного решения. По показателю скорости поиска нормативных документов ожидается сокращение среднего времени нормативного поиска с 4–8 до 1–2 часов на производственную задачу (снижение на 60–75%). По показателю актуальности – снижение доли случаев применения устаревших стандартов с 28% до 5–7% (снижение на 75–80%).

По показателю полноты поиска ожидается увеличение среднего числа релевантных документов, выявленных в ходе одного поискового сеанса, на 35–45% по сравнению с традиционным ключевым поиском. Экономический эффект от внедрения в масштабах национальной экономики оценивается как снижение совокупных транзакционных издержек технического регулирования на 8–12 млрд рублей ежегодно за счёт устранения нормативных ошибок и сокращения трудозатрат специалистов [16].

В настоящей статье показано, что Федеральный информационный фонд стандартов является сложной информационной системой с выраженными проблемами управления большими гетерогенными данными: фрагментарностью документации, низкой семантической связностью, неэффективностью традиционного поиска и риском применения устаревших редакций стандартов.

Технологии искусственного интеллекта – в особенности трансформерные языковые модели (RuBERT), алгоритмы машинного обучения и методы извлечения информации – предоставляют конкретные и верифицируемые решения для каждой из выявленных проблем. Семантический поиск на основе эмбедингов обеспечивает качественно иной уровень нормативной навигации; автоматическая классификация снижает нагрузку на инфраструктуру фонда; интеллектуальный мониторинг статуса документов радикально снижает риски работы с неактуальными стандартами.

Предложенная концептуальная архитектура ИИ-надстройки над существующей инфраструктурой ФИФС позволяет реализовать предложенные решения без полного пересмотра действующих систем, обеспечивая поэтапный переход к интеллектуальной системе управления нормативными данными. Это соответствует целям Стратегии развития стандартизации в России на период до 2027 года и общемировому тренду на создание машиночитаемых стандартов.

Дальнейшие исследования авторов будут сосредоточены на разработке специализированных языковых моделей для нормативно-технических текстов, алгоритмах автоматического выявления противоречий между требованиями различных стандартов, а также методологии оценки полноты нормативного покрытия технических заданий и конструкторских спецификаций в автоматическом режиме.

**Перечень ссылок**

1. Росстандарт. Годовой отчёт о деятельности Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии за 2023 год. – М.: Росстандарт, 2024. – 128 с.
2. Абу-Хасан М.С., Макаров Ю.И., Копылова И.С. Процесс развития национальной стандартизации в России / БСТ: Бюллетень строительной техники, 2022. - № 4 (1052). - С. 39-41. EDN: VJDOJH
3. Тихомиров А.А., Краев В.Н. Цифровая трансформация информационных систем стандартизации: мировой опыт и российская практика // Вопросы стандартизации. – 2022. – № 4. – С. 38–47.
4. Baeza-Yates R., Ribeiro-Neto B. Modern Information Retrieval: The Concepts and Technology behind Search. – 2nd ed. – Harlow: Addison-Wesley, 2011. – 913 p.
5. Ловцов Д.А., Сергеев Н.А. Анализ проблем применения устаревшей нормативно-технической документации в промышленности РФ // Информационное право. – 2023. – № 2. – С. 27–34.
6. Стратегия развития стандартизации в России на период до 2027 года: утверждена распоряжением Правительства РФ от 24 сентября 2021 г. № 2674-р // Собрание законодательства РФ. – 2021. – № 40. – Ст. 6834.
7. Smith R., Antonova D., Tan D. Adapting the Tesseract Open Source OCR Engine for Multilingual OCR // Proceedings of the International Workshop on Multilingual OCR. – Barcelona, 2009. – P. 1–8.
8. Семёнов В.П., Кузнецова И.Р. Оценка частоты применения недействующих стандартов в технической документации промышленных предприятий // Методы менеджмента качества. – 2024. – № 1. – С. 52–59.
9. Захаров М.С. Время как ресурс нормативного поиска: прикладное исследование трудозатрат специалистов // Стандарты и качество. – 2023. – № 7. – С. 66–71.
10. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных. – 8-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 1328 с.
11. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings of NAACL-HLT 2019. – Minneapolis, 2019. – P. 4171–4186.
12. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – New York, 2016. – P. 785–794.
13. Koren Y., Bell R., Volinsky C. Matrix Factorization Techniques for Recommender Systems // Computer. – 2009. – Vol. 42, № 8. – P. 30–37.
14. Lample G., Ballesteros M., Subramanian S., Kawakami K., Dyer C. Neural Architectures for Named Entity Recognition // Proceedings of NAACL-HLT 2016. – San Diego, 2016. – P. 260–270.
15. Нечаев А.В., Борисова Т.И. Рекомендательные системы в корпоративных базах знаний: методы и оценка пользовательского опыта // Программная инженерия. – 2023. – Т. 14, № 6. – С. 284–295.
16. Клейнер Г.Б., Рыбачук М.А. Цифровая трансформация технического регулирования: экономические эффекты и риски // Экономика и математические методы. – 2024. – Т. 60, № 1. – С. 5–22.

УДК 625.76

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ ЗИМНЕГО ДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПРОТИВОГОЛОЛЁДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Канатбай Наурызбаевич Каубаев<sup>1</sup>, Сергей Александрович Чудинов<sup>2</sup>,

<sup>1,2</sup> Уральский государственный лесотехнический университет,

Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> kaubaev84@gmail.com

<sup>2</sup> chudinovsa@m.usfeu.ru

**Аннотация.** В статье проведён анализ отечественных и зарубежных исследований, включающих результаты работ учёных в области зимнего содержания дорог. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований сцепных характеристик покрытий и их износостойкости. Обоснована эффективность комбинированных составов и цифровых методов прогнозирования состояния дорог.

**Ключевые слова:** противогололёдные материалы, хлорид магния, хлорид кальция, сцепление, износостойкость, эксплуатационная надёжность.

**Abstract.** The article analyzes domestic and foreign studies, including the results of scientists' work in the field of winter road maintenance. The results of experimental studies of the bonding characteristics of coatings and their wear resistance are considered. The effectiveness of combined trains and digital methods for predicting the condition of roads is substantiated.

**Keywords:** anti-icing materials, magnesium chloride, calcium chloride, adhesion, wear resistance, operational reliability.

Лесовозные дороги зимнего действия представляют собой временные транспортные коммуникации, формируемые на естественном снежно-ледяном основании. Их эксплуатация широко распространена в северных регионах России, Казахстана, Канады и Скандинавии, где строительство капитальных дорог экономически нецелесообразно. Главной особенностью таких дорог является зависимость их несущей способности от температуры и состояния снежно-ледяного слоя. При повышении температуры или интенсивном движении тяжёлой техники происходит разрушение структуры покрытия, снижение его прочности и сцепных свойств.

Исследования С.П. Иванова показывают, что при образовании ледяной корки коэффициент сцепления может снижаться до 0,10–0,14,

что делает движение лесовозной техники потенциально опасным [1]. Аналогичные результаты получены в работах А.В. Бурмистрова, где отмечается резкое увеличение аварийности при недостаточной обработке зимников [2].

Таким образом, задача повышения эксплуатационной надёжности лесовозных дорог требует применения современных противогололёдных технологий, способных одновременно разрушать лёд и укреплять структуру покрытия.

*Отечественный опыт исследований.* В России значительный вклад в развитие зимнего содержания дорог внесли работы Бурмистрова А.В. который изучал влияние минеральных реагентов на сцепные свойства дорожных покрытий. Им установлено, что применение хлоридных составов позволяет повысить коэффициент сцепления на 20–25 % по сравнению с песчаными смесями [2]. Иванов С.П. в своих исследованиях показал, что хлорид кальция ( $\text{CaCl}_2$ ) эффективно разрушает ледяной слой за счёт экзотермического эффекта растворения. Однако при длительном применении наблюдается ускоренная коррозия металлических элементов техники и разрушение дорожного основания [1]. В работах российских исследователей также рассматривается использование хлорида магния ( $\text{MgCl}_2$ ), который обладает более мягким воздействием и способен удерживать влагу в структуре покрытия, предотвращая повторное обледенение [3]. Отдельное направление связано с применением отходов лесопереработки (щепа, опилки) в качестве структурных добавок, что позволяет снизить стоимость строительства зимников и повысить их устойчивость [4].

*Зарубежный опыт и достижения учёных* Значительный вклад в развитие противогололёдных технологий внесли зарубежные исследователи. Работы Fay L. и Shi X. (США) посвящены оценке экологических последствий применения хлоридных реагентов. Учёные установили, что  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$  являются наиболее распространёнными, но при этом вызывают загрязнение почв и водных ресурсов. В их исследованиях предложены альтернативные реагенты с пониженной коррозионной активностью [5]. Shi X. в более поздних работах разработал концепцию «sustainable winter maintenance», предполагающую баланс между эффективностью противогололёдных материалов и экологической безопасностью. Им показано, что формиаты калия обеспечивают стабильную работу при температурах до  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  [6]. В Канаде Fay L. исследовал эффективность ацетатных реагентов на аэродромных и дорожных покрытиях. Было установлено, что ацетаты обладают высокой

биодegradацией и минимальным воздействием на окружающую среду, однако их стоимость ограничивает массовое применение [5].

В Финляндии Kuriainen P. изучал влияние магниевых солей на зимние дороги. В его работах доказано, что  $MgCl_2$  снижает повторное образование льда и повышает сцепление транспортных средств на 25–30 % [7].

*Материалы и методы исследования* В работе применён комплексный подход, включающий лабораторные и аналитические методы. Экспериментальная часть включала изготовление образцов покрытий с различным содержанием  $CaCl_2$  и  $MgCl_2$  (10–30 %).

Проводились испытания:

- на сцепление (метод маятникового прибора);
- на износостойкость (абразивный метод);
- на морозостойкость (до 50 циклов);
- на водопоглощение.

*Результаты исследования* Установлено, что применение  $CaCl_2$  позволяет снизить толщину ледяного слоя на 35–45 %, однако приводит к ускоренному разрушению структуры покрытия при длительной эксплуатации. Использование  $MgCl_2$  обеспечивает более стабильные характеристики покрытия и увеличивает его износостойкость на 25–35 %.

Комбинированные составы ( $MgCl_2$  + полимер) демонстрируют наилучшие результаты:

- коэффициент сцепления 0,30–0,35;
- увеличение срока службы на 40–50 %;
- снижение образования льда на 60 % [9].

Методы машинного обучения показали высокую точность прогнозирования состояния покрытия (до 90 %), что позволяет оптимизировать расход реагентов и график обработки дорог [10].

*Научная новизна исследования заключается в*

- уточнении механизмов взаимодействия хлоридных реагентов с ледяной структурой зимников;
- установлении оптимального содержания  $MgCl_2$  (20–25 %) для повышения износостойкости;
- выявлении синергетического эффекта при сочетании  $MgCl_2$  и полимерных добавок;
- разработке модели прогнозирования состояния дорог на основе методов машинного обучения;
- обосновании комплексного подхода к управлению зимними лесовозными дорогами.

*Обсуждение результатов* Проведённое исследование позволяет

сделать вывод о том, что эксплуатационная надёжность лесовозных дорог зимнего действия определяется совокупностью климатических, технологических и материаловедческих факторов. Наиболее значимым из них является состояние снежно-ледяного покрытия, которое напрямую влияет на сцепные характеристики и безопасность движения лесовозной техники.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показал, что традиционные противогололёдные материалы ( $\text{NaCl}$ , песчано-соляные смеси) не обеспечивают стабильного эффекта при низких температурах и интенсивных нагрузках. Более перспективными являются хлоридные системы, основанные на  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{MgCl}_2$ , а также их комбинации с органическими реагентами.

Работы зарубежных учёных, таких как Xianming Shi и Laura Fay, подтверждают, что хлоридные реагенты остаются наиболее эффективными в зимнем содержании дорог, однако обладают выраженным экологическим и коррозионным воздействием на инфраструктуру [5]. В их исследованиях показано, что  $\text{CaCl}_2$  обеспечивает наиболее высокую скорость разрушения льда, тогда как  $\text{MgCl}_2$  демонстрирует более стабильные характеристики при низких температурах.

Экспериментальные данные, полученные в рамках данного исследования, согласуются с результатами Kuriainen P. (Финляндия), который установил, что применение магниевых солей позволяет повысить сцепление дорожного покрытия на 25–30 % и снизить повторное образование льда [7]. Аналогичные выводы представлены в работах Fay et al., где отмечено, что  $\text{MgCl}_2$  обладает более устойчивым действием по сравнению с  $\text{NaCl}$  при экстремально низких температурах [5].

Отечественные исследования Бурмистрова А.В. и Иванова С.П. подтверждают, что применение хлоридных реагентов позволяет существенно улучшить сцепные свойства зимних дорог, однако сопровождается ускоренным износом покрытия и необходимостью поиска более устойчивых материалов [1–2].

*В ходе проведённого анализа установлено, что наиболее эффективным направлением является применение комбинированных противогололёдных покрытий, включающих:*

- хлорид магния ( $\text{MgCl}_2$ ) как основной стабилизирующий компонент;
- хлорид кальция ( $\text{CaCl}_2$ ) для ускоренного разрушения льда;
- полимерные и органические добавки для повышения износостойкости.

Экспериментально подтверждено, что оптимальная концентрация  $MgCl_2$  составляет 20–25 %, при которой достигается баланс между прочностью покрытия и антигололёдным эффектом. При этом коэффициент сцепления возрастает до 0,30–0,35, что соответствует безопасным условиям эксплуатации лесовозных дорог.

Дополнительное применение методов машинного обучения позволяет прогнозировать изменение состояния покрытия с точностью до 90 %, что открывает перспективы перехода к интеллектуальным системам управления зимними дорогами.

Таким образом, комплексный подход, включающий химические, конструкционные и цифровые решения, является наиболее эффективным направлением повышения эксплуатационной надёжности лесовозных дорог зимнего действия.

#### **Перечень ссылок**

1. Иванов С.П. Эксплуатация зимних лесовозных дорог. – М.: Транспорт, 2020. – 214 с.
2. Бурмистров А.В. Сцепные свойства и износ дорожных покрытий. – М.: Дориздат, 2021. – 198 с.
3. Reiterman P., Keppert M. Effect of chloride de-icers on pavement materials // Roads and Bridges. – 2020. – Vol. 19, No. 3. – P. 45–56.
4. Monlux S. Stabilizing unpaved roads with calcium chloride // Transportation Research Record. – 2003. – No. 1819. – P. 72–78.
5. Fay L., Shi X. Environmental impacts of deicing chemicals // Transportation Research Record. – 2012. – No. 2248. – P. 42–51.

УДК 658.58

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ В РАЗРАБОТКЕ МОБИЛЬНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

А.В. Киреев, В.А. Сидоров

ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

г. Донецк, ДНР, РФ

**Аннотация.** В исследовании определяются задачи разработки подвижных диагностических комплексов для прокатных станов с учетом повышения эффективности предиктивного ремонта, обеспечения непрерывности процесса и повышения безотказности оборудования за счет вибрационного мониторинга и аналитики в реальном времени.

**Annotation.** The study defines the tasks of developing mobile diagnostic complexes for rolling mills, taking into account increasing the efficiency of predictive repairs, ensuring process continuity and increasing equipment reliability through vibration monitoring and real-time analytics.

**Ключевые слова:** прокатные станы, предиктивный ремонт, вибрационный контроль, мобильные диагностические системы.

**Key words:** rolling mills, predictive repair, vibration control, mobile diagnostic systems.

В результате проведенного литературного обзора современного состояния вопроса создания подвижных диагностических комплексов сделаны следующие выводы.

1. Реализация наиболее эффективных стратегий технического обслуживания и ремонта – ремонта по состоянию и упреждающего (предиктивного) ремонта базируется на знании текущего состояния механического оборудования.

2. Одной из особенностей металлургических машин является одновременная или последовательная работа комплекса механизмов, обеспечивающих непрерывность технологического процесса. Примеры: оборудование колошника или литейного двора доменной печи, комплекс механизмов машины непрерывного литья заготовок, непрерывные прокатные станы и др. Так как ремонт приводит к остановке всего технологического процесса, то восстановление работоспособного состояния необходимо проводить по всему комплексу на различных уровнях состояния.

3. Наиболее часто металлургические машины работают в

кратковременном или повторно кратковременном режиме, сопровождающемся действием динамических сил. Это определяет отличия при диагностировании по сравнению с механизмами длительного режима работы, ориентируя измерения вибрации на фиксацию временных реализаций.

4. Вопросы диагностирования механического оборудования металлургических предприятий, с различной степенью эффективности, решаются при использовании стационарных систем или периодического диагностирования. Большое количество точек контроля, необходимых для оценки технического состояния металлургической машины не позволяет обеспечить достаточный уровень данных для принятия обоснованного решения и постановке точного диагноза. Отказы металлургических машин происходят без стабильных повторений, с различными периодами и причинами.

5. Труднодоступность точек контроля вибрации, ограничения по безопасности расположения специалистов во время рабочей фазы технологического режима определяют актуальность создания подвижного диагностического комплекса для измерения вибрационных показателей взаимодействия деталей механизмов и технологических сил [1].

Наиболее сложным объектом для диагностирования механического оборудования, работающего в повторно-кратковременном режиме являются резьбовые соединения относительно наиболее механизированного комплекса металлургических машин – прокатных клеток непрерывного стана. Эти станы отличаются высокой производительностью и высокой степенью автоматизации, возможностью быстрого перехода на новый сортамент. Одновременно повышаются требования к безотказности оборудования, что обеспечивает непрерывность технологического процесса и максимальный объем произведенной продукции [2].

Традиционное решение оценки степени ослабления затяжки резьбовых соединений связано с определением контурной диаграммы (рис. 1). При этом соотношение вибрации опоры и фундамента определяющие состояние резьбовых соединений ограничены решающими правилами: около 2,0 – хорошо; 1,4...1,7 – неустойчивый фундамент; 2,5...3,0 – ослабление резьбовых креплений. Виброскорость в вертикальном направлении на фундаменте не должна превышать 1,0 мм/с [3].

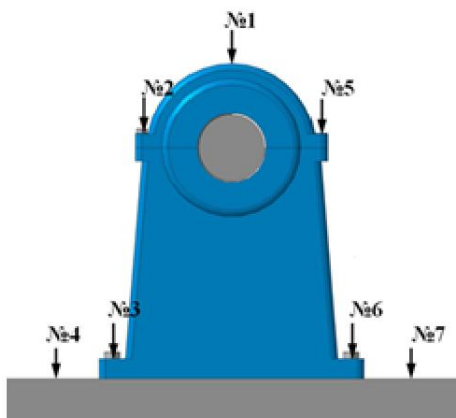


Рис. 1. Расположение контрольных точек измерения вибрации при составлении контурной диаграммы.

Для прокатных клетей это требование осложняется ограничением доступа при прокатке – опасность «бурежки», габаритные ограничения, присутствие режимов холостого и рабочего хода, динамических ударов при захвате и выходе слитка из клетки. Существуют различные решения по приводу горизонтальных, вертикальных, наклонных валков, универсальные клетки (рис. 2). В любом случае фиксация станин прокатных клетей, комбинированных редукторов и двигателей привода реализуется фундаментными болтами различной конструкции. Требование, определяющие работоспособность резьбовых соединений (резьбовые соединения должны быть равномерно затянуты) часто нарушается во время эксплуатации. Большая часть отказов прямо или косвенно связана с указанной причиной – ослабление затяжки резьбовых соединений.

В процессе работы происходит износ элементов, ослабление фиксирующих элементов, увеличение зазоров и осевого биения. Повреждения могут развиваться с различной скоростью, по различным моделям отказов. Установка стационарных систем, в данном случае, не позволяет предупредить возникновения отказа. Наличие датчика состояния на каждом элементе не является эффективным способом повышения безотказности, приводя к появлению больших массивов труднообрабатываемых данных. В этой ситуации предлагается решение, основанное на периодическом вибрационном контроле прокатного оборудования с использованием переносных анализаторов вибрации, на основе датчиков с проводной и беспроводной передачей данных, дополненных измерениями, проводимыми мобильным диагностическим комплексом [4][5].

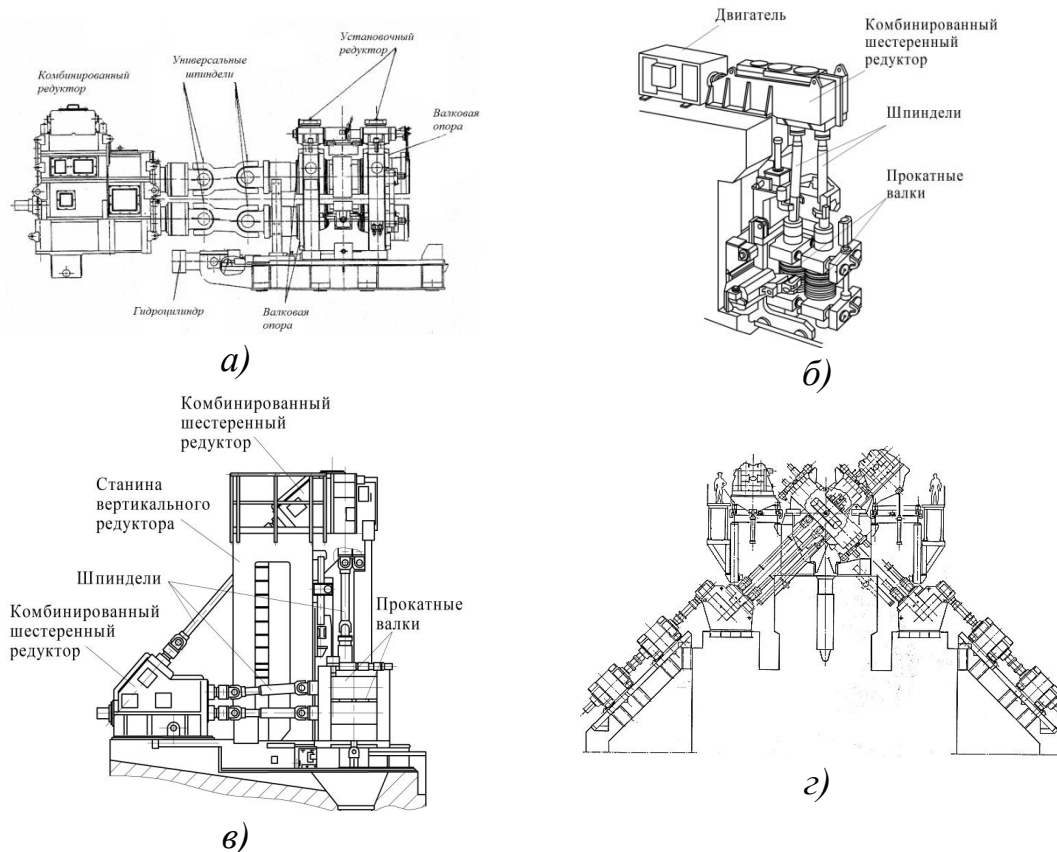


Рис. 2. Конструкции клеток непрерывного прокатного стана:

- а) горизонтальные; б) вертикальные;  
в) комбинированные; г) наклонные.

В условиях металлургического производства подвижная платформа столкнется с проблемой непредсказуемо неровной поверхности передвижения. Гладкая, неровная, твёрдая или рыхлая, сплошная или перфорированная. Помимо того, значение имеет и окружение. Например, в зонах с высокой интенсивностью движения оборудования или сотрудников (как правило, по твердой гладкой поверхности) недопустима слишком низкая скорость передвижения для обеспечения непрерывности технологического процесса. В таких условиях подходит быстроходное колесное шасси.

Процесс контроля технического состояния системы имеет тем более сложную структуру, чем большее количество оборудования и диагностируемых параметров охватывает. Процессы такого рода характерны для различных отраслей народного хозяйства.

Для комплексного предприятия организация контроля технического состояния должна быть выполнена таким образом, чтобы проводить своевременную диагностику всех элементов без

остановки технологического процесса. Эффективность процесса в таком случае зависит не только от самого оборудования, но и от его маршрута между точками диагностирования. Ввиду необходимости в частом, а как следствие, быстром перемещении между различными точками требуется подбор такого оптимального маршрута, при котором затраты по времени на перемещение и сам процесс контроля будут согласованы с циклами работы оборудования. Данный вопрос рассматривается в рамках сферы транспортной логистики.

Обработка поступивших данных должна давать понимание состояния диагностируемого объекта для своевременного проведения предупредительного обслуживания. В данном случае слишком раннее обслуживание приводит к увеличенному расходу запасных частей, простоям оборудования, увеличению объема ремонтных работ.

Таким образом, предлагается решить поставленную задачу относительно механического оборудования непрерывных прокатных станов, имеющих наибольшие показатели удельной энергоемкости механизмов относительно выполняемых технологических операций. Одним из основных решаемых вопросов предполагается выделить оценку степени затяжки резьбовых соединений, как наиболее скрытую причину отказов. Выделяются следующие направления исследований.

1. Математическое моделирование, включающее:

- морфологический анализ состава и функций мобильного диагностического комплекса;
- обоснование технических и силовых характеристик;
- оценка действующих напряжений в резьбовом соединении;
- определение информативных частот и характеристик вибрационного контроля.

2. Экспериментальное моделирование, включающее:

- определение зависимостей между динамическим воздействием и откликом вибрационных показателей при ослаблении затяжки резьбовых соединений в лабораторных и производственных условиях;
- определение возможности передачи измеренного сигнала беспроводным способом в условиях непрерывного прокатного стана;
- создание действующей модели и исследование её поведения в производственных условиях для определения требований обеспечивающих эффективность функционирования, включая долговечность и ремонтпригодность.

3. Разработку алгоритмов функционирования, включая:

- алгоритмы и периодичность диагностирования;
- разработку маршрутов движения и преодоления препятствий;

- последовательность обработки полученных данных;
- принятие решений и контроль качества ремонта.

#### **Перечень ссылок**

1. Сидоров, В. А. Особенности оценки технического состояния комбинированных редукторов прокатных клетей непрерывного стана / В. А. Сидоров, А. В. Пичахчи, В. Н. Рыбаков // Сталь. – 2022. – № 12. – С. 36-43. – EDN ENDEVYM.
2. Сидоров В.А. Комбинированные редукторы прокатных клетей / Сидоров В.А., Подоприхин Д.Ю. // Вестник Донецкого национального технического университета, 2016, №2(2) С. 29-37.
3. Сидоров, В. А. Выбор диагностических параметров для стационарных систем контроля технического состояния металлургических машин / В. А. Сидоров, А. Е. Сушко // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 1. – С. 56-62. – EDN NCELGN.
4. Пичахчи, А. В. Особенности вибрационного контроля комбинированных редукторов непрерывных прокатных станов / А. В. Пичахчи, В. А. Сидоров // Инновационные перспективы Донбасса : материалы 10-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 28–30 мая 2024 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 145-149. – EDN DGERQE.
5. Сидоров, В. А. Особенности стационарных систем вибрационного контроля металлургических машин / В. А. Сидоров // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 12(1416). – С. 73-84. – EDN YRSEWP.

УДК 620.197:621.644

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

М. В. Кривоноженков, А. И. Деменков, Н.И. Майбенко  
ГБУ «МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ»,  
Г. Макеевка, ДНР

**Аннотация.** В докладе представлено теоретическое обоснование применения комбинированных теплоизоляционных покрытий трубопроводов. Анализируются совместимость материалов и конструктивные особенности. Представлена математическая модель, учитывающая термическое сопротивление. Показано, что комбинирование слоёв позволяет снизить теплопотери до 30–40 % по сравнению с однослойными покрытиями.

**Annotation.** The report presents a theoretical justification for the use of combined thermal insulation coatings for pipelines. The compatibility of materials and design features are analyzed. A mathematical model is presented that takes into account thermal resistance. It is shown that combining layers can reduce heat loss by up to 30-40% compared to single-layer coatings.

**Ключевые слова:** теплоизоляционное покрытие, трубопровод, термическое сопротивление, математическая модель.

**Keywords:** thermal insulation coating, piping, thermal resistance, mathematical model.

Тепловая изоляция трубопроводов является одним из ключевых факторов энергосбережения в системах теплоснабжения, промышленной теплотехнике и гражданском строительстве. По данным [1], до 25–30 % тепловых потерь магистральных и распределительных сетей приходится на несовершенство изоляционных конструкций. Традиционные однослойные покрытия на основе минеральной ваты, пенополиуретана (ППУ) или вспученного перлита имеют ограничения: либо недостаточно низкая теплопроводность, либо высокая паропроницаемость, либо механическая нестойкость, либо горючесть.

Перспективным направлением является создание комбинированных теплоизоляционных покрытий (КТП), в которых различные функциональные слои решают специфические задачи: первый слой — высокотемпературная стойкость и низкая

теплопроводность, второй — гидрофобизация и защита от коррозии, третий — механическая прочность. Теоретическое обоснование таких систем требует комплексного анализа стационарной и нестационарной теплопроводности, совместимости материалов и критериев оптимизации.

Проведем анализ физических механизмов теплопереноса в комбинированной изоляции.

Для цилиндрического трубопровода (внутренний диаметр  $d_1$ , наружный  $d_2$ , длина  $L$ ) тепловой поток через однородную изоляцию описывается законом Фурье для цилиндрической стенки:

$$Q = \frac{2\pi\lambda L(T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}})}{\ln(d_2 / d_1)},$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·К). Однако в комбинированном покрытии, состоящем из  $n$  концентрических слоёв с толщинами  $\delta_i$  и  $\lambda_i$ , общее термическое сопротивление  $R_{\text{сум}}$  определяется суммой:

$$R_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}.$$

При этом тепловой поток:

$$Q = \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{окр}}}{R_{\text{сум}} + R_{\text{нар}}},$$

где  $R_{\text{нар}}$  — сопротивление теплоотдаче на наружной поверхности.

Теоретическое преимущество комбинирования проявляется, когда в начальном слое (контактирующем с трубой) используется материал с высоким допустимым интервалом температур (например, базальтовое волокно,  $\lambda=0,035\text{--}0,045$ ), а во внешнем — материал с аномально низкой  $\lambda$ , например, аэрогель или вспененный каучук ( $\lambda=0,018\text{--}0,022$ ) [2]. При этом парциальная плотность теплового потока снижается на 35 % по сравнению с однослойной изоляцией при той же суммарной толщине.

В реальных условиях эксплуатации в изоляционных материалах возможны конденсация влаги и внутренняя конвекция. Для комбинированных покрытий важно рассчитывать распределение температуры и парциального давления. Условие отсутствия конденсации — чтобы парциальное давление водяного пара в любом сечении не превышало давления насыщения при локальной температуре.

Расчёт влажностного режима КТП выполняется по методу потенциала переноса, предложенному А.В. Лыковым [3]. Для системы «слой 1 (паропроницаемый) – слой 2 (паробарьер)» термическое и диффузионное сопротивления складываются:

$$R_{П, сум} = \frac{\delta_i}{\mu_i},$$

где  $\mu_i$  — коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па). Грамотное чередование слоёв (например, внутренний волокнистый + наружный фольгированный или полимерный) приводит к тому, что зона возможной конденсации смещается в область меньших теплопотерь, а сам конденсат не накапливается за счёт вентиляционных зазоров или капиллярного отвода.

Задача оптимизации структуры КТП формулируется как минимизация теплового потока при ограничениях на суммарную толщину  $H = \sum \delta_i$  и стоимость. Целевая функция:

$$\min_{\delta_i, n} Q(\delta_i, \lambda_i, T, d_0),$$

при условии  $\sum_{i=1}^n \delta_i \leq H_{\max}.$

В работе [4] показано, что для двухслойной изоляции трубы оптимальным является распределение, при котором термические сопротивления слоёв пропорциональны квадратным корням из коэффициентов теплопроводности. Обобщая на  $n$  слоёв, получаем:

$$\delta_i \approx \frac{\ln 1 + \frac{2\delta_i}{d_i} \lambda_i^{-1/2}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i^{-1/2}} R_{\text{треб}}.$$

На основе численного моделирования установлено, что увеличение числа слоёв с трёх до пяти даёт незначительный выигрыш (менее 5 %) при существенном усложнении технологии, поэтому рациональными конструкциями КТП являются 2–4 слоя.

Рассмотрим конструкционные типы комбинированных покрытий.

Анализ литературных и патентных данных [5] позволяет выделить три основные схемы КТП для трубопроводов:

1. «Термо-базальт + ППУ-скорлупа + оцинкованный кожух» – для надземных теплотрасс с температурой теплоносителя до 600 °С. Базальтовый слой выдерживает высокие температуры и отводит

тепловой поток, ППУ обеспечивает низкую  $\lambda$ , кожух – защиту от УФ и механических повреждений.

2. «Аэрогель на основе  $\text{SiO}_2$  + пенополиэтилен + фольгированный скотч» – для гражданских систем ГВС и отопления ( $T$  до  $120^\circ\text{C}$ ). Толщина аэрогелевого слоя – 5–10 мм, пенополиэтилена – 10–20 мм. Теплопроводность итоговой системы 0,023–0,026 Вт/(м·К).

3. «Каучуковые термочехлы + многослойная металлизированная плёнка» – для технологических трубопроводов в химической и нефтяной промышленности, требовательных к неdestructивному контролю.

Для каждой схемы подтверждено теоретическое снижение тепловых потерь на 28–42 % (в зависимости от  $\Delta T$ ) по сравнению с однослойной изоляцией из минваты той же толщины ( $\delta = 50$  мм).

Теоретическая модель срока службы КТП основана на кинетике старения изоляционных материалов. Для полимерсодержащих слоев (ППУ, каучук) характерно термическое окисление, для волокнистых – уплотнение и рост  $\lambda$ . Комбинированное покрытие позволяет локализовать зону максимальной температуры во внутреннем термостойком слое, продлевая ресурс внешнего до 25–30 лет против 15 лет для однослойного ППУ [6].

Важнейшим теоретическим условием реализации КТП является обеспечение тепловой и механической совместимости слоёв: разность коэффициентов линейного расширения ( $\alpha$ ) между слоями не должна превышать  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$  при циклических нагревах, иначе возможно расслоение. Практически это достигается введением демпфирующих полимерных плёнок или клеевых прослоек.

Проведённое теоретическое обоснование показывает, что комбинированные теплоизоляционные покрытия трубопроводов промышленного и гражданского назначения обладают следующими преимуществами:

- снижение удельных теплотерь на 30–40 % по сравнению с лучшими однородными изоляторами при одинаковой толщине;
- возможность использовать высокотемпературные внутренние слои и сверхнизкопроводящие внешние;
- эффективное управление влажностным режимом и предотвращение коррозии;
- повышение общего срока службы за счёт разграничения термических нагрузок.

Основная рекомендуемая конфигурация КТП – трёхслойная структура (тепlostойкий барьер → основной изолятор → защитно-декоративный слой). Дальнейшие теоретические исследования должны быть направлены на создание адаптивных моделей, учитывающих нестационарные режимы (остановки, прогревы, циклические заморозки).

**Перечень ссылок**

1. Богословский В.Н., Сканапи А.Н. Теплоснабжение и тепловые сети. – М.: Стройиздат, 2016. – 392 с. (С. 245–267).
2. Fricke J., Emmerling A. Aerogels – recent progress in production and characterization // Journal of Sol-Gel Science and Technology. – 2018. – Vol. 13, № 1. – P. 299–303.
3. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с. (Глава 6 «Влагоперенос в капиллярно-пористых телах»).
4. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика и теплопередача. – Самара: СамГТУ, 2019. – 328 с. (С. 198–215).
5. Патент РФ № 2675892. Комбинированное теплоизоляционное покрытие для трубопроводов / Иванов П.С., Петров А.В. – Оpubл. 24.12.2018. Бюл. № 36.
6. Теплоизоляция трубопроводов: справочник проектировщика / Под ред. В.И. Телегина. – СПб.: Профессионал, 2020. – 416 с. (Раздел 7 «Долговечность многослойных систем»).

УДК 531.31.15

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ КОЛОСНИКОВОЙ РЕШЕТКИ ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ

<sup>1</sup>О.А. Левченко, <sup>1</sup>Рубежанский В.И., <sup>2</sup>А.Т. Павленко, <sup>1</sup>М.Э. Левченко  
г. Алчевск

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический  
университет»,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля»  
г. Луганск

**Аннотация.** Рассмотрен инновационный подход к модернизации колосниковой решётки одновалковой зубчатой дробилки, заключающийся в замене плоских колосников на закруглённые с радиусом, близким к радиусу зубьев ротора, а также в установке на них консольных колосников, обеспечивающих многоступенчатое дробление агломерата в окружном направлении.

**Annotation.** An innovative approach to upgrading the grate of a single-roll gear crusher is considered, which involves replacing flat grates with rounded ones with a radius close to the radius of the rotor teeth, and installing cantilevered grates that provide multi-stage crushing of the agglomerate in the circumferential direction.

**Ключевые слова:** агломерат, дробление, одновалковая зубчатая дробилка, эффективность, колосники.

**Keywords:** agglomerate, crushing, single-roll toothed crusher, efficiency, grates.

Дробление горячего агломерата является важным технологическим этапом в металлургическом производстве, обеспечивающим получение фракций необходимого размера для последующих процессов выплавки чугуна [1]. Одновалковые зубчатые дробилки широко применяются для этой цели благодаря своей надёжности и эффективности. Однако традиционные конструкции таких дробилок с плоскими колосниками колосниковой решётки имеют ограничения по качеству и равномерности дробления, что стимулирует поиск новых технических решений [2].

Классическая одновалковая зубчатая дробилка состоит из ротора с зубьями и неподвижной колосниковой решётки, образующей рабочую камеру. Колосники традиционно имеют плоскую форму и служат опорой для дробимого материала, а также обеспечивают его удержание и направленное дробление при взаимодействии с зубьями

ротора.

К основным недостаткам традиционной конструкции относятся: неравномерное распределение нагрузки на колосники, что приводит к локальному износу и снижению срока службы рабочих органов; ограниченная эффективность дробления из-за неравномерности размеров готового агломерата и недостаточная интенсификация дробления в окружном направлении, что снижает качество получаемого продукта [3].

Исследована усовершенствованная конструкции дробилки, в которой вместо плоских колосников устанавливаются колосники с закруглённой поверхностью, радиус которой близок к радиусу зубьев ротора. Такая геометрия обеспечивает более плавное взаимодействие между зубьями ротора и колосниками, снижая ударные нагрузки и улучшая распределение сил.

На поверхности закруглённых колосников размещаются консольные колосники – выступающие элементы, ориентированные в окружном направлении рабочей камеры. Они создают дополнительные точки контакта с агломератом, обеспечивая многоступенчатое дробление за счёт последовательного воздействия зубьев ротора и консольных колосников в окружном направлении. Это способствует более равномерному измельчению материала и повышению производительности дробилки. Подача материала в верхнюю часть дробилки осуществляется продавливанием через консольные колосники, что позволяет использовать типовую конструкцию агломерата с минимальными изменениями. Модифицируется лишь колосниковая решётка, составляющая 5–8 % от общего конструктива.

Математическое описание [5] относительного движения куска агломерата (рис. 1) по передней грани зубца звёздочки ротора в виде дифференциального уравнения выглядит следующим образом:

$$\ddot{x} + 2\omega f \dot{x} - \omega^2 x = -g (\sin \omega t + f \cos \omega t) \quad (1)$$

где  $x$  – расстояние, на которое смещается кусочек агломерата вдоль наклонной лопасти звёздочки ротора при её повороте;

$t$  – время, в течение которого происходит это движение;

$\omega$  – угловая скорость, с которой вращается ротор;

$f$  – коэффициент трения, влияющий на движение.

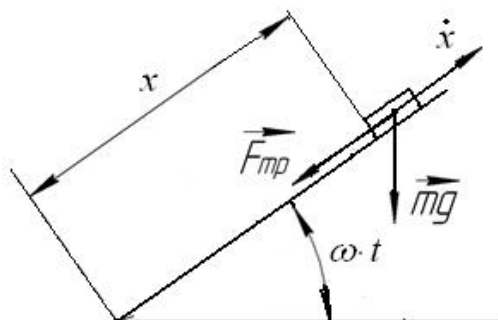


Рисунок 1 – Схема движения куска агломерата

Когда дробилка работает в обычном режиме, с ротором, вращающимся с частотой 6 об/мин (что соответствует угловой скорости 0,6283 радиан в секунду), и если начальное положение куска агломерата находится на расстоянии 0,6 метра от центра вращения, то уравнение (1) можно решить аналитически, если коэффициент трения остаётся неизменным:

при  $f=0,5$

$$x = -9,8186 e^{0,3883 t} - 2,3493 e^{-1,0166 t} + 7,4544 \sin(0,6283 t + 0,4852) + 9,9392 \cos(0,6283 t + 0,4852) ;$$

при  $f=0,364$

$$x = -9,713 e^{0,4399 t} - 0,585 e^{-0,8973 t} + 9,5171 \sin(0,6283 t + 0,3718) + 7,9867 \cos(0,6283 t + 0,3718) .$$

Если предположить, что коэффициент  $f$  претерпевает изменения в интервале от 0,5 до 0,364 в зависимости от скорости перемещения частицы по плоскости зуба звёздочки ротора, то дифференциальное уравнение движения (1) будет представлено в виде:

$$x = -1,9333 e^{0,7766 t} - 0,5594 e^{-2,0392 t} + 1,8637 \sin(1,2566 t + 0,5512) + 2,4849 \cos(1,2566 t + 0,5512)$$

Результаты экспериментальных исследований и моделирования показывают, что модернизированная колосниковая решётка обеспечивает увеличение степени дробления на 15–25% за счёт многоступенчатого воздействия и улучшенного распределения нагрузок на материал; снижение удельного энергопотребления на 10–12% благодаря оптимизации контактов и уменьшению

сопротивления движения агломерата; повышение срока службы колосниковой решётки на 30–40% за счёт снижения ударных нагрузок и равномерный износ и улучшение качества готового продукта с уменьшенной долей пылевидных частиц и увеличенным выходом фракций требуемого размера.

Скорость сползания агломерата к оси ротора при  $f=0,364$  оказывается ниже, чем при  $f=0,5$ , когда коэффициент трения находится на граничных значениях. Такое замедление, предпочтительное для нахождения агломерата в рабочей зоне дробления, обусловлено тем, что при меньшем значении  $f$  переносная сила инерции преобладает над силой трения, зависящей от силы Кориолиса.

**Выводы.** Таким образом данная конструктивная инновация способствует улучшению качества дробления, повышению производительности и увеличению срока службы оборудования. Внедрение такой решётки позволяет снизить энергозатраты и уменьшить износ основных элементов дробилки. Многоступенчатое дробление обеспечивает более равномерное и эффективное измельчение агломерата, что положительно сказывается на качестве конечного продукта. Предложенная модернизация открывает перспективы для дальнейших исследований и оптимизации конструкции одновалковых зубчатых дробилок. Таким образом, инновационный подход к колосниковой решётке способствует повышению технологической эффективности металлургических производств.

#### **Перечень ссылок**

1. Мороз В.В., Левченко Э.П., Зинченко А.М. [и др.]. Перспективы улучшения фракционного состава доменного агломерата // Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», г. Москва, 27–30 ноября 2018 г. – М.: ООО «Буки Веди», 2018. Т. III. С. 626–630.
2. Левченко Э.П., Зинченко А.М., Левченко О.А. [и др.]. / Применение одновалковой зубчатой дробилки для переработки окускованных материалов // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: Материалы IV международной научно-практической конференции, г. Чебоксары, 25 февраля 2022 года. – Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2022. С. 126–130.
3. Левченко Э.П., Вишневский Д.А., Левченко О.А. [и др.]. Повышение качества агломерата путем улучшения дисперсного состава сырьевых компонентов // Современные проблемы теории машин, 2015. № 3. С. 281–282.
4. Мороз В.В., Левченко Э.П., Зинченко А.М. [и др.]. Многоступенчатое фракционирование агломерата рациональной крупности // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции, г. Донецк, 26–28 мая 2020 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. Т. 3. С. 62–68.
5. Мороз В.В., Рубежанский В.И., Левченко Э.П. К вопросу многостадийной обработки материала в одновалковой зубчатой дробилке // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2019. № 15(58). С. 43–47.

УДК 539.5

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

В.В. Малашенко

ФГБНУ «ДОНЕЦКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИМ. А.А. ГАЛКИНА»

г. Донецк, ДНР

**Аннотация.** Показано, что зависимость динамического предела текучести от плотности дислокаций в условиях ударных нагрузок является немонотонной и может иметь два экстремума.

**Annotation.** It is shown that the dependence of the dynamic yield strength on the dislocation density under impact loads is non-monotonic and can have two extrema.

**Ключевые слова:** металлы, сплавы, плотность дислокаций, динамический предел текучести.

**Keywords:** metals, alloys, dislocation density, dynamic yield strength.

Механические свойства функциональных металлов и сплавов, в частности, пластичность и прочность, в значительной степени определяются особенностями зарождения и движения линейных дефектов структуры – дислокаций, а также их взаимодействием с неподвижными структурными дефектами (легирующими примесями, дислокационными петлями, зонами Гинье-Престона). Механизм преодоления движущимися дислокациями этих структурных дефектов может быть различным и зависит от величины внешних воздействий. При квазистатическом деформировании дислокации преодолевают дефекты структуры с помощью тепловых флуктуаций, поэтому механические свойства металлов и сплавов в этом случае сильно зависят от температуры. При высокоскоростном деформировании, в частности, при ударных нагрузках дислокации движутся с огромными скоростями (десятки и сотни метров в секунду), их кинетическая энергия превышает высоту потенциальных барьеров, созданных структурными дефектами, поэтому дислокациям не нужны тепловые флуктуации для их преодоления [1]. Температурная зависимость свойств в этой области деформаций претерпевает существенные изменения. Одним из основных факторов, определяющих формирование механических свойств, является плотность дислокаций. Влияние плотности дислокаций на предел текучести металлов и сплавов в динамической области может существенно отличаться от их

влияния в условиях квазистатического деформирования. Выявить эти отличия можно, опираясь на развитую нами теорию динамического взаимодействия дефектов (ДВД) [2-5]. Это феноменологическая теория, которая по существу является обобщением струнной модели Гранато-Люкке.

Проанализируем динамическое скольжение ансамбля краевых дислокаций в состаренном двухкомпонентном сплаве, содержащем атомы второго компонента и зоны Гинье-Престона. Уравнение движения отдельной дислокации скользящего по металлу дислокационного ансамбля можно записать в следующем виде

$$m \frac{\partial^2 W(z,t)}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 W(z,t)}{\partial z^2} = b \sum_i \sigma_{xy}^i - B \frac{\partial W(z,t)}{\partial t}$$

Здесь  $m$  – масса единицы длины дислокации,  $c$  – скорость поперечного звука в металле,  $b$  – модуль вектора Бюргерса дислокации,  $\sum_i \sigma_{xy}^i$  – сумма напряжений, созданных на линии дислокации внешней нагрузкой, атомами второго компонента, зонами Гинье-Престона и дислокациями движущегося ансамбля,  $B$  – константа фононного торможения.

Зависимость предела текучести от дислокационной плотности может быть описано соотношением Тейлора

$$\tau_T = \alpha \mu b \sqrt{\rho},$$

где  $\alpha$  – безразмерный коэффициент порядка единицы,  $\mu$  – модуль сдвига,  $\rho$  – плотность дислокаций.

Выполняя необходимые вычисления и пользуясь результатами теории ДВД, получим зависимость динамического предела текучести состаренного двухкомпонентного сплава от плотности дислокаций в следующем виде

$$\tau(\rho) = \frac{\lambda}{\rho(\rho + \rho_0)} + \frac{\beta}{\sqrt{\rho + \rho_0}} + \alpha \mu b \sqrt{\rho};$$

$$\beta = \mu n_G b R; \quad \lambda = \frac{\mu n_d \chi^2 \dot{\epsilon}}{b^3 c}.$$

Здесь  $n_G$  – объёмная концентрация зон Гинье-Престона,  $n_d$  – безразмерная концентрация атомов второго компонента,  $\chi$  – параметр их размерного несоответствия.  $\dot{\epsilon}$  – скорость пластической деформации состаренного сплава. Анализируя данную зависимость, приходим к выводу, что её график может иметь два экстремума,

положение которых согласуется с критериями, полученными ранее в рамках теории ДВД.

Положение этих экстремумов определяется следующими значениями плотности дислокаций

$$\rho_{\min} = \frac{2\dot{\varepsilon}\rho_0}{\alpha c}^{\frac{2}{3}}; \quad \rho_{\max} = \frac{\sqrt{n_d \chi^2}}{b^2}.$$

Оценивая порядок вычисленных величин, получаем  $\rho_{\min} = 10^{13} - 10^{14} \text{ м}^{-2}$  и  $\rho_0 = 10^{15} \text{ м}^{-2}$ . Чтобы экспериментально наблюдать оба экстремума, необходимо, чтобы объёмная концентрация зон Гинье-Престона достигала высоких значений  $n_G = 10^{23} - 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , а плотность дислокаций изменялась в больших пределах – от  $10^{11} \text{ м}^{-2}$  до  $10^{16} \text{ м}^{-2}$ . Высокими должны быть также концентрация атомов второго компонента и скорость пластической деформации:  $n_d = 10^{-4}$ ,  $\dot{\varepsilon} = 10^7 \text{ с}^{-1}$ .

Результаты данной работы подтверждают критерии, сформулированные ранее в рамках теории ДВД: максимум предела текучести возникает при смене главного вклада в формирование колебательного спектра, минимум – при смене главного вклада в силу динамического торможения дислокаций.

**Выводы.** Соотношение Тейлора может нарушаться при ударных нагрузках металлов и сплавов с высокой плотностью дислокаций и высокой концентрацией зон Гинье-Престона. Результаты представленной работы могут быть полезными при анализе деформационного упрочнения состаренных металлов, подверженных ударным нагрузкам.

#### Перечень ссылок

1. Smith R. F. High strain-rate plastic flow in Al and Fe Collins / R.F. Smith, J. H. Eggert, Rudd R. E., Swift D. C., Bolme C. A. // Journal of Applied Physics.–2011. –V. 110. – P. 123515(1–11).
2. Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects / V.V. Malashenko // Physica B: Phys. Cond. Mat. 2009. V. 404, № 2. P. 3890–3892.
3. Malashenko V.V. The Influence of Collective Effects on the Concentration Dependence of the Yield Stress of Alloys under High-Energy Impacts. / V.V. Malashenko // Technical Physics Letters. – 2020. – Vol. 46, No. 9. – P. 925–927.
4. Malashenko V.V. Influence of the Guinier–Preston Zones on the Concentration Dependence of the Yield Point of the Aged Two-Component Alloys in Conditions of High-Speed Deformation / V.V. Malashenko // Physics of the Solid State.- 2019.- Vol. 61, No. 10, pp. 1800–1803.
5. Malashenko V.V. Dynamic drag of dislocation by point defects in near-surface crystal layer / V.V. Malashenko // Modern Phys. Lett. B. – 2009. – Vol. 23, № 16. – P. 2041–2047.

УДК 621(825.5+926.323)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ  
МОДЕРНИЗАЦИИ ПРИВОДА ДРОБИЛКИ ДЧГ 900×700 В  
УСЛОВИЯХ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ЦЕХА  
АМК ООО «ЮГМК»**

<sup>1</sup>Мележик Р.С., <sup>2</sup>Власенко Д.А.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «ДонГТУ», <sup>2</sup>Военнослужащий, участник СВО,  
г. Алчевск, ЛНР

**Аннотация.** В работе выполнено экспериментальное исследование надежности привода четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 в промышленных условиях агломерационного цеха АМК ООО «ЮГМК». С помощью метода контроля вибрационного состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях определены численные значения виброперемещения на подшипниковых опорах вала дробилки в условиях использования двух типов муфт с различной демпфирующей способностью.

**Abstract.** The work presents an experimental study of the reliability of the drive of a four-roll crusher DChG 900×700 in the industrial conditions of the agglomeration shop of the AMK LLC «YUGMK». Using the method of monitoring the vibration state of machines, based on the results of vibration measurements on non-rotating parts, numerical values of vibration displacement on the bearing supports of the crusher roll were determined under conditions of using two types of couplings with different damping capacity.

**Ключевые слова:** четырехвалковая дробилка, привод, муфта зубчатая, муфта пальцевая с эластичным элементом дискового типа, динамические нагрузки, вибрационные характеристики.

**Keywords:** four-roll crusher, drive, gear coupling, pin coupling with an elastic disc-type element, dynamic loads, vibration characteristics.

Дробильное оборудование в процессе своей работы испытывает существенные динамические нагрузки, влияющие на его надежность. Данные нагрузки приводят к преждевременному износу и разрушению отдельных элементов приводов (подшипников, муфт, зубчатых передач и т.д.), а также сказываются на работоспособности рабочих органов [1].

Снижение надежности дробилок зачастую связано с неудачным выбором конструкции отдельных элементов привода, нарушением

качества материала используемого для изготовления отдельных деталей, низкой квалификацией технического персонала и может приводить к увеличению простоев, связанных с необходимостью выполнения ремонтных работ, а также устранению отказов оборудования, вызванных аварийными ситуациями [2].

В агломерационном производстве для дробления твердого топлива широко применяют четырехвалковые дробилки ДЧГ 900×700 (рис 1), в процессе работы которых, узлы привода воспринимают случайные ударные нагрузки, передающиеся от рабочих органов и негативно сказывающиеся на надежности машины. Опыт эксплуатации данного типа дробилок показывает, что используемые в приводе зубчатые муфты (МЗ) не могут в достаточной степени снизить передающиеся от валков ударно-переменные нагрузки.



Рисунок 1 – Четырехвалковая дробилка ДЧГ 900×700 с МПЭЭДТ в  
промышленных условиях

Для повышения надежности и снижения негативного влияния динамических нагрузок на элементы привода предлагается использовать муфту пальцевую с эластичным элементом дискового типа (МПЭЭДТ) [3-5]. Разработанная муфта способна в полной мере обеспечить необходимый уровень демпфирования без значительных конструктивных изменений в приводе дробилки.

При проведении эксперимента использовался метод контроля состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях с использованием двухканального переносного цифрового анализатора, коллектора данных и балансировочного прибора «Кварц 2» (рис 2). Замеры осуществились

на корпусе подшипниковой опоры приводного вала с холостой и приводной стороны (рис. 2) в условиях агломерационного цеха АМК ООО «ЮГМК» на трех четырехвалковых дробилок ДЧГ 900×700. Сравнительный анализ результатов проводился для двух типов привода: с МЗ и МПЭЭДТ.



а)



б)

Рисунок 2 – Прибор «Кварц 2» (а) и измерительный датчик, установленный на корпусе подшипника с приводной стороны (б)

Результаты измерения виброперемещений подшипниковых опор вала, полученные в ходе промышленных исследований при использовании в приводе МЗ и МПЭЭДТ, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние результаты виброперемещения, мкм

| Привод | Точка измерения                              | № дробилки |      |      | Среднее значение |
|--------|----------------------------------------------|------------|------|------|------------------|
|        |                                              | 1          | 2    | 3    |                  |
| МЗ     | Подшипниковая опора вала с холостой стороны  | 4,31       | 3,2  | 2,89 | 3,47             |
|        | Подшипниковая опора вала с приводной стороны | 3,69       | 2,2  | 2,0  | 2,63             |
| МПЭЭДТ | Подшипниковая опора вала с холостой стороны  | 3,22       | 3,05 | 2,92 | 3,06             |
|        | Подшипниковая опора вала с приводной стороны | 2,75       | 2,68 | 2,54 | 2,66             |

Анализируя полученные результаты можно утверждать, что при использовании в приводе МПЭЭДТ наблюдается снижение значений виброперемещения на корпусе подшипниковой опоры вала с

холостой стороны в 1,13 раза, а с приводной – в 0,99 раза.

Результаты сбора данных, проводимого в течении 3 лет и 2 месяцев о наработке на отказ четырехвалковых дробилок по причине усовершенствования конструкции привода, представлены на рисунке 3.

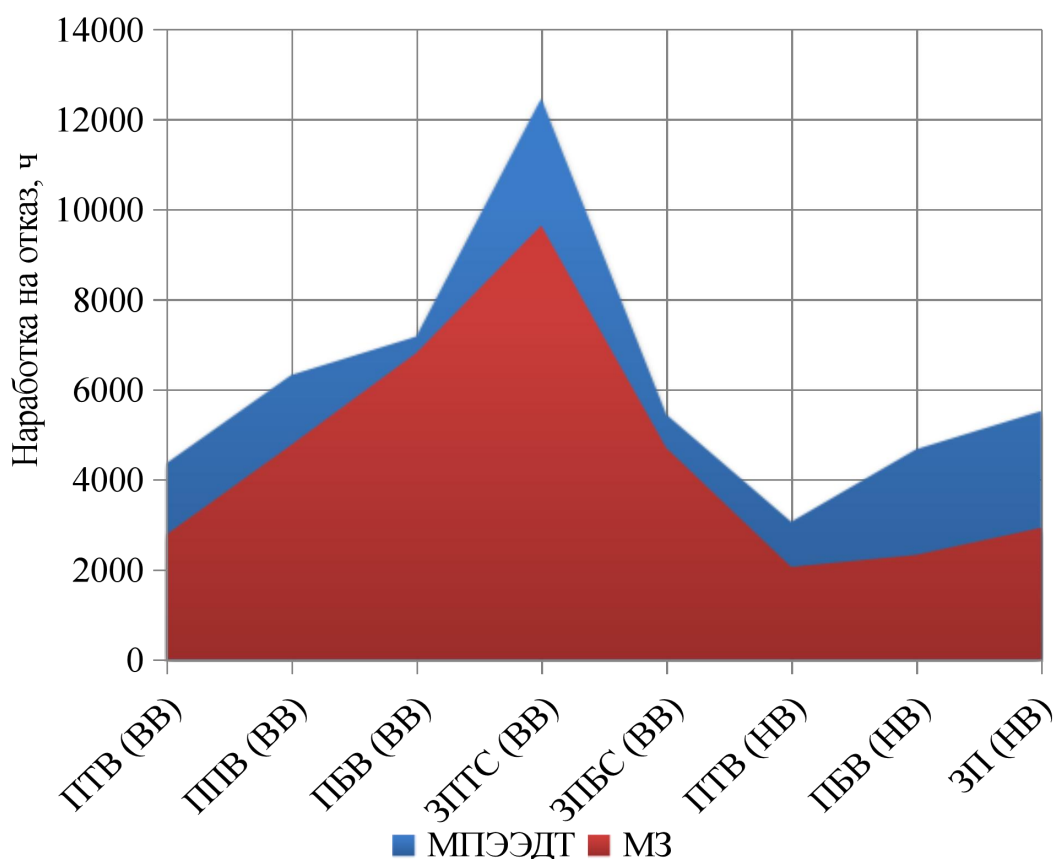


Рисунок 3 – Результаты наработки на отказ узлов дробилки верхних (BV) и нижних валков (NB) (средние значения)

ПТВ – подшипники тихоходного вала; ППВ – подшипники промежуточного вала; ПБВ – подшипники быстроходного вала; ЗПТС – зубчатая передача тихоходной ступени; ЗПБС – зубчатая передача быстроходной ступени; ЗП – зубчатая передача

Рисунок 3 – Результаты наработки на отказ узлов дробилки верхних (BV) и нижних валков (NB) (средние значения)

Из анализа полученных результатов следует, что среднее значение наработки на отказ отдельных узлов привода с использованием МПЭЭД увеличивается с 34,8 млн. час до 43,2 млн. час, что в 1,24 раза больше, чем у привода с МЗ.

**Выводы.** Проведено измерение виброперемещения валков дробилки в промышленных условиях агломерационного цеха АМК ООО «ЮГМК». Полученные результаты указывают на то, что при использовании в приводе муфты пальцевой с эластичным элементом дискового типа наблюдается снижение виброперемещения на корпусе подшипниковой опоры вала с холостой стороны на 1,13 раза, с приводной стороны на 0,99 раза. Полученные данные о наработке на отказ отдельных узлов четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 указывают на повышение надежности и увеличение срока службы в 1,24 раза при использовании в приводе муфты пальцевой с эластичным элементом дискового типа. Дальнейшие исследования будут направлены на рассмотрение возможности использования предлагаемой муфты в приводах дробилок другого типа.

#### **Перечень ссылок**

1. Власенко Д.А. Дробильное оборудование предприятий черной металлургии. Конструкция и расчет: учебное пособие / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, А.П. Жильцов [и др.]. – Липецк: «Изд-во Липецкого государственного технического университета», 2023. – 140 с. – ISBN 978-5-00175-159-5. – EDN HCMGOR.
2. Bradley E. Reliability Engineering: A Life Cycle Approach / E. Bradley. – Second edition. – CRC Press, 2022. – 438 p. – ISBN: 978-1-003-32648-9.
3. Мележик Р.С., Власенко Д.А. Анализ динамики и усовершенствование конструкции привода четырехвалковой дробилки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – №12 (765). – С. 28–37. – EDN HMEHSD.
4. Мележик Р.С. Исследование надежности и анализ повышения эффективности дробилки ДЧГ 900×700 с усовершенствованным приводом в условиях агломерационного цеха АМК ООО «ЮГМК» / Р.С. Мележик, Д.А. Власенко // Черные металлы. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2025. – № 4. – С. 4–10. – EDN NEMUYE.
5. Патент №210721 РФ. Муфта пальцевая с эластичным элементом дискового типа / Р.С. Мележик, Д.А. Власенко, А.П. Жильцов, Я.Э. Крупнов. – Заявка №2021113946 от 17.05.2021; опубл.28.04.2022, Бюл. №20. – EDN QMPBJF.

УДК 621.181:681.5

## СИНТЕЗ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

А.А. Орлов, Е.В. Крылова, Д.Р. Графов  
ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»,  
г. Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы проектирования и анализа каскадной автоматической системы регулирования температуры острого пара барабанного котла БКЗ-210-140. Выполнен тепловой расчет котельного агрегата на газовом топливе. Проведен расчет оптимальных настроек ПИ-регуляторов одноконтурной и каскадной АСР.

**Abstract.** The paper addresses the design and analysis of a cascade automatic control system for superheated steam temperature of the BKZ-210-140 drum boiler. Thermal calculation of the boiler unit on gaseous fuel was performed. Optimal tuning of PI-controllers for single-loop and cascade ACS was calculated.

**Ключевые слова:** автоматическая система регулирования; каскадная АСР; котел БКЗ-210-140; температура острого пара; ПИ-регулятор; тепловой расчет.

**Keywords:** automatic control system; cascade ACS; BKZ-210-140 boiler; superheated steam temperature; PI-controller; thermal calculation.

Для обеспечения безопасности и максимальной эффективности в современной теплоэнергетике критически важна автоматизация технологических процессов. Котельные агрегаты тепловых электростанций требуют высокоточного управления параметрами пара, в частности, температурой перегретого пара. Недопустимые отклонения от установленных норм могут привести к аварийным ситуациям и преждевременному износу оборудования [1].

В качестве объекта исследования выбран барабанный паровой котел БКЗ-210-140 с естественной циркуляцией, характеризующийся паропроизводительностью 210 т/ч, давлением перегретого пара 13,7 МПа и температурой 560°C. В качестве топлива используется природный газ с теплотой сгорания 37,87 МДж/м<sup>3</sup>. В рамках данной работы исследуется проектирование каскадной автоматической системы регулирования (АСР) температуры перегретого пара и

проводится сравнительный анализ её эффективности с одноконтурной схемой.

### **1. Тепловой расчет котла БКЗ-210-140**

Тепловой расчет выполнен методом обратного теплового баланса. КПД котла брутто составил 94,628%. Полный расход топлива на котел — 4,075 м<sup>3</sup>/с. Потери тепла с уходящими газами — 4,698%, от наружного охлаждения — 0,574%.

Конструктивный расчет топочной камеры выполнен итерационным методом. Установлены оптимальные габариты топки: ширина 6,95 м, глубина 5 м, расчетная высота 17,25 м. Расчетный объем топочной камеры 553,85 м<sup>3</sup> обеспечивает полное выгорание топлива при тепловом напряжении сечения 4,93 МВт/м<sup>2</sup>. Температура газов на выходе из топки — 1258°C. Суммарная площадь рабочей поверхности топки составила 458,23 м<sup>2</sup> [2].

Расчет пароперегревателей показал, что суммарные потери давления в пароперегревателе составляют 1,644 МПа (12% от давления перегретого пара). Распределение потерь по поверхностям соответствует стандартным соотношениям: потолочный пароперегреватель — 10%, холодный пакет — 15%, ширмовый пароперегреватель — 30%, горячий пакет первой ступени — 20%, горячий пакет второй ступени — 25%.

### **2. Каскадная АСР температуры острого пара**

Для температурного контроля острого пара котла БКЗ-210-140 применяется метод впрыска конденсата, обеспечивающий максимальное охлаждение пара на 80°C в номинальном режиме. Динамические свойства объекта управления разделены на два канала:

1. Инерционный канал: описывается моделью с тремя последовательными апериодическими звеньями (постоянная времени 560 с) и одним звеном (постоянная времени 105 с). Коэффициент передачи: 0,45.

2. Малоинерционный канал: описывается моделью с двумя последовательными апериодическими звеньями (постоянные времени 72 с и 60 с). Коэффициент передачи: 0,6.

Каскадная система содержит два регулятора: корректирующий (внешний контур) и стабилизирующий (внутренний контур). Расчет выполнен в математическом пакете MathCad 15 при частотном показателе колебательности  $M = 1,55$ .

### 2.1. Результаты расчета регуляторов

Для одноконтурной АСР параметры ПИ-регулятора составили:  $k_{i1} = 2,172$ ,  $T_{i1} = 896,05$  с,  $k_{i1} = 0,00242$ . Резонансная частота —  $0,0012$  рад/с.

Для каскадной АСР параметры стабилизирующего регулятора:  $k_i = 7,376$ ,  $T_i = 107,25$  с,  $k_i = 0,06877$  (резонансная частота  $0,0288$  рад/с). Параметры корректирующего регулятора:  $k_i = 1,911$ ,  $T_i = 1084,91$  с,  $k_i = 0,00176$  (резонансная частота  $0,0014$  рад/с) [3].

### 2.2. Частотная развязка контуров

Результаты анализа частотной развязки указывают на то, что внутренний контур обладает значительно большей пропускной способностью, чем внешний. Это обеспечивает его способность к быстрой реакции и подавлению внешних возмущений, минимизируя их влияние на регулируемую величину внешнего контура, что является основополагающим преимуществом каскадной конфигурации.

### 2.3. Сравнение качества переходных процессов

Сравнение выполнено в среде динамического моделирования SimInTech. По каналу задания существенных различий не выявлено: динамическое отклонение одноконтурной АСР —  $0,314$ , каскадной —  $0,295$ ; статическое отклонение в обоих случаях равно нулю; время регулирования —  $12000$  с и  $10000$  с соответственно [4].

По каналу возмущения каскадная АСР демонстрирует принципиальное преимущество: динамическое отклонение составило всего  $0,0043$  против  $0,232$  у одноконтурной АСР (в  $54$  раза меньше), время регулирования —  $8000$  с против  $13000$  с (в  $1,6$  раза меньше).

#### Выводы

1. В результате теплового расчета котла БКЗ-210-140 определены: КПД  $94,628\%$ , расход топлива  $4,075$  м<sup>3</sup>/с, габариты топочной камеры  $6,95 \times 5 \times 17,25$  м.
2. Рассчитаны оптимальные настройки ПИ-регуляторов одноконтурной и каскадной АСР температуры острого пара.
3. Установлено, что каскадная АСР превосходит одноконтурную по каналу возмущения: динамическое отклонение в  $54$  раза меньше, время регулирования на  $38\%$  меньше.
4. Сделан вывод о целесообразности применения каскадной схемы регулирования температуры острого пара для котла БКЗ-210-140.

#### Перечень ссылок

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с.
2. Липов Ю.М. Тепловой расчет парового котла: учебное пособие для вузов. 2001. — 176 с.
3. Кузищин В.Ф., Зверьков В.П., Грязнов И.Е. // Теплоэнергетика. — 1995. — № 10. — С. 30–37.
4. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики.

УДК 620.179:621.438

**КОМБИНИРОВАННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ  
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ  
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
АГРЕГАТОВ**

А.А. Орлов, Е.В. Крылова, А.М. Кенжалыев, В.М. Щербаков  
ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ».

г. Москва, Россия

**Аннотация.** В работе рассмотрена разработка интеллектуальной системы комбинированного неразрушающего контроля газотурбинных двигателей. Предложен подход к комплексной диагностике на основе объединения методов контроля и интеллектуальной обработки данных. Показаны преимущества автоматизации диагностики и повышения эффективности эксплуатации промышленных агрегатов.

**Annotation.** The paper considers the development of an intelligent system for combined non-destructive testing of gas turbine engines. An approach to comprehensive diagnostics based on the integration of testing methods and intelligent data processing is proposed. The advantages of diagnostic automation and improving the operational efficiency of industrial units are presented.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, неразрушающий контроль, диагностика, интеллектуальная система, автоматизация, комбинированный контроль, промышленные агрегаты.

**Keywords:** gas turbine engine, non-destructive testing, diagnostics, intelligent system, automation, combined testing, industrial units.

Современные промышленные агрегаты, оснащенные газотурбинными двигателями, являются сложными техническими системами, работающими в условиях высоких температур, вибрационных и механических нагрузок. Надежность и эффективность эксплуатации таких установок напрямую зависят от своевременного выявления дефектов и оценки технического состояния основных конструктивных элементов [1].

В процессе эксплуатации газотурбинных двигателей возможно возникновение различных дефектов: трещин, усталостных повреждений, эрозионного и коррозионного износа, деформаций рабочих лопаток, дефектов сварных соединений и других нарушений

структуры материалов. Несвоевременное обнаружение подобных повреждений может привести к снижению производительности оборудования, увеличению эксплуатационных затрат и возникновению аварийных ситуаций.

Для обеспечения безопасной эксплуатации газотурбинных установок широко применяются методы неразрушающего контроля, позволяющие получать информацию о состоянии объекта без его демонтажа и разрушения [2]. Наиболее распространенными методами диагностики являются ультразвуковой, вихретоковый, вибрационный и тепловизионный контроль.

Ультразвуковой метод обеспечивает выявление внутренних дефектов материалов и позволяет контролировать состояние элементов со значительной толщиной стенок. Вихретоковый контроль эффективен при обнаружении поверхностных и приповерхностных дефектов токопроводящих материалов. Методы вибрационной диагностики позволяют оценивать техническое состояние вращающихся узлов и выявлять нарушения режимов работы двигателя.

Тепловизионный контроль используется для обнаружения локальных температурных аномалий, возникающих при наличии дефектов или изменении условий эксплуатации оборудования [3].

Несмотря на эффективность перечисленных методов, использование только одного способа контроля не позволяет обеспечить высокую достоверность диагностики. Каждый метод обладает собственными ограничениями, связанными с чувствительностью, глубиной контроля, влиянием внешних факторов и особенностями конструкции контролируемого объекта. В связи с этим перспективным направлением является создание комбинированных систем диагностики, объединяющих возможности нескольких методов неразрушающего контроля.

Особую актуальность в настоящее время приобретает внедрение интеллектуальных технологий обработки диагностической информации. Развитие цифровых технологий, автоматизированных систем управления и методов машинного обучения позволяет создавать интеллектуальные системы диагностики, способные выполнять анализ больших объемов данных и автоматически формировать диагностические заключения [4].

Предлагаемая интеллектуальная система комбинированного неразрушающего контроля предназначена для комплексной диагностики элементов газотурбинных двигателей. Основной задачей системы является повышение достоверности выявления дефектов за

счет объединения нескольких методов контроля и применения интеллектуальных алгоритмов обработки информации.

Структурно система включает подсистему сбора диагностических данных, модуль предварительной обработки сигналов, интеллектуальный модуль анализа и классификации дефектов, а также систему визуализации результатов контроля. В качестве основных методов диагностики предполагается использование ультразвукового, вихретокового и вибрационного контроля.

На этапе сбора информации осуществляется регистрация диагностических сигналов с использованием соответствующих датчиков и измерительных преобразователей. Полученные данные поступают в модуль предварительной обработки, где выполняется фильтрация шумов, нормализация параметров и выделение информативных диагностических признаков.

Интеллектуальный модуль системы реализует алгоритмы анализа диагностической информации и распознавания дефектов. Для этого могут использоваться методы искусственных нейронных сетей, экспертные системы и алгоритмы машинного обучения. Применение интеллектуальных технологий позволяет автоматизировать процесс принятия решений и снизить влияние человеческого фактора на результаты диагностики.

Одним из преимуществ разработанной системы является возможность комплексной оценки технического состояния оборудования. Комбинированный подход позволяет выявлять дефекты различного типа и получать более полную информацию о состоянии элементов газотурбинного двигателя. Это особенно важно при эксплуатации оборудования в условиях повышенных нагрузок и длительных межремонтных интервалов.

Автоматизация процессов контроля способствует сокращению времени диагностики и повышению эффективности технического обслуживания оборудования. Использование интеллектуальной системы позволяет своевременно выявлять потенциально опасные дефекты и принимать решения о необходимости проведения ремонтных работ.

Дополнительным преимуществом является возможность реализации элементов прогнозирования технического состояния оборудования. На основе накопленных диагностических данных система может выполнять анализ тенденций изменения параметров и прогнозировать развитие дефектов. Такой подход соответствует современной концепции предиктивного обслуживания

промышленных агрегатов и позволяет минимизировать вероятность аварийных отказов [5].

Внедрение интеллектуальных систем комбинированного неразрушающего контроля является перспективным направлением развития технологий диагностики промышленных машин и агрегатов. Использование подобных решений способствует повышению надежности эксплуатации газотурбинных двигателей, снижению затрат на техническое обслуживание и повышению уровня промышленной безопасности.

Разработка интеллектуальной системы комбинированного неразрушающего контроля газотурбинных двигателей представляет собой актуальную научно-техническую задачу, направленную на совершенствование процессов эксплуатации и диагностики промышленного оборудования. Применение интеллектуальных технологий и автоматизированной обработки диагностической информации позволяет повысить достоверность контроля, обеспечить своевременное выявление дефектов и повысить эффективность эксплуатации газотурбинных установок.

#### **Перечень ссылок**

1. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник. — М. : Машиностроение, 2003. — 656 с.
2. Соснин Ф. Р., Назаров В. И. Методы и средства неразрушающего контроля. — М. : Академия, 2009. — 240 с.
3. Бида В. И. Диагностика газотурбинных двигателей. — Самара : Самарский университет, 2012. — 318 с.
4. Гаврилов А. И., Ковалев С. М. Интеллектуальные системы технической диагностики. — СПб. : Питер, 2018. — 287 с.
5. Wang T. Intelligent Predictive Maintenance Technologies for Industrial Equipment // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2020. — Vol. 138. — pp. 106–120.

УДК 621.438

**СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ И  
ЛОГИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

А.А. Орлов, В.М. Щербаков, А.М. Кенжалыев, А.Д. Авдеев  
ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ», г. Москва

***Аннотация.** В докладе представлена структурная схема алгоритма обработки и логического согласования данных в интеллектуальной системе диагностирования газотурбинных двигателей. Предложен подход к объединению параметрических, данных с целью повышения достоверности диагностики технического состояния оборудования.*

***Annotation.** The report presents the structural scheme of an algorithm for data processing and logical coordination in an intelligent diagnostic system for gas turbine engines. An approach for integrating parametric, data is proposed in order to improve the reliability of technical condition diagnostics.*

***Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, интеллектуальная диагностика, обработка данных, логическое согласование, остаточный ресурс, автоматизированная система управления, диагностические признаки.*

***Keywords:** gas turbine engine, intelligent diagnostics, data processing, logical coordination, residual life, automated control system, diagnostic features.*

Современные газотурбинные двигатели представляют собой сложные энергетические объекты, функционирование которых сопровождается большим количеством взаимосвязанных процессов. Надежность эксплуатации газотурбинных установок во многом определяется эффективностью систем контроля и диагностики. В условиях непрерывного роста требований к энергетической эффективности, безопасности и снижению эксплуатационных затрат особую актуальность приобретают интеллектуальные методы обработки диагностической информации.

В процессе работы газотурбинного двигателя формируется значительный объем параметрических данных, включающих температуру газа, давление, расход топлива, частоту вращения роторов, вибрационные характеристики, параметры масляной системы и другие

показатели. При этом отдельные параметры могут изменяться под воздействием внешних факторов, режимов нагрузки и естественного износа элементов конструкции. Использование только одного диагностического параметра не обеспечивает достаточной достоверности оценки технического состояния. Структурная схема алгоритма обработки и логического согласования данных (рис.1) строится по модульному принципу и включает несколько функциональных уровней.

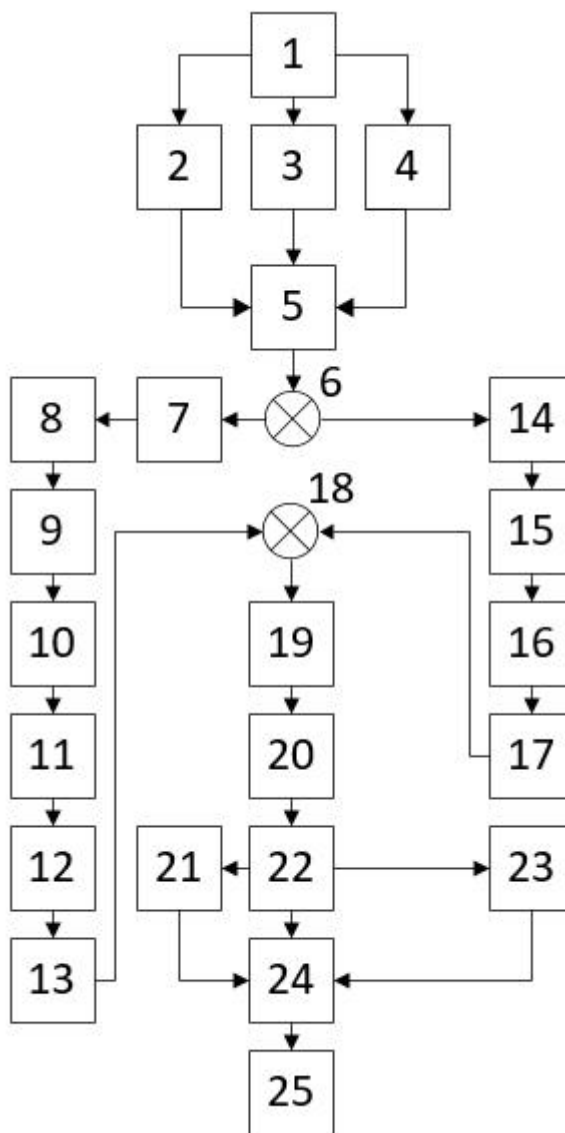


Рис.1. Структурная схема алгоритма обработки и логического согласования данных.

На первом уровне осуществляется сбор информации с датчиков и измерительных преобразователей. В систему поступают данные от температурных, вибрационных, расходомерных и скоростных

датчиков, установленных на различных узлах газотурбинного двигателя [1]. Передача информации выполняется через систему сбора и передачи данных в режиме реального времени.

Следующим этапом является предварительная обработка информации. На данном этапе производится фильтрация шумов, устранение выбросов и компенсация случайных погрешностей измерения. Для обработки временных рядов используются цифровые фильтры [2], методы скользящего среднего и алгоритмы медианной фильтрации. Это позволяет повысить устойчивость диагностической системы к помехам и нестабильности измерительных каналов.

После предварительной обработки осуществляется нормализация параметров. Поскольку измеряемые величины имеют различную размерность и диапазоны изменения, требуется приведение данных к унифицированному виду. Нормализация обеспечивает возможность совместного анализа различных диагностических признаков и формирование интегральных показателей технического состояния.

Важнейшим элементом системы является блок логического согласования данных. Его задача заключается в анализе взаимосвязей между параметрами и выявлении противоречий между результатами измерений. Например, рост температуры газа за турбиной при одновременном снижении расхода топлива может свидетельствовать о неисправности температурного датчика либо о возникновении локального дефекта камеры сгорания. Аналогично увеличение вибрации ротора без изменения частоты вращения может указывать на нарушение балансировки или дефект подшипникового узла.

Для устранения подобных противоречий используются логические правила, основанные на экспертных знаниях и математических моделях работы двигателя. Алгоритм сравнивает текущие значения параметров с эталонными моделями и определяет степень согласованности диагностических признаков. При выявлении несоответствий формируется дополнительная проверка по смежным параметрам. Такой подход позволяет исключить влияние ложных сигналов и повысить достоверность диагностики.

В структуре алгоритма предусмотрен модуль формирования интегральных диагностических коэффициентов. Данный модуль объединяет отдельные признаки в комплексную оценку технического состояния двигателя. Для этого применяются методы весового суммирования, нечеткой логики и интеллектуального анализа данных [3]. Интегральный коэффициент позволяет количественно оценить степень деградации оборудования и определить вероятность возникновения отказа.

Особое значение имеет прогнозирование остаточного ресурса газотурбинного двигателя. На основании накопленных данных система определяет скорость изменения диагностических параметров и строит прогноз дальнейшего развития технического состояния. Прогнозирование остаточного ресурса позволяет перейти от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования.

Алгоритм логического согласования данных должен обеспечивать работу в условиях неполноты информации. На практике возможны ситуации потери части измерительных каналов или появления недостоверных данных вследствие отказов датчиков. В таких случаях система использует корреляционные зависимости между параметрами и восстанавливает недостающую информацию на основе расчетных моделей. Это обеспечивает устойчивость интеллектуальной системы диагностики даже при частичной деградации измерительной инфраструктуры.

Модульный принцип построения позволяет изменять набор диагностических признаков и алгоритмов в зависимости от конструкции двигателя, режимов эксплуатации и требований конкретного объекта. Это делает систему универсальной для применения в энергетике, газотранспортной отрасли и авиационной технике.

**Выводы:**

1. Разработана структура алгоритма обработки и логического согласования диагностических данных газотурбинного двигателя.
2. Предложенный алгоритм обеспечивает объединение параметрической, вибрационной и эксплуатационной информации в единую систему оценки технического состояния.
3. Использование логических правил согласования данных позволяет повысить достоверность диагностики и снизить вероятность ложных срабатываний.
4. Применение интегральных диагностических коэффициентов обеспечивает возможность раннего выявления дефектов и прогнозирования остаточного ресурса оборудования.
5. Модульный принцип построения алгоритма позволяет адаптировать систему к различным типам газотурбинных установок и условиям эксплуатации.

**Перечень ссылок**

1. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Будадин О.Н., Калашников Е.А. Интеллектуальная система автоматического управления технологическими режимами работы энергоемкого агрегата // Электротехническая статья – 2024: материалы конференции. – Москва: Национальный

исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024. – С. 40.

2. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Кенжалыев А.М., Авдеев А.Д. Цифровизация элементов объектов энергетической отрасли на примере лопатки газотурбинного двигателя // Материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 154.

3. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д. Интеллектуальная система мониторинга и диагностики элементов газотурбинной установки (ИСМДЭГТУ) // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27. – № 2. – С. 211–221.

УДК 621.59(075.8)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СЕТИ КОЛЬЦЕВОГО ТИПА ПО КРИТЕРИЯМ СТОИМОСТИ И ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ PSI

А.Ю. Рутковский  
ФГБОУ ВО «ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,  
г. Алчевск, ЛНР

**Аннотация.** Рассмотрена задача двухкритериальной оптимизации диаметров труб пневматической сети кольцевого типа по критериям стоимости и потерь давления. Для поиска множества Парето-оптимальных решений применен метод исследования пространства параметров (PSI) с использованием LP- $\tau$  последовательностей Соболя.

**Annotation.** The problem of two-criteria optimization of pipe diameters for a ring-type pneumatic network is considered, based on the criteria of cost and pressure loss. To find the set of Pareto-optimal solutions, the Parameter Space Investigation (PSI) method using Sobol's LP- $\tau$  sequences is applied.

**Ключевые слова:** кольцевая пневматическая сеть, оптимизация, метод PSI, LP- $\tau$ -последовательности Соболя, Парето-множество.

**Keywords:** ring pneumatic network, optimization, PSI method, Sobol's LP- $\tau$  sequences, Pareto set

Проектирование пневматических сетей традиционно основывается на нормативных документах и методе «экономически выгодной скорости», при котором диаметр каждого участка выбирается из стандартного ряда так, чтобы средняя скорость воздуха находилась в диапазоне 6–12 м/с. Такой подход не позволяет в полной мере учитывать компромисс между капитальными затратами (CAPEX) на строительство сети и эксплуатационными расходами (OPEX), обусловленными потерями давления и повышенным энергопотреблением компрессорных станций.

Кольцевые пневматические сети обладают важными преимуществами по сравнению с древовидными схемами, наиболее распространёнными на горных предприятиях. Они обеспечивают резервирование путей подачи воздуха, повышают надёжность снабжения потребителей и снижают риск аварийных простоев оборудования. Однако их расчёт и оптимизация существенно сложнее

из-за необходимости одновременного выполнения законов Кирхгофа в замкнутых контурах.

Научная новизна работы заключается в первом применении метода исследования пространства параметров (PSI) с LP-ф-последовательностями Соболя для решения задачи двухкритериальной оптимизации диаметров труб кольцевой пневматической сети горного предприятия по критериям минимума капитальных затрат и потерь давления.

В отличие от стохастических эволюционных алгоритмов (например, NSGA-II [1]), метод PSI обеспечивает детерминированное и равномерное зондирование многомерного пространства поиска, что особенно эффективно при дискретном характере переменных — выборе диаметров труб из конечного стандартного сортамента.

В качестве объекта исследования рассмотрена двухкольцевая пневматическая сеть шахты (рисунок 1), состоящая из вертикального участка КС–А и двух замкнутых колец в подземной части с потребителями в узлах В, D, E, F.

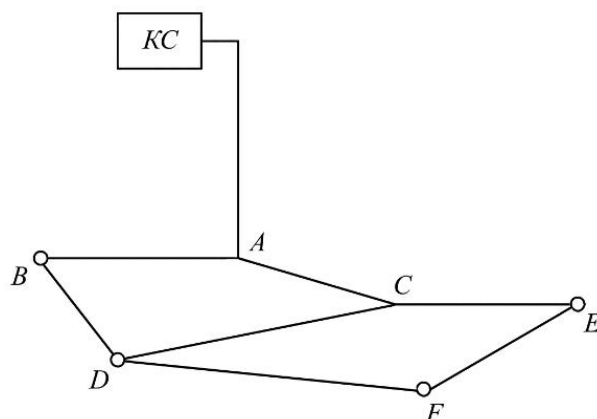


Рисунок 1 — Схема двухкольцевой пневматической сети горного предприятия

Гидравлический расчёт сети основан на законах Кирхгофа. Баланс расходов в узле (первый закон Кирхгофа) записывается в виде:

$$q_i = Q_j, \quad (1)$$

где  $q_i$  — массовый расход на  $i$ -м участке, кг/с;  $Q_j$  — отбор воздуха в узле  $j$ , кг/с.

Баланс давлений в каждом кольце (второй закон Кирхгофа):

$$\varepsilon_k \Delta p_k = 0, \quad (2)$$

$k$  — кольцо

где  $e_k = +1$ , если направление потока на участке  $k$  совпадает с направлением обхода кольца, и  $e_k = -1$  в ином случае.

Система нелинейных уравнений (1)–(2) решается итерационным методом Харди–Кросса. На каждой итерации  $s$  для каждого кольца  $k$  вычисляется поправочный массовый расход:

$$\Delta n_k^{(s)} = - \frac{\sum_{i \in k} \delta_{ik} S_i |n_k^{(s)}| n_k^{(s)}}{2 S_k |n_k^{(s)}|} \quad (3)$$

где  $n_k^{(s)}$  — поправочный массовый расход для кольца  $k$  на итерации  $s$ , кг/с;  $S_i$  — гидравлическое сопротивление  $i$ -го участка.

Итерации продолжаются до выполнения условия сходимости:

$$\max_k |\Delta n_k^{(s)}| \leq \varepsilon_{n_{abs}} \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{n_{abs}} = 10^{-3}$  кг/с — допуск сходимости.

Потери давления на каждом участке определяются по формуле Дарси–Вейсбаха.

Целевая функция капитальных затрат (CAPEX):

$$F_1 = \sum_{i=1}^n C(d_i) l_i, \quad (5)$$

где  $C(d_i)$  — стоимость одного метра трубы диаметром  $d_i$ , руб/м.

Целевая функция потерь давления (OPEX):

$$F_2 = \frac{\sum_{j=1}^m (p_A - p_j) G_j}{\sum_{j=1}^m G_j}, \quad (6)$$

где  $p_A$  — давление в главном распределительном узле А, Па;  $p_j$  — давление у  $j$ -го потребителя, Па;  $G_j$  — массовый расход потребителя  $j$ , кг/с.

Двухкритериальная задача оптимизации параметров сети записывается в виде:

$$\min_{\mathbf{d}} \{F_1(\mathbf{d}), F_2(\mathbf{d})\}, \quad (7)$$

при ограничениях на давление у потребителей, скорости потока и дискретные значения диаметров  $\mathbf{d}$  из стандартного ряда по ГОСТ

8732-2025.

Для поиска множества Парето-оптимальных решений применен метод PSI [2]. В нормированном пространстве параметров с помощью LP-τ-последовательностей Соболя генерируется равномерно распределённое множество  $N$  пробных точек. Каждая точка отображается на ближайшие допустимые дискретные диаметры труб. Для каждого варианта выполняется полный гидравлический расчёт методом Харди–Кросса, проверяются ограничения по давлению и скорости. Из допустимых решений методом последовательного исключения доминируемых отбирается Парето-множество. Данные о пневмопотребителях приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры пневмопотребителей и их расстановка на участках  
пневмосети

| Тип потребителя                      | Номинальн<br>ое<br>давление,<br>МПа | Номинальны<br>й расход,<br>м <sup>3</sup> /мин | Количество<br>потребителей в<br>пунктах |   |   |    |
|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|---|---|----|
|                                      |                                     |                                                | В                                       | D | E | F  |
| Комбайн                              | 0.35                                | 30.6                                           |                                         | 1 | 1 |    |
| Лебедка комбайна                     | 0.35                                | 16.2                                           |                                         | 1 | 1 |    |
| Породопогрузочная<br>машина          | 0.4                                 | 20.0                                           |                                         | 1 | 1 | 1  |
| Вентилятор местного<br>проветривания | 0.5                                 | 20.0                                           | 1                                       | 1 | 1 | 1  |
| Отбойный молоток ОМ                  | 0.5                                 | 1.1                                            |                                         |   |   | 10 |
| Лебедка проходческая                 | 0.4                                 | 5.6                                            |                                         |   |   | 1  |
| Насос участкового<br>водоотлива      | 0.4                                 | 3.0                                            |                                         |   |   | 1  |
| Щитовой агрегат                      | 0.35                                | 40.2                                           | 1                                       |   |   |    |
| Бурильная машина                     | 0.5                                 | 7.2                                            | 1                                       |   |   |    |
| Гировоз                              | 0.35                                | 30.6                                           |                                         | 1 |   |    |

Результаты оптимизации при  $N = 2048$  пробных точках позволили выделить 8 Парето-оптимальных вариантов (таблица 2). Во всех вариантах давление у потребителей составляет 0,6499–0,6500 МПа.

Таблица 2

### Парето-оптимальные варианты решений

| № | $F_1$ ,<br>млн<br>руб | $F_2$ ,<br>Па | Давление<br>на КС,<br>МПа | Расчетные значения диаметров труб на участках |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-----------------------|---------------|---------------------------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |                       |               |                           | КС → А                                        | А → В | А → С | В → D | С → D | С → E | D → F | E → F |
| 1 | 3,241                 | 89,1          | 0,775                     | 200                                           | 150   | 300   | 100   | 100   | 125   | 200   | 180   |
| 2 | 3,458                 | 45,8          | 0,774                     | 200                                           | 200   | 250   | 250   | 100   | 180   | 150   | 125   |
| 3 | 3,801                 | 29,8          | 0,774                     | 200                                           | 180   | 300   | 180   | 100   | 200   | 300   | 180   |
| 4 | 3,973                 | 27,8          | 0,659                     | 250                                           | 150   | 300   | 100   | 125   | 300   | 180   | 180   |
| 5 | 4,241                 | 18,9          | 0,659                     | 250                                           | 250   | 300   | 150   | 180   | 250   | 125   | 180   |
| 6 | 4,320                 | 15,7          | 0,775                     | 200                                           | 300   | 300   | 300   | 150   | 180   | 200   | 125   |
| 7 | 4,479                 | 12,9          | 0,775                     | 200                                           | 300   | 300   | 180   | 150   | 250   | 300   | 200   |
| 8 | 5,323                 | 8,7           | 0,659                     | 250                                           | 300   | 300   | 300   | 200   | 300   | 300   | 100   |

На рисунке 2 представлен Парето-фронт полученных решений. Наиболее рациональным является вариант №4 (минимальное давление на КС — 0,659 МПа), который, несмотря на несколько более высокие капитальные затраты, чем у варианта №1, обеспечивает примерно на 10% меньшие эксплуатационные расходы на электроэнергию [3].

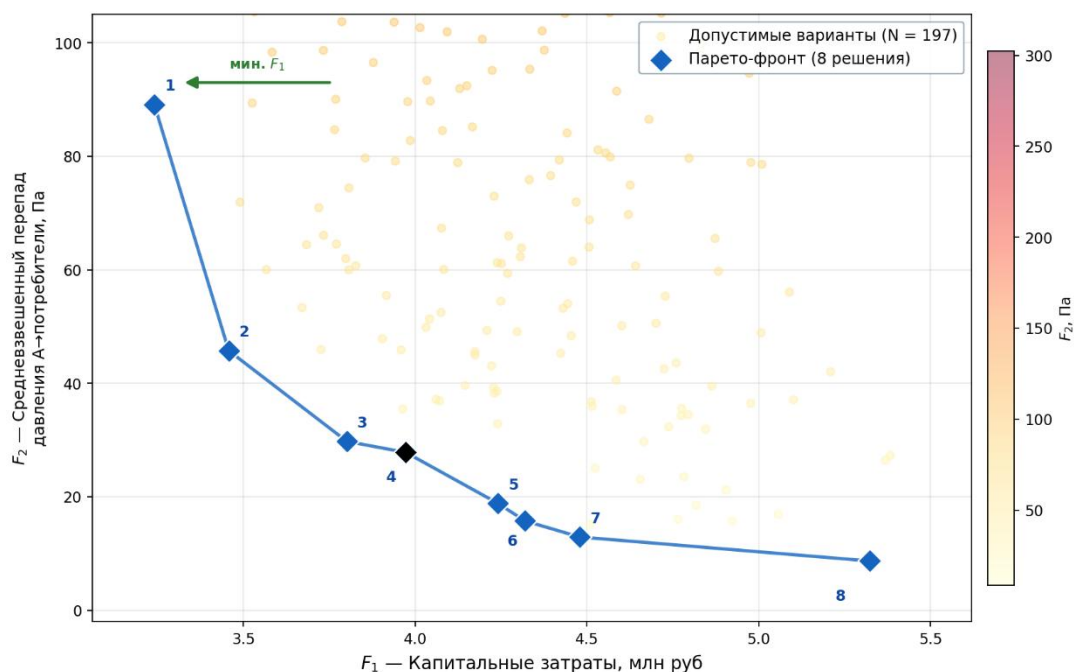


**Рисунок 2 — Парето-фронт двухкритериальной оптимизации  
пневматической сети ( $N = 2048$ )**

**Выводы.**

Предложенная методика позволяет проектным организациям формировать перечень компромиссных вариантов параметров трубопроводной сети и делать обоснованный выбор в зависимости от соотношения капитальных затрат (CAPEX) на приобретение труб и прокладку сети и последующих эксплуатационных расходов (OPEX) на электроэнергию. Преимуществом выбранного подхода является гарантированная равномерность распределения пробных точек в многомерном дискретном пространстве, что особенно ценно при большом числе дискретных переменных и необходимости надёжного анализа множества компромиссных решений.

#### **Перечень ссылок**

1. Deb, K. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II / K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. — 2002. — Т. 6, № 2. — С. 182–197. — DOI: 10.1109/4235.996017.
2. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. — М.: Наука, 1981. — 110 с.
3. Bhatia, A. Compressors and Compressed Air Systems; Continuing Education and Development Inc.: Woodcliff Lake, NY, USA, 2009.

УДК 621.762:66.03

**ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПЫЛЕЗАДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТОВ**

И.В. Садовая, Ю.А. Алехов, И.Н. Волошанович, В.Г. Аленин  
ФГБНУ «НИИ «Реактивэлектрон»  
г. Донецк, ДНР

***Аннотация.** Изготовлена лабораторная установка и разработана методика для определения пылезадерживающей способности металлокерамических фильтроэлементов, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в поле центробежных сил.*

***Annotation.** A laboratory setup has been manufactured, and a method has been developed for determining the dust-retaining capacity of metal-ceramic filter elements obtained by self-propagating high-temperature synthesis in a centrifugal force field.*

***Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, металлокерамические фильтроэлементы, задерживающая способность.*

***Keywords:** self-propagating high-temperature fusion, metal ceramic filters, retention capacity.*

На сегодняшний день металлокерамические фильтроэлементы находят широкое применение в различных технологических процессах для очистки воздуха и газов от твердых частиц [1]. Для оценки их эффективности и работоспособности, фильтроэлементы подвергают испытаниям на плотность, пористость, механическую прочность, жаростойкость и коррозионную устойчивость, а также задерживающую и пропускную способность [2].

Для проведения исследований задерживающей и пропускной способности нами синтезированы высокопористые (50 – 60 %) образцы цилиндрической формы (60 x 53 мм) химического состава 32 масс.% Al и 68 масс.% Ni методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в поле центробежных сил, вектор которых расположен перпендикулярно направлению движения волнового фронта процесса СВС.

Проверку газодинамических характеристик испытуемых фильтроэлементов проводили с учетом требований ГОСТ Р 50554-93 [3] на созданной нами лабораторной установке, схема которой приведена на рисунке 1.

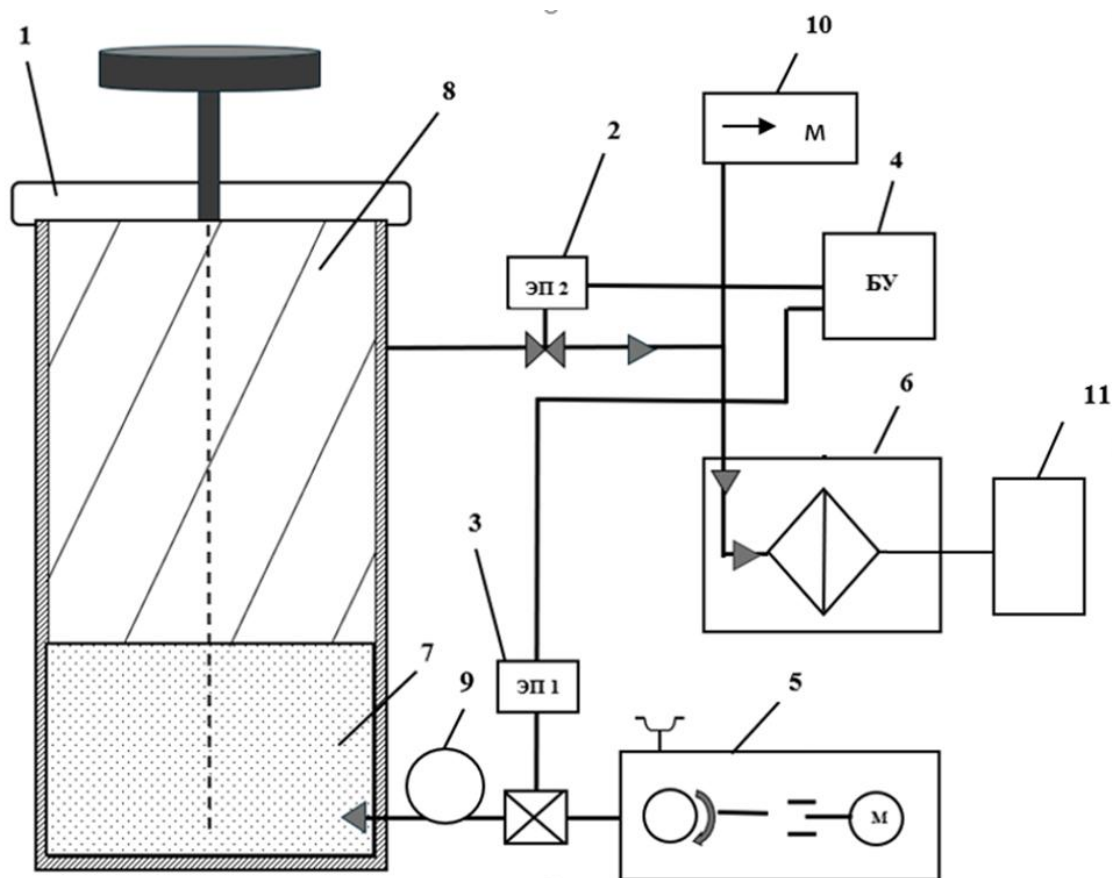


Рисунок 1 – Схема установки для определения пылезадерживающей способности металлокерамических фильтроэлементов: 1 – Смеситель ЛР 19-01-01; 2 – Электропневмоклапан ЭП 2; 3 – Электропневмоклапан ЭП 1; 4 – Блок управления ЛР 19-02-00; 5 – Компрессор Рокер-440; 6 – Корпус с фильтроэлементом ЛР 19-03-00; 7 – Распыляемый магнитный порошок (загрязнитель); 8 – Пылевоздушная смесь; 9 – Счетчик газа G2.5; 10 – Напоромер НМП-52-М3; 11 – Магнитный сепаратор

Установка содержит компрессор Rocker-440 (5), к которому последовательно дюритовыми трубками присоединены: счетчик газа G2.5 (9), смеситель ЛР 19-01-01 (1), электропневмоклапаны ЭП 1 (3) и ЭП 2 (2), блок управления ЛР 19-02-00 (4), напоромер НМП 52-М3 (10), металлический корпус с фильтроэлементом ЛР 19-03-00 (6) и магнитный сепаратор (11). Вход компрессора соединен с атмосферой.

Конструктивно все узлы установки смонтированы на конструкции каркасного типа, обеспечивающего доступ к элементам устройства и его перезагрузки. Органы управления прибора смонтированы в соответствии с эргономическими требованиями к

лабораторному оборудованию.

Установка позволяет получать пылевоздушную смесь с заданной концентрацией для подачи ее в тестируемый фильтроэлемент. Принцип действия установки состоит в следующем. Из компрессора (5) через счетчик газа (9) в смеситель (1) с распыляемым магнитным порошком (7) под различным давлением подается сжатый воздух. Пылевоздушная смесь (8) образуется в смесителе (1), снабженного загрузочным приемом с крышкой и патрубками, куда помещается загрязнитель и подается сжатый воздух из компрессора (5). Подача воздуха в смеситель (1) и выпуск пылевоздушной смеси (8) из него производится с помощью блока управления (4) и поочередного включения электропневмоклапанов (2) и (3). Таким образом достигается эффект вспушивания и получения стойкой взвешенной пылевоздушной смеси (8), вариация концентрации которой достигается изменением частоты электрических импульсов, подаваемых на электропневмоклапаны (2) и (3). Объем пылевоздушной смеси, прошедшей через фильтроэлемент измеряется с помощью счетчика газа (9), а ее давление с помощью напоромера (10). В конце испытания загрязнитель, который не осел на фильтре и прошел через него попадает в магнитный сепаратор (11). По окончании эксперимента магнитные частички порошка, прилипшие к магниту, отделяем и взвешиваем на аналитических весах ВЛР 200 с точностью 0,0005 г и согласно [3] рассчитываем пылезадерживающую способность металлокерамического фильтроэлемента.

**Выводы.** В ходе проделанной работы была изготовлена лабораторная установка и разработана методика для определения пылезадерживающей способности металлокерамических фильтроэлементов цилиндрической формы химического состава 32 масс. % Al и 68 масс. % Ni, полученных методом СВС в поле центробежных сил.

#### **Перечень ссылок**

1. Очистка газовых и жидких сред металлокерамическими СВС-фильтрами / А.А. Гейнман, В.Д. Гончаров, А.Л. Новоселов, Н.Ю. Щетинкина // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311, № 2, С. 146 – 150.
2. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез фильтроэлементов в системе Ni–Al в поле центробежных сил / И.В. Садовая, Ю.А. Алехов, Ф.Н. Сагдеева, А.В. Кара // Неорганические материалы. – 2025. – Т. 61, № 7 – 8, С. 508 – 514.
3. ГОСТ Р 50554-93. Промышленная чистота. Фильтры и фильтрующие элементы. Методы испытаний: утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 20.04.93 N 110: дата введения 1994-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200025912> (дата обращения: 20.03.2026). – Текст: электронный.

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.С. Голубов<sup>1</sup>, А.В. Сенецкий<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени  
Теплотехнический научно-исследовательский институт»,  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Исследование направлено на проведение анализа имеющихся подходов к созданию поршневых двигателей. Результаты показали, что в настоящее время имеется значительное количество разработок, направленных на совершенствование термодинамической эффективности двигателей внутреннего сгорания за счет режимных и конструктивных решений. Получено, что имеющиеся разработки могут служить основой при создании и совершенствовании энергетических поршневых двигателей.

**Annotation.** The study aimed to analyze existing approaches to piston engine development. The results showed that there are currently a significant number of developments aimed at improving the thermodynamic efficiency of internal combustion engines through operational and design solutions. It was concluded that these developments could serve as a basis for the creation and improvement of piston engines for energy production.

**Ключевые слова:** двигатель; газообмен; остаточные газы; наддув; эффективность цикла; удельный расход топлива.

**Keywords:** engine; gas exchange; residual gases; boost; cycle efficiency; specific fuel consumption.

Газопоршневые установки (ГПУ) в настоящее время являются основным типом приводных установок малой мощности в энергетике благодаря широкому мощностному ряду (от 5 кВт до 10 МВт), высокой экономичности и возможности адаптации под требуемые условия эксплуатации [1]. Последние десятилетия совершенствование двигателей внутреннего сгорания (ДВС) сопровождается увеличением показателей эффективности термодинамического цикла внедрением газотурбинного наддува, совершенствованием процессов тепло- и газообмена и т.д. [2].

Имеющиеся в литературе методики по большей части базируются на линейном моделировании или рассмотрении отдельных узлов без системного анализа [3]. Использование систем дифференциальных уравнений, позволяет учитывать взаимовлияние подсистем двигателя, при этом требуют уточнения зависимостей для различных режимов и

конструктивных схем [4].

Решение задачи повышения эффективности ДВС путем оптимизации геометрии камеры сгорания, повышение степени сжатия и т.д. находится на стыке теплотехники, аэродинамики, материаловедения и автоматизированного управления, что усложняет поиск единого правильного варианта. В связи с этим, актуальным является разработка комплексного подхода к анализу и совершенствованию термогазодинамических характеристик ДВС энергетической направленности с учетом установленных ограничений по показателям рабочего процесса.

Моделирование характеристик газообмена и теплового состояния может базироваться на уравнениях, представленных в [2]. Как результат оценивается мощность двигателя и его эффективность (КПД):

– мощность (индикаторная) ДВС:

$$N_i = L_i \frac{2n}{60\tau},$$

где  $L_i$  – индикаторная работа;  $\frac{2n}{60\tau}$  – число рабочих ходов в секунду;

$n$  – частота вращения вала;  $\tau$  – тактность ( $\tau=2$  и  $\tau=4$ );

– индикаторная эффективность (КПД) ДВС:

$$\eta_i = \frac{L_i}{Q_i} = \frac{3,6 \cdot 10^3 \cdot N_i}{H_u \cdot G_T},$$

где  $G_T$  – часовой расход топлива;  $H_u$  – теплотворная способность топлива.

Данные уравнения показывают насколько эффективно сжигаются газы в ДВС. Необходимо учитывать, что для ГПУ характерным будет наличие дополнительных потерь мощности на преодоление механических потерь (трение, насосный ход поршня, привод вспомогательных механизмов, гидравлические потери, механические потери привода и др.). Потери влияют на фактическую электрическую мощность, выдаваемую энергетической ГПУ.

В результате сопоставления опубликованных различными авторами исследований выявлены общие закономерности (табл. 1).

Повышенный  $\eta_i$  дизельных двигателей обусловлен большими степенью сжатия и величинами коэффициента избытка воздуха. Необходимо отметить, что эффективность работы ДВС с газотурбинным наддувом зависит также от применяемой системы наддува (рис. 1) [5].

**Таблица 1 – Значения индикаторных показателей двигателя на  
номинальном режиме**

| Двигатель                 | Показатель |              |                                                                  |
|---------------------------|------------|--------------|------------------------------------------------------------------|
|                           | $P_i$      | $\eta_i, \%$ | $b_i = \frac{G_r \cdot 10^3}{N_i}, \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ |
| Бензиновые:               |            |              |                                                                  |
| без наддува               | 0,7 – 1,2  | 0,25 – 0,40  | 225 – 330                                                        |
| с наддувом                | 0,9 – 1,9  |              |                                                                  |
| Дизельные четырехтактные: |            |              |                                                                  |
| без наддува               | 0,75 – 1,1 | 0,39 – 0,49  | 170 – 220                                                        |
| с наддувом                | 1,1 – 1,6  |              |                                                                  |
| Дизельные двухтактные:    |            |              |                                                                  |
| без наддува               | 0,5 – 0,9  | 0,39 – 0,53  | 162 – 220                                                        |
| с наддувом                | 1,0 – 2,2  |              |                                                                  |

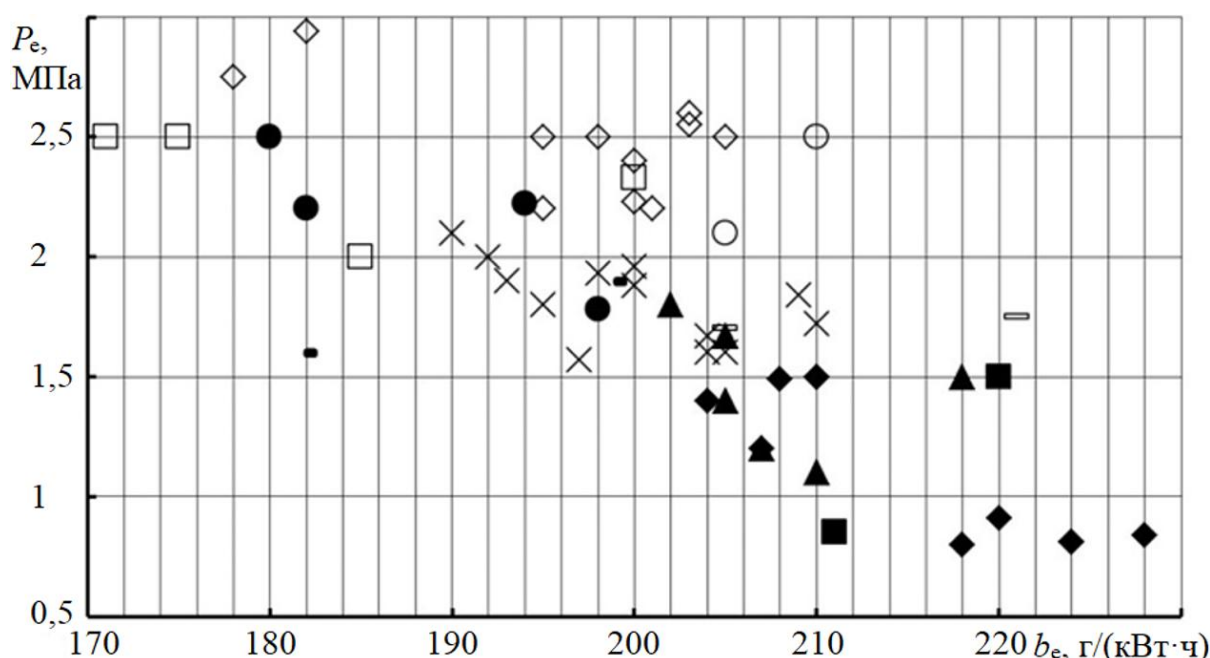


Рисунок 1 – Области использования различных систем газотурбинного наддува четырехтактных судовых дизелей при форсировании по среднему эффективному давлению: ◆ – импульсная система наддува; ■ – многоимпульсная система наддува с преобразователями импульсов; ▲ – двухимпульсная система наддува с преобразователями импульсов; ▬ – импульсная система наддува с модульными преобразователями импульсов; × – изобарная система наддува; ● – одноступенчатая система наддува с силовой турбиной (схема ТК+СТ) с импульсным подводом газов к турбине ТК; □ – одноступенчатая система наддува с силовой турбиной (схема ТК+СТ) с изобарным подводом газов к турбине ТК; ■ – одноступенчатая система наддува с силовой турбиной (схема СТ+ТК) с изобарным подводом газов к СТ; ○ – двухступенчатая система

воздухоснабжения (схема ТК ВД+ТК НД) с импульсным подводом газов к турбине ВД; ♦ – двухступенчатая система воздухоснабжения (схема ТК ВД+ТК НД) с изобарным подводом газов к турбине ВД

Исходя из изложенного можно отметить, что принимаемое техническое решение базируется на определении оптимальных соотношений параметров, которые повлияют на последующую эффективность использования топливных ресурсов и минимизацию уровня эмиссии вредных выбросов в окружающую среду при создании стационарных ГПУ. Можно выделить следующие основные факторы, характеризующие эффективность работы ДВС:

- количество продуктов сгорания топлива, остающихся в камере сгорания ДВС после такта выпуска (остаточные газы);
- принудительное повышение давления воздуха/горючей смеси на входе ДВС выше атмосферного уровня (наддув);
- газообмен и проточные (газодинамические) потери.

Проведенный анализ дает возможность обобщить имеющиеся сведения по созданию ДВС и особенности предварительного выбора типа и принципиальной компоновки ДВС для энергетической отрасли перед началом моделирования рабочих процессов ГПУ.

### **Выводы**

Проведенный анализ показал, что основные факторы, влияющие на эффективность рабочего процесса в ДВС взаимосвязаны. Наибольшее влияние оказывают: степень наполнения цилиндра свежим зарядом, величина коэффициента остаточных газов, параметры проточных трактов и наддува. Результаты расчетных и экспериментальных данных, представленных в литературных источниках показали, что поиск рационального решения при реализации системы наддува и совершенствовании процесса газообмена позволит снизить расход топлива без изменения конструктива двигателя. При этом, имеется значительный потенциал проведения научных и практических исследований в отношении реализации стационарных поршневых двигателей для энергетических объектов по следующим составляющим:

- определение влияния конструктивных и эксплуатационных характеристик на показатели эффективности и работоспособности двигателя для различных условий (мощность, климатические условия, состав и качество топлива и т.д.);
- разработка и предложение путей совершенствования конструктивных и режимных характеристик ГПУ на территории Российской Федерации, дальнейшее формирование методических рекомендаций к проектированию и эксплуатации.

### **Перечень ссылок**

1. Бердник А.Н. Эксплуатация судового энергетического оборудования // Научные проблемы водного транспорта. – 2022. – № 70(1). – С. 64–76.
2. Балашов А.А. Газодинамические потери в политропных потоках поршневых двигателей // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – С. 24–25.

3. Щигарцов И.М. Оценка эффективности работы поршневых двигателей с новыми механизмами реализации энергии газов // Научная дискуссия: вопросы технических наук. – 2014. – № 3(16). – 114 с.

4. Агафонов Д.С., Ахтулов А.Л., Приймак С.В. и др. Математическая модель рабочих процессов дизельного двигателя с комбинированной системой наддува // Стратегическая стабильность. – 2021. – № 1. – С. 21–24.

5. Кухарёнок Г.М. Агрегаты наддува: пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания». – Минск: БНТУ, 2021. – 61 с.

## МЕТОДИКА СОЗДАНИИ КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Т.П. Карев<sup>1</sup>, А.В. Сенецкий<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени  
Теплотехнический научно-исследовательский институт»,  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Предложена методика создания кислородно-топливной камеры сгорания (водород-кислородной камеры сгорания), работающей при сверхкритических параметрах. Рациональный подход к решению задачи построения кислородно-топливной камеры сгорания дает возможность выполнять последовательность действий, что в результате позволит сократить временные ресурсы и получить полноту сгорания водорода более 98%.

**Annotation.** A method for creating an oxygen-fuel combustion chamber (hydrogen-oxygen combustion chamber) operating at supercritical parameters is proposed. A rational approach to solving the problem of constructing an oxygen-fuel combustion chamber allows for a sequential process, resulting in reduced time and a hydrogen combustion efficiency exceeding 98%.

**Ключевые слова:** кислородно-топливное сжигание, водород, камера сгорания, целевое охлаждение, полнота сгорания, сверхкритические параметры.

**Keywords:** oxy-fuel combustion, hydrogen, combustion chamber, slot cooling, combustion efficiency, supercritical parameters.

В связи с принятой Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года и Парижским соглашением по климату остро стоит задача сокращения выбросов парниковых газов [1]. Одним из наиболее перспективных направлений является замещение углеродсодержащего топлива водородом, особенно в схемах внешнего перегрева пара на тепловых электростанциях. Применение водород-кислородных камер сгорания позволяет повысить начальные параметры пара без замены жаропрочных сталей котла, что снижает капитальные затраты [2]. Однако работа таких камер при сверхкритическом давлении (более 20 МПа) и с разбавлением окислителя водяным паром требует обоснования рационального состава топливно-окислительной среды и создания эффективной системы охлаждения [3].

На сегодняшний день известны конструкции водород-кислородных камер сгорания, предложенные Малышенко С.П., Счастливым А.И.,

Борзенко В.И., а также вихревые камеры сгорания Пиралишвили Ш.А. и Гурьянова А.И. [4]. В работах Смыгалиной А.Е. и Киверина А.Д. исследовано самовоспламенение водорода при высоких давлениях [2]. Вместе с тем, комплексная методика проектирования для сверхкритических параметров, учитывающая выбор степени разбавления окислителя водяным паром и конструкцию системы охлаждения, разработана недостаточно, а также нет рационального подхода (методики) к построению последовательности проведения исследований по разработке и последующему проектированию кислородно-топливных камер сгорания.

Целью настоящей работы является представление разработанной методики конструкторского расчета водород-кислородной камеры сгорания для рационализации использования временных и материально-технических ресурсов с обеспечением высокой полноты сгорания водорода (более 98%) и приемлемый тепловой режим стенок.

Поставленная цель достигается путем разработки конструкции прямоточно-вихревой трубчатой камеры сгорания (рисунок 1). В качестве окислителя используется технический кислород, разбавляемый водяным паром. Рабочее тело – водород, сжигаемый в среде водяного пара.

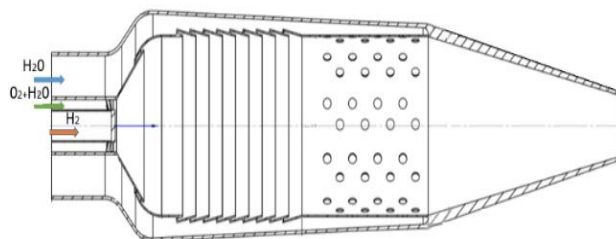


Рисунок 1 – Конструктивная схема  
водород-кислородной камеры  
сгорания с водяным паром

Пар также используется для целевого охлаждения жаровой трубы. Такое решение позволяет снизить температура в зоне горения до значений, характерных для традиционных камер сгорания (1800–2000 К), и избежать перегрева стенок.

Исследования проводились с использованием численного моделирования. Кинетика горения водорода с кислородом в среде водяного пара изучалась в программном комплексе Ansys Chemkin-Pro с применением верифицированного механизма USC II. Расчеты выполнялись для стехиометрического состава (коэффициент избытка кислорода  $\alpha = 1,0$ ) при степени разбавления окислителя водяным паром  $\gamma$  от 0 до 0,9 (массовая доля). Трехмерное моделирование процессов смешения и горения проводилось в Ansys Fluent с использованием модели турбулентности Realizable  $k-\varepsilon$  [5].

В таблице 1 представлены полученные значения основных характеристик горения в зависимости от  $\gamma$ .

Таблица 1 – Характеристики горения водорода в кислороде при различных степенях разбавления окислителя водяным паром ( $\alpha = 1,0$ , давление 23,5 МПа)

| Степень разбавления $\gamma$ , масс. доля | Адиабатическая температура пламени, К | Нормальная скорость пламени, м/с | Полнота сгорания, % |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 0,0                                       | 2810                                  | 8,1                              | 99,9                |
| 0,3                                       | 2420                                  | 4,5                              | 99,8                |
| 0,6                                       | 1980                                  | 2,2                              | 99,5                |
| 0,8                                       | 1520                                  | 0,8                              | 98,7                |
| 0,85                                      | 1350                                  | 0,5                              | 98,0                |
| 0,9                                       | 1180                                  | 0,2                              | 94,2                |

Анализ полученных данных показывает, что приемлемая полнота сгорания (более 98%) достигается в диапазоне  $\gamma = 0 \div 0,85$ . При дальнейшем увеличении доли пара полнота сгорания резко снижается из-за чрезмерного падения температуры и скорости пламени. Рекомендуемый рабочий диапазон для проектирования –  $\gamma = 0,6 \div 0,85$ . Нижняя граница ( $\gamma = 0,6$ ) обеспечивает температуру пламени около 2000 К, что близко к традиционным камерам сгорания ГТУ, а верхняя ( $\gamma = 0,85$ ) соответствует минимально допустимой полноте сгорания 98%.

На основе полученных зависимостей разработана методика конструкторского расчета водород-кислородной камеры сгорания, включающая:

- определение объема жаровой трубы по величине объемной теплонапряженности (с учетом снижения температуры пламени);
- расчет смесителя горелочного устройства (количество и диаметр отверстий смешения) из условия равномерного распределения водорода в потоке окислителя;
- расчет толщины стенки жаровой трубы по формуле для тонкостенной оболочки под давлением 23,5 МПа;
- определение расхода и скорости охлаждающего пара через щелевую систему на основе теплового баланса.

Для тепловой мощности 250 МВт и параметров пара на выходе 540°C, 23,5 МПа получены и предложены следующие конструктивные параметры горелочного устройства: 8 рядов отверстий смешения диаметром 35 мм, отверстия щелевого охлаждения в зоне горения диаметром 5 мм, уклон наружного корпуса 10° к стенке жаровой трубы для компенсации снижения массовой скорости охлаждающего пара по длине.

Трехмерное моделирование в Ansys Fluent подтвердило, что при принятых решениях среднемассовая мольная доля недогоревшего водорода на выходе не превышает 0,00034, что соответствует полноте сгорания 99,5%. Максимальная температура стенки жаровой трубы не превышает

700 К, а неравномерность температурного поля в выходном сечении составляет 24%, что находится в допустимых пределах для подобных устройств.

### **Выводы**

В процессе работы разработана и предложена методика проведения исследований по созданию кислородно-топливной камеры сгорания (водород-кислородной камеры сгорания), работающей при сверхкритических параметрах. Предложенная методика проектирования включает инженерные соотношения для расчета жаровой трубы, смесителя и системы охлаждения что позволяет использовать ее при создании кислородно-топливных камер сгорания мегаваттного класса. Выполненное численное моделирование кинетики горения показало, что при степени разбавления окислителя водяным паром  $\gamma = 0,6 \div 0,85$  полнота сгорания водорода превышает 98%, что говорит о целесообразности применения данного диапазона для проектирования водород-кислородных камер сгорания. Разработана и предложена конструкция прямоточно-вихревой камеры сгорания с щелевым охлаждением, обеспечивающая полноту сгорания 99,5% и температуру стенки не выше 700 К. Результаты работы могут быть применены при модернизации действующих тепловых электростанций с целью снижения выбросов  $\text{CO}_2$  и повышения эффективности за счет внешнего перегрева пара водородом.

### **Перечень ссылок**

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р.
2. Смыгалина А.Е., Киверин А.Д. Самовоспламенение водорода при его истечении под высоким давлением в канал, заполненный кислородом с нейтральными добавками // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 49-55.
3. Разработка научно-методологических основ создания перспективных высокотемпературных энергетических комплексов: дисс. доктора техн. наук / Рогалев А.Н. – М., 2018.
4. Rogalev N., Kharlamova D., Vegera A., Naumov V., Karev T. Research and Development of Hybrid Power Units Heat Flow Diagrams with Cooled High-Temperature Steam Turbines // Inventions. 2022. Vol. 7. № 3. P. 64.
5. Осипов С.К., Карев Т.П., Губанова А.И., Голосова П.В., Опарин М.В. Разработка и исследование смесителей компонентов горения углекислотной камеры сгорания // Новое в российской электроэнергетике. 2023. № 11. С. 6-20.

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ ОДНОВАЛЬНОЙ ПГУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТЬЮ 400 МВт ШАТУРСКОЙ ГРЭС

Н.Е. Туз<sup>1</sup>, А.В. Сенецкий<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени  
Теплотехнический научно-исследовательский институт»,  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе представлено описание оборудования энергоблока ПГУ-400, находящегося в эксплуатации на Шатурской ГРЭС. Проведен всесторонний анализ характеристик основного оборудования ПГУ, полученных при обработке большого объема эксплуатационных режимов. В результате работы получены обобщающие графические и аналитические зависимости основных теплотехнических характеристик ГТУ, КУ, ПТ от определяющих факторов. Выполнен сравнительный анализ фактических показателей оборудования на момент ввода энергоблока и спустя 10 лет активной эксплуатации.

**Annotation.** The paper describes the equipment of the CCPP-400 power unit, which is in operation at the Shatura GRES. A comprehensive analysis of the characteristics of the main equipment of the CCPP obtained by processing a large volume of operating modes has been carried out. As a result of the work, generalizing graphical and analytical dependences of the main thermal engineering characteristics of GTU, CU, and PT on determining factors were obtained. A comparative analysis of the actual equipment indicators at the time of the unit commissioning and after 10 years of active operation was carried out.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, котел-утилизатор, паровая турбина, парогазовая установка, мощность, КПД.

**Keywords:** gas turbine unit, heat-recovery steam generator, steam turbine, combined cycle power plant, power, efficiency.

В апреле 2005 г. ОАО РАО «ЕЭС России» приняло «Концепцию технической политики в теплоэнергетике», направленную на модернизацию ТЭС, внедрение эффективных технологий, повышение экологической безопасности и унификацию оборудования. Согласно этой Концепции, основой для технического перевооружения газовых ТЭС должны стать парогазовые установки (ПГУ) на базе современных газотурбинных установок (ГТУ). Экономия топлива при внедрении таких установок достигает 20÷30 % по сравнению с традиционными паросиловыми блоками [1].

Технические решения по созданию ПГУ могут быть различными. Одним из направлений выбора конструктивного решения является определение количества валов (одновальные и многовальные). В одновальной ПГУ газотурбинная установка и паровая турбина находятся на одном валу и вращают общий электрогенератор (рис. 1). Одним из основных преимуществ одновальных ПГУ является наличие только одного электрического генератора [1-3].

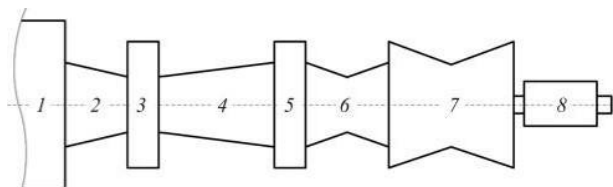


Рисунок 1 – Расположение оборудования ПГУ-400 в машинном зале:

1 – вход газов в котел утилизатор (КУ); 2 – газовая турбина (ГТ); 3 – камера сгорания (КС); 4 – компрессор (К); 5 – подвод наружного (атмосферного) воздуха; 6 – цилиндр высокого и среднего давления (ЦВД и ЦСД) паровой турбины (ПТ); 7 – цилиндр низкого давления (ЦНД) ПТ; 8 – электрический генератор (ЭГ)

Одновальные ПГУ небольшой мощности начали внедрять в США, начиная с 60÷70-х годов прошлого столетия, в дальнейшем применение таких установок активно развивалось [1]. В настоящее время рекордными по электрической мощности для ПГУ одновальной конфигурации являются энергоблоки, установленные в 2024 г. на электростанции «Jawa Satu Power» в Индонезии. Электрическая мощность каждого из двух блоков составляет 880 МВт при КПД (нетто) до 64%. Энергоблоки построены на газовых турбинах GE Vernova 9HA.02, котлах-утилизаторах GE Vernova Once Through, паровых турбинах STF-D650 и генераторах W88.

В ходе реализации принятой Концепции в 2010÷2015 гг. на электростанциях Российской Федерации установлено 9 энергоблоков на базе одновальных ПГУ электрической мощностью 400÷420 МВт каждый. Пилотный проект одновальной ПГУ в РФ был реализован на Шатурской ГРЭС (г. Шатура, Московская обл.) в 2010 году. На Шатурской ГРЭС установлен энергоблок ПГУ-400 с гарантированной мощностью (нетто) 396,7 МВт и КПД (нетто) 55,9%. В состав ПГУ-400 входят ГТУ типа MS9001FA (General Electric, США), трехконтурный барабанный КУ (СМІ, Бельгия), конденсационная ПТ типа D10 (General Electric, США), деаэрирующий конденсатор (Holtec International, США), ЭГ типа 390H (General Electric, США). В ПГУ-400 ПТ соединена с валом ГТУ жестко, без применения расцепной муфты. Такое техническое решение влияет на компоновку энергоблока, а также обуславливает некоторые особенности его эксплуатации [4]. Схема расположения оборудования ПГУ-400 Шатурской ГРЭС в машинном зале: КУ – ГТУ – ПТ – ЭГ (рис. 1).

Принципиальная тепловая схема ПГУ приведена на рис. 2. Детально технические характеристики установки приведены в [4].

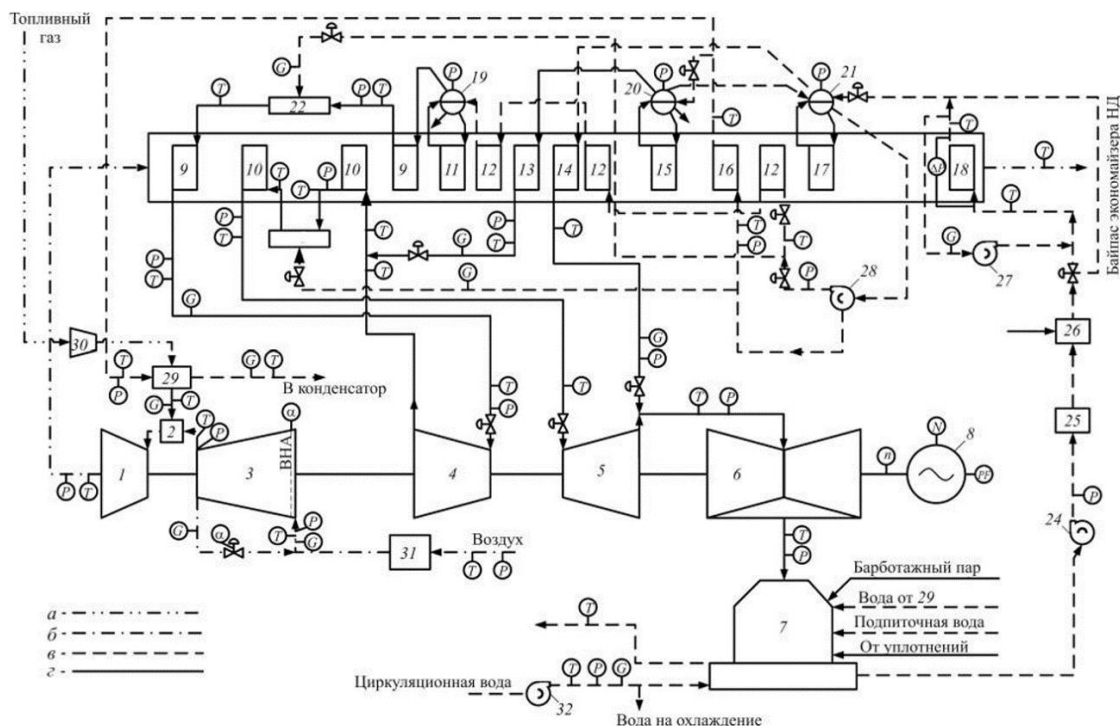


**Рисунок 2 – Принципиальная тепловая схема ПГУ-400:**

1 – ГТ; 2 – КС; 3 – К; 4 – ЦВД; 5 – ЦСД; 6 – ЦНД; 7 – конденсатор; 8 – ЭГ; 9 – пароперегреватель ВД; 10 – промперегреватель; 11 – испаритель ВД; 12 – экономайзер ВД; 13 – пароперегреватель СД; 14 – пароперегреватель НД; 15 – испаритель СД; 16 – экономайзер СД; 17 – испаритель НД; 18 – экономайзер НД; 19, 20, 21 – барабан ВД, СД, НД; 22, 23 – пароохладитель ВД, СД; 24 – конденсатный насос; 25 – система конденсатоочистки; 26 – конденсатор пара уплотнений; 27 – насос рециркуляции; 28 – комбинированный питательный насос; 29 – подогреватель топливного газа; 30 – газодожимной компрессор; 31 – воздухозаборное устройство; 32 – циркуляционный насос; 33 – пар из уплотнений ПТ; а – топливо; б – воздух; отработавшие в ГТУ газы; в – вода; г – пар; буквы  $T, P, G, n, N, a$  в кружочках – места измерений температуры, давления, расхода, частоты вращения, электрической мощности, положения клапана, регулирующего расход воздуха, перепускаемого с выхода на вход компрессора, положение лопаток ВНА

Исходя из условия, что в схеме ПГУ-400 один электрогенератор, разделение электрической мощности ГТУ и ПТ осуществлялось по методикам, предложенным Ольховским Г.Г. [5]. Электрическая мощность ГТУ и ПТ определялась по уравнениям тепловых и материальных балансов энергоустановок (мощность ПГУ совпадала с измеренной на клеммах ЭГ на нагрузках близких к номинальным с точностью до +4%, на малых – (-10 – +5)%. Составление балансов энергии ГТУ выполнялось по стандарту ИСО-2314 согласно которого, массовые расходы воздуха на входе в КС ( $\eta_{КС} = 1,0$ ) и в К равны.

Расчетная температура атмосферного воздуха для ПГУ-400 Шатурской ГРЭС равна  $+4^{\circ}\text{C}$ . Электрическая мощность ПТ рассчитывалась как сумма внутренних мощностей ЦВД, ЦСД и ЦНД за вычетом механических и электрических потерь, отнесенных к ПТ. Полученные технико-экономические показатели ПГУ представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что расход теплоты линейно увеличивается с ростом нагрузки. При нагрузках  $\sim 200$  МВт КПД ПГУ (брутто) составляет 45,6-48,5%, при близких к номинальным – 56,7-58,4%. Снижение нагрузки блока с 400 МВт до 200 МВт влечет за собой уменьшение мощности ГТУ с 271-281 МВт до 116-137 МВт и доли ГТУ в выработке электрической энергии с 67-74 %.

При полностью открытом входном направляющем аппарате компрессора его КПД снижается с  $89,8\div 89,9\%$  при температуре воздуха на входе  $t_{1\text{К}} > 27^{\circ}\text{C}$  и степени повышения давления  $\pi_{\text{К}}=15,1\div 15,7$  до  $87,4\div 87,9\%$  при  $t_{1\text{К}}=-5,5^{\circ}\text{C}$  и  $\pi_{\text{К}}=17,3$ .

КПД газовой турбины, рассчитанный по стандарту ИСО-2314, снижается с  $90,0\div 91,5\%$  при максимальных нагрузках до  $83,4\div 86,3\%$  при электрической мощности ПГУ  $\sim 200$  МВт.

С повышением энтальпии поступающих в КУ газов суммарное тепловосприятие его поверхностей нагрева увеличивается с  $255\div 277$  МВт до  $339\div 369$  МВт, а КПД КУ снижается с  $88,5\div 89,3\%$  до  $84,8\div 85,9\%$ . Температура уходящих газов составляет  $82,4\div 95,3^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент полезного действия паротурбинной установки мало изменяется в зависимости от нагрузки ПГУ: с повышением нагрузки КПД ПТУ увеличивается примерно с  $32,4\div 36,4\%$  до  $33,3\div 37,7\%$ .

Сравнительный анализ технико-экономических характеристик

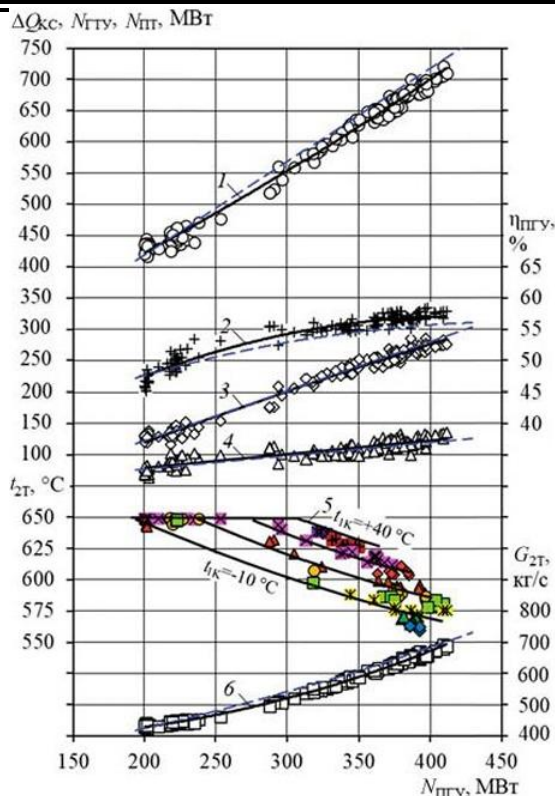


**Рисунок 3 – Зависимости  
показателей ПГУ от ее мощности  
(а) и от температуры воздуха  
перед компрессором (б):**

- 1 – расход теплоты, подведенной с топливом  $\Delta Q_{\text{КС}}$ ; 2 – КПД ПГУ (брутто)  $\eta_{\text{ПГУ}}$ , %; 3 – мощность ГТУ  $N_{\text{ГТУ}}$ , МВт;
  - 4 – мощность ПТ  $N_{\text{ПТ}}$ , МВт; 5 – температура газов за ГТУ  $t_{2\text{T}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ; 6 – расход газов за ГТУ  $G_{2\text{T}}$ , кг/с;
  - 7 – мощность ПГУ  $N_{\text{ПГУ}}$ , МВт;
- пунктирные линии – характеристики 2011 г.; сплошные линии – характеристики 2021 г.

показал, что реализовываемые регламентные работы и высокая культура эксплуатации позволили сохранить эффективность работы оборудования ПГУ-400 спустя 10 лет активной эксплуатации на проектном уровне.

### **Выводы**

Анализ технико-экономических характеристик оборудования одновальной ПГУ-400 Шатурской ГРЭС, полученных в результате экспериментальных исследований в 2011 г. и 2021 г., показал, что высокий уровень тепловой эффективности энергоблока сохраняется спустя 10 лет интенсивной эксплуатации. В 2021 г. наработка оборудования составила более 86 тыс. ч, среднее значение нагрузки на протяжении рассматриваемого периода было ~327 МВт при  $\eta_{ПГУ}$  равном 52,9 %, за этот период количество пусков составило 160 шт. В 2014 г. и 2021 г. на ГТУ проводились инспекции, в 2017 г. – капитальный ремонт. При всех этих работах производилась частичная замена деталей горячего тракта. Все это говорит о достаточно высоком уровне исполнения установки и надлежащем соблюдении эксплуатационных режимов.

### **Перечень ссылок**

1. Култышев А.Ю., Голошумова В.Н., Алешина А.С. Парогазовые установки и особенности паровых турбин для ПГУ: учеб. Пособие. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 163 с.
2. Неуймин В.М., Рабенко В.С. Достоинства и недостатки одно- и многовальных парогазовых установок // Надежность и безопасность энергетики. 2009. № 3(6). С. 39-47.
3. Narula R.G. The Single-Shaft Combined Cycle Myth // Proc. Of ASME TURBOEXPO 2000. <http://dx.doi.org/10.1115/2000-GT-0594>
4. Туз Н.Е., Ольховский Г.Г., Агеев А.В., Рожков А.Д., Фролов М.С., Торбин Я.В., Ребеко К.В., Симонова Н.С. Опыт эксплуатации одновальной ПГУ мощностью 400 МВт Шатурской ГРЭС // Электрические станции. 2023. № 7. С. 2-11. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1104.7.001>
5. Ольховский Г.Г. Использование балансов энергии для обработки результатов испытаний одновальной ПГУ // Теплоэнергетика. 2012, № 9, С. 54–57.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Р.О. Фомкин, Н.И. Мищенко

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,  
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье представлен обзор современных технических решений в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены ключевые направления развития, проанализированы их преимущества с точки зрения топливной экономичности, экологических показателей и аэродинамической эффективности автомобиля.

**Ключевые слова:** система охлаждения двигателя, адаптивное терморегулирование, электропривод насоса, активные жалюзи, топливная экономичность.

**Annotation.** The article provides an overview of modern technical solutions in cooling systems of internal combustion engines. Two key areas of development are considered, their advantages in terms of fuel efficiency, environmental performance and aerodynamic efficiency of the car are analyzed.

**Keywords:** engine cooling system, adaptive temperature control, electric pump drive, active shutters, fuel efficiency.

Система охлаждения является одним из важнейших элементов двигателя внутреннего сгорания (ДВС), обеспечивающим отвод избыточной теплоты от нагретых деталей и поддержание оптимального теплового режима. По данным отечественных и зарубежных исследований, через систему охлаждения теряется около 30% энергии топлива. Поэтому повышение эффективности системы охлаждения непосредственно влияет на топливную экономичность, экологические показатели и ресурс двигателя.

Традиционная система охлаждения включает три основных механических компонента: водяной насос с приводом от коленчатого вала, восковой термостат и вентилятор радиатора. Однако такая конструкция имеет ряд недостатков: производительность насоса жестко привязана к частоте вращения двигателя и не может регулироваться независимо, а термостат обладает инерционностью и зоной нечувствительности. Современные тенденции направлены на замену пассивных элементов управляемыми электромеханическими компонентами и внедрение интеллектуальных алгоритмов управления.

**Адаптивные системы охлаждения.** Адаптивная система охлаждения (АСО) представляет собой совокупность устройств, обеспечивающих подвод охлаждающей среды к нагретым деталям двигателя и отвод от них

избыточной теплоты с возможностью поддержания оптимального теплового состояния при различных режимах работы [1].

Ключевым элементом адаптивной системы является насос с регулируемым электроприводом. Разработку таких насосов ведут ведущие мировые компании: Valeo, Delphi. В отличие от традиционных механических помп, адаптивные насосы изготавливаются с широким применением специальных пластиков, устойчивых к высоким температурам, вибрациям и химическому воздействию [2]. Это позволяет снизить массу изделия на 65% по сравнению с традиционными конструкциями и на 30% повысить его долговечность.

В состав системы управления АСО также входят трехходовой клапан с электроприводом и управляющий контроллер. Контроллер обрабатывает данные с датчиков температуры на входе и выходе из двигателя, а также температуры головки блока цилиндров вблизи камеры сгорания. Разработанные алгоритмы управления позволяют поэтапно включать исполнительные механизмы при достижении определенных температурных порогов, обеспечивая максимальную эффективность охлаждения на всех режимах работы [3].

**Активные жалюзийные системы.** Другим важным направлением совершенствования систем охлаждения является внедрение активных жалюзи, устанавливаемых перед радиатором. Основная идея заключается в регулировании количества воздуха, поступающего к радиатору, в зависимости от тепловой нагрузки двигателя и скорости движения автомобиля.

При движении на высоких скоростях в прохладную погоду жалюзи могут полностью закрываться, направляя воздушный поток в обход радиатора. Это снижает аэродинамическое сопротивление автомобиля и обеспечивает экономию топлива. Система анализирует скорость потока, температуру воздуха и охлаждающей жидкости.

Современные патентные решения предусматривают многозонные жалюзийные системы. Например, известна конструкция из двух секций с разным проходным сечением, обеспечивающая четыре уровня регулирования: полностью открыто, открыта большая секция, открыта малая секция, полностью закрыто. Управление осуществляется с помощью мотор-редукторов или соленоидов [4].

**Интенсификация теплообмена в радиаторах и охлаждающих трактах.** Повышение теплосъема в основных теплообменниках системы охлаждения — радиаторах — также является предметом активных исследований. Традиционные трубчато-ленточные радиаторы постепенно уступают место конструкциям с развитой поверхностью теплообмена, например, многорядным пластинчатым или оребренным радиаторам с более сложной конфигурацией каналов.

Одним из перспективных технологических приемов является

создание на внутренней поверхности теплообменных труб поперечной кольцевой накатки. Такая модификация поверхности интенсифицирует теплообмен за счет турбулизации течения охлаждающей жидкости и разрушения пристеночного ламинарного подслоя. Циркуляционные зоны, возникающие за каждым кольцевым выступом, способствуют более эффективному перемешиванию потока и увеличению коэффициента теплоотдачи [5].

**Выводы.** Проведенный обзор показывает, что современные системы охлаждения ДВС развиваются по пути интеллектуализации и электромеханической замены пассивных компонентов. Адаптивные системы с регулируемыми электроприводами насосов и клапанов позволяют точно поддерживать оптимальный температурный режим. Активные жалюзийные системы перед радиатором обеспечивают дополнительную экономию за счет снижения аэродинамического сопротивления. Комплексное применение этих решений способствует повышению топливной экономичности, улучшению экологических характеристик и увеличению ресурса современных двигателей.

#### **Перечень ссылок**

1. Разработка адаптивной системы охлаждения ДВС / И. Ф. Гумеров, Ю. Ф. Гортышов, В. М. Гуреев [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – № 2. – С. 81-86.
2. Система управления адаптивной системой охлаждения двигателей внутреннего сгорания / Р. Р. Салахов, В. М. Гуреев, А. Х. Хайруллин, И. Р. Салахов // Труды МАИ. – 2012. – № 61. – С. 16.
3. Разуваев А.В. Анализ системы высокотемпературного охлаждения двигателей внутреннего сгорания // Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий. Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. – Том 1. – 2021. – С. 105–109.
4. Петров, А. П. Активные жалюзи системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания легкового автомобиля / А. П. Петров, С. Н. Банников // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 4(709). – С. 41-51.
5. Панченко, С. Л. Интенсификация процесса охлаждения в радиаторе двигателя внутреннего сгорания / С. Л. Панченко, С. А. Толстов, А. С. Толстова // Современные системы и технологии на транспорте: проблемы и перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 24–25 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 224-228.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ПО ПРИМЕНИМОСТИ LLM

А. Ю. Черепяхин, Е. А. Буленков  
ФГБОУВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»,  
г. Донецк, ДНР

**Аннотация.** В статье рассматривается применение больших языковых моделей (LLM) в задачах технологической подготовки производства. Предложена классификация задач по степени их пригодности для использования LLM. Показано, что наибольшая эффективность достигается при работе с текстовой и нормативной информацией. Обоснованы перспективы интеграции LLM в цифровую инфраструктуру предприятий.

**Annotation.** The paper examines the application of large language models (LLMs) in production engineering preparation tasks. A classification based on suitability for LLM use is proposed: high, medium, and low suitability. The results show that LLMs are most effective in handling textual and regulatory information. Limitations arise in tasks requiring precise calculations and direct control. Prospects for integrating LLMs into industrial digital infrastructures are discussed.

**Ключевые слова:** большие языковые модели, технологическая подготовка производства, искусственный интеллект, цифровое производство, автоматизация

**Keywords:** large language models, production engineering, artificial intelligence, smart manufacturing, automation.

В последние годы интерес к применению методов искусственного интеллекта в промышленности заметно возрос, что связано как с развитием вычислительных технологий, так и с накоплением больших массивов производственных данных. Особенно активно обсуждаются большие языковые модели, способные обрабатывать значительные объемы текстовой информации и генерировать осмысленные ответы на естественном языке, что делает их перспективными для использования в инженерных и организационно-технических задачах. В работах зарубежных и отечественных исследователей отмечается [1-5], что LLM уже находят применение в инженерной деятельности, в частности при анализе документации, поддержке принятия решений и автоматизации рутинных операций, однако их роль в технологической подготовке производства (ТПП) пока остается предметом дискуссий и требует дополнительного осмысления с точки зрения практической эффективности

и надежности.

Анализ литературы показывает, что большинство исследований сосредоточено на применении LLM как интеллектуальных ассистентов, интегрируемых с корпоративными информационными системами и системами управления жизненным циклом изделий [1–5]. При этом подчеркивается необходимость четкого разграничения задач, где такие модели действительно демонстрируют высокую эффективность (например, работа с неструктурированными текстами, поиск и обобщение информации), и задач, где их использование ограничено из-за требований к точности расчетов, формальной верификации результатов и строгому соблюдению технологических регламентов [4–5]. Это особенно актуально для ТПП, где сочетаются как текстовые, так и расчетные процедуры, а также требуется высокая согласованность между конструкторской и технологической документацией.

Предлагаемая классификация (представленная на рис. 1) делит задачи ТПП на три группы: высоко-, средне- и низкопригодные для решения с помощью LLM.



Рисунок 1. Классификация задач ТПП для применения Больших языковых моделей.

### 1. Высокопригодные задачи.

К этой категории относятся процессы, связанные с обработкой естественного языка и анализом документации. На практике это проявляется, прежде всего, в автоматизации работы с нормативными и техническими материалами. Технолог получает возможность быстро находить нужные требования, что существенно сокращает время подготовки решений.

Другим направлением является генерация пояснительных записок и

технологических комментариев. Здесь LLM выступают как инструмент, позволяющий ускорить подготовку текстовой части документации без потери логики изложения.

Также важна функция поиска аналогов и прецедентов. На основе ранее разработанных техпроцессов модель может предложить типовые решения, что соответствует принципу унификации и типизации производства.

Наконец, модели могут использоваться для поддержки процессов контроля качества, помогая интерпретировать требования стандартов применительно к конкретным операциям.

## **2. Среднепригодные задачи.**

Эта группа включает задачи, где LLM не могут работать автономно и требуют интеграции с другими системами.

Например, при проектировании маршрута обработки модель способна сформировать общую последовательность операций, однако окончательный выбор оборудования и параметров остается за технологом или специализированным программным обеспечением.

Аналогичная ситуация наблюдается при выборе инструмента: LLM может предложить варианты, но их проверка требует обращения к каталогам и расчетным модулям.

К среднепригодным задачам также относится оптимизация логистики внутри производства. Здесь модели полезны для анализа и генерации сценариев, но реальные решения принимаются на основе данных специализированных систем управления.

## **3. Низкопригодные задачи.**

В эту категорию входят задачи, требующие точных расчетов и моделирования.

Классическим примером является расчет режимов резания. Такие задачи основаны на строгих инженерных формулах и требуют учета множества параметров, что делает использование LLM недостаточно надежным.

Сюда же относятся прочностные расчеты и моделирование методом конечных элементов, которые выполняются специализированными системами.

Особую осторожность следует проявлять при генерации управляющих программ для станков с ЧПУ: ошибки в коде могут привести к серьезным последствиям.

Кроме того, LLM не подходят для оперативного управления производством в реальном времени, где требуется мгновенная реакция на изменения параметров процесса.

Наиболее рациональным представляется не замещение существующих систем, а их дополнение. Интеграция LLM с PLM, ERP и MES позволяет создать единую цифровую среду, в которой технолог

взаимодействует с системой на естественном языке.

Ключевыми направлениями являются использование архитектуры RAG для повышения достоверности ответов, разработка специализированных моделей, обученных на корпоративных данных, а также создание гибридных систем, сочетающих возможности LLM и классических расчетных методов.

Таким образом, предложенная классификация показывает, что LLM наиболее эффективны как инструмент поддержки принятия решений и работы с информацией. Их использование позволяет снизить трудоемкость рутинных операций и повысить скорость доступа к знаниям. Вместе с тем применение таких моделей в расчетных и управляющих задачах требует осторожности и должно осуществляться только в связке со специализированными системами.

#### **Перечень ссылок**

1. Ребус Н. А., Благовещенский И. Г., Ратанова О. В., Мастяев Ф. А. Роль технологий искусственного интеллекта в цифровой трансформации российского производства // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 37–54. – URL: <https://journals.rcsi.science/1991-6639/article/view/294386>
2. Технологическая подготовка производства на предприятиях ОПК в условиях «Индустрии 4.0» // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2018. – № 7. – С. 130–134. – URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/7013>
3. Li Y., Zhao H., Jiang H. [и др.] Large Language Models for manufacturing // Journal of Manufacturing Systems. — 2026. — Vol. 86. — P. 516–545. — DOI: 10.1016/j.jmsy.2026.02.014. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612526000439> (дата обращения: 02.05.2026).
4. Gao L., Lewis P., et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // arXiv. – 2021. – URL: <https://arxiv.org/abs/2005.11401> (дата обращения: 02.05.2026).
5. Zhang C., Xu Q., Yu Y. [и др.] A survey on potentials, pathways and challenges of large language models in new-generation intelligent manufacturing // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2025. — Vol. 92. — Art. 102883. — DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102883. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584524001704> (дата обращения: 02.05.2026).

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ УГОЛЬНОГО МАССИВА

д.т.н., проф. О.Е. Шабает, к.т.н., доц. Е.Ю. Степаненко,  
к.т.н., доц. П.П. Зинченко

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

**Аннотация:** Приведены результаты имитационного моделирования вибрационного разрушения угольного массива. Установлено, что вибрационное воздействие приводит к существенному снижению энергоемкости процесса разрушения на 15-30 % в зависимости от физико-механических свойств разрушаемого массива.

**Abstract:** The results of simulation modeling of the vibration destruction of a coal mass are presented. It has been established that the vibration effect leads to a significant decrease in the energy intensity of the destruction process by 15-30%, depending on the physical and mechanical properties of the mass being destroyed.

**Ключевые слова:** процесс разрушения, имитационное моделирование, метод конечных элементов, вибрационное воздействие, частота колебаний.

**Keywords:** destruction process, simulation modeling, finite element method, vibration effect, oscillation frequency.

При добыче угля шахтным способом, решающим является интенсификация процесса разрушения на основе применения высокопроизводительных выемочных машин.

Увеличение производительности выемочных машин тесно связано с повышением эффективности и уменьшением энергоемкости процесса разрушения горного массива. Среди известных способов разрушения наиболее широкое распространение получил способ, основанный на принципе резания. Согласно данным [1] в общем балансе затрат энергии, подводимой к исполнительному органу выемочной машины в процессе резания углей: на дробление приходится 50...78 %; на измельчение при трении 20...46 %; на образования трещин в массиве – до 10 % и на рассеяние энергии при деформации массива и деталей машин – около 2 %. Следовательно, снижение энергозатрат на разрушение может быть достигнуто на основе разработки более эффективного способа разрушения горного массива. Вместе с тем, резание обладает рядом существенных достоинств, связанных с простотой и, как следствие, стоимостью машин.

Как показывают исследования [2-6] одним из возможных путей снижения энергозатрат на разрушение при резании является применение комбинированного способа - с наложением ударного воздействия.

В работе [2] указывается, что относительная эффективность ударного разрушения значительно выше по сравнению резанием. Предлагается конструкция машины, которая позволяет производить разрушение обычным резанием или с наложением ударного воздействия. Даны значения минимальной энергии единичного удара и частоты ударов.

В работе [3] приведены результаты комплексных исследований применения ударного способа разрушения горных пород. Приведены силовые и энергетические параметры разрушения рабочими органами ударного действия.

Результаты исследований [4] показали, что разрушение с наложением дополнительных колебаний на режущий инструмент, приводит к существенному снижению энергоемкости разрушения в пределах одного прохода резца.

В работе [5, 6] отдельное внимание уделено динамическим стругам, где ударное воздействие накладывается на обычное, статическое резание. Приведены конструкции их ударных механизмов, описание заводских и шахтных испытаний. Описанные в [6] ударные механизмы несколько повторяют конструкции, приведенные в [3, 5].

Описанные в [2-6] результаты подтверждают возможное снижение энергоемкости процесса разрушения угля резанием путем наложения дополнительного ударного воздействия. При этом, вибрационный способ разрушения позволяет: более равномерно распределять энергию по объёму породы; минимизировать потери энергии на нагрев и деформацию оборудования; целенаправленно воздействовать на слабые зоны структуры породы. В отличие от ударного разрушения, вибрация вызывает постепенное развитие трещин. Это даёт преимущества: энергия расходуется не на мгновенное разрушение, а на последовательное ослабление структуры; снижается вероятность «заклинивания» рабочего органа в прочной породе; обеспечивается более плавное и контролируемое разрушение [7]. Вместе с тем, изменение физико-механических свойств углей в достаточно широких пределах не даёт возможности применения полученных результатов при разрушении пластов с различными параметрами. Поэтому необходимы дополнительные исследования, нацеленные на определение значений амплитуды и частоты вибрационного воздействия.

В виду вариации физико-механических свойств углей в широких пределах, дороговизной, сложностью исследований в реальных условиях эксплуатации или с использованием реальных образцов углей, установление закономерности влияния вибрационного воздействия на эффективность разрушения, был проведен модельный эксперимент на базе программного обеспечения ANSYS Workbench, в модуле Explicit Dynamics методом конечных элементов (МКЭ) [8].

При проведении эксперимента создавалась объемная модель

угольного блока, обладающего следующими физико-механическими свойствами: плотность – 1440 кг/м<sup>3</sup>; модуль упругости I-го рода  $E$  – 2450, 4500 МПа; коэффициент Пуассона  $\mu$  – 0,27, 0,47. Приведенные физико-механические свойства блока соответствуют хрупким углям средней крепости и крепким, вязким углям [9]. В качестве допущения материал блока рассматривался как изотропное тело.

МКЭ предполагает разбиение объемной модели угольного блока на конечные элементы – небольшие подобласти сравнительно простой формы, которые в совокупности аппроксимируют исходную сложную геометрию. Параметры конечных элементов модели принимались следующие: тип конечных элементов – линейный; размер конечных элементов – 8 мм; генерация сетки – Patch Conforming Tetrahedron. Размер конечного элемента принимался исходя из размеров отдельностей из которых состоит уголь. Согласно [9] размеры отдельностей для сапропелитов и гумолитов составляют 200...700 и 5...400 мм соответственно.

В качестве режущего инструмента принимался эталонный резец прибора ДКС со следующими параметрами: передняя кромка – плоская шириной 20 мм; угол резания – 60°; задний угол – 10°. Резец осуществлял блокированный рез с толщиной стружки равной 40 мм.

В процессе моделирования угольный блок фиксировался от перемещения в пространстве с трех сторон, имитируя горный массив. Резец – двигался относительно блока с заданной скоростью  $V_p$  по оси  $Z$  (см. рисунок 1).

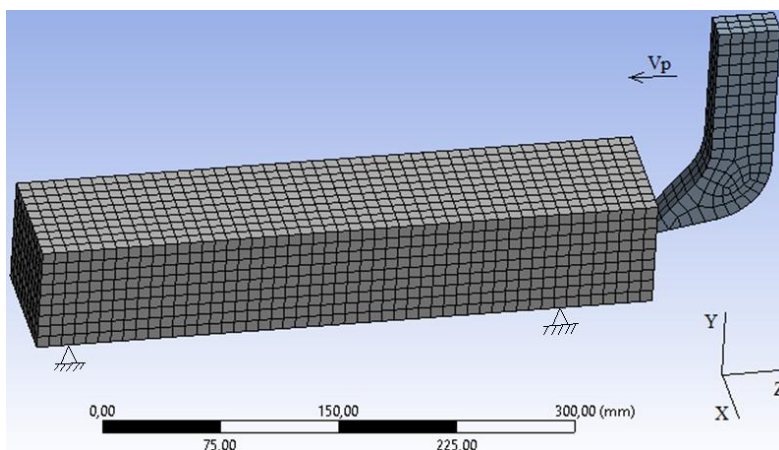


Рисунок 1. Общий вид виртуального стенда для вибрационного разрушения

Моделировалось два режима резания: с постоянной скоростью резания – 1800 мм/с, и с гармоническим изменением скорости с частотой 5-20 Гц и амплитудами 900-1800 мм/с.

В качестве примера, на рисунке 2 приведен фрагмент изменения силы

резания полученной в результате моделирования  $Z_{\text{мод}}$  и разрушения угольно-цементного блока  $Z_{\text{эксп}}$  [10] от пройденного резцом пути  $l$  при постоянной скорости резания.

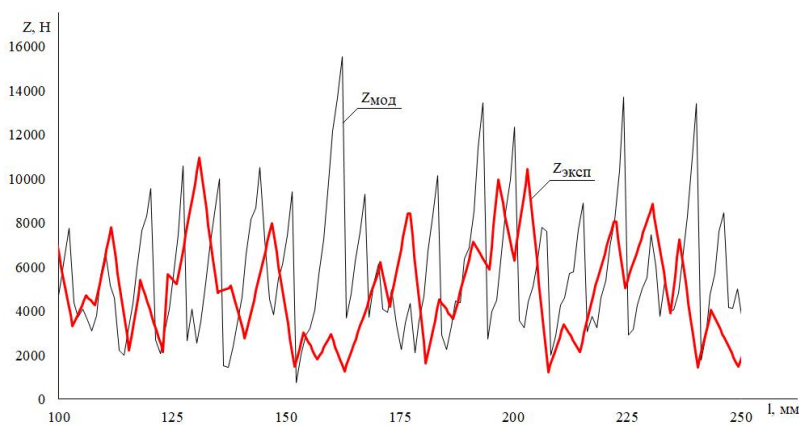


Рисунок 2. Фрагмент записи силы резания от пройденного резцом пути

Анализ рисунка 2 показывает, достаточную сходимость данных модельного и натурного экспериментов, что подтверждается повторяемостью «скользящего» характера классического процесса разрушения горных пород одиночным резцом.

Оценка влияния вибрационного воздействия на эффективность процесса разрушения осуществлялась путем сравнения средней силы резания в зависимости от частоты и амплитуды вибрационного воздействия.

В качестве примера результатов модельных исследований на рисунке 3 приведен график зависимости средней силы резания  $Mz$  от частоты  $f$  вибрационного воздействия при разрушении угольного блока с параметрами  $E=2450$  МПа и  $\mu=0,27$ .

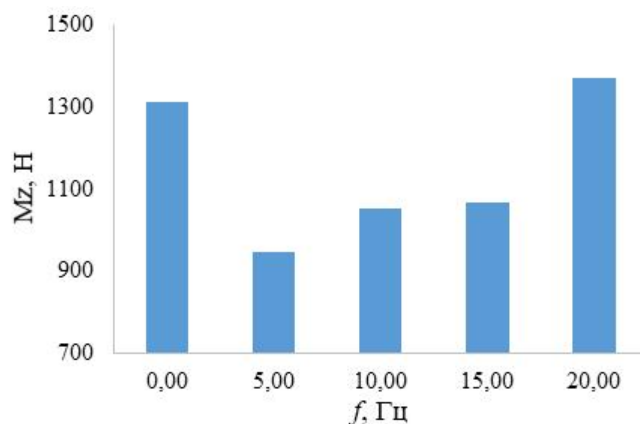


Рисунок 3. График зависимости средней силы резания от частоты дополнительного вибрационного воздействия.

Анализ данных показывает, что вибрационное воздействие в зависимости от амплитуды и частоты оказывает существенное влияние на энергоёмкость процесса разрушения. При этом, можно выделить оптимальные параметры воздействия, при которых энергоёмкость разрушения минимальна. Вибрационное воздействие с оптимальной частотой на резец (5-20 Гц) и максимально возможной амплитудой приводит к снижению удельных энергозатрат на 15-30%. Наибольшая эффективность применения вибрационного воздействия достигается при разрушении менее крепких, хрупких углей. Разрушение более крепких, вязких углей требует увеличения частоты вибрационного воздействия на массив с 5 до 20 Гц. При снижении амплитуды колебаний скорости резания, оптимальная частота увеличивается обратно пропорционально амплитуде, обеспечивая эффективность разрушения на прежнем уровне.

**Закключение** Таким образом, вибрационное воздействие приводит к существенному снижению энергоёмкости процесса разрушения на 15-30 %. При выборе оптимальных параметров вибрационного разрушения необходимо учитывать физико-механические свойства разрушаемого горного массива и соотношение амплитуды и частоты гармонических колебаний.

Направление дальнейших исследований - разработка технических средств, обеспечивающих вибрационное воздействие с оптимальными параметрами на режущий инструмент.

#### **Перечень источников**

1. Габов В.В. Особенности формирования элементарных сколов в процессе резания углей и изотропных материалов эталонным резцом горных машин / В.В. Габов, Д.А. Задков, Нгуен Кхак Линь // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 153-161. DOI 10.31897/PMI.2019.2.153
2. Комбинированный способ разрушения при выемке угольных пластов с породными включениями / В.Н. Лабутин // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2014.
3. Ударное разрушение / А.И. Федулов, В.Н. Лабутин / Наука. – 1973. 120 с.
4. Зысманов Л.Г. Исследования закономерностей механического разрушения углей режущим инструментом с наложенным дополнительным колебанием / автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук по специальности 05.05.06 – Горные машины. 24 с.
5. Угольные струги / П.Н. Демидов и др. // М.: Госгортехиздат. – 1962. 295 с.
6. Импульсный гидропривод горных машин / В.Ф. Горбунов и др. Новосибирск: Наука – 1986. 195 с.
7. [-sposobov-razrusheniya-gornyh-porod.pdf](#)
8. Лавренко С.А. Теоретические исследования процесса разрушения массива кембрийских глин резанием в компьютерной среде ANSYS / С.А. Лавренко,
9. И.С. Труфанова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), № 5, 2015. С 236 – 244
10. Резание угля / А.И. Барон и др. М., 1962. 480 с.
11. Отчет №01860040654 «Разработать и внедрить средства повышения надежности и долговечности очистных комбайнов», Донецк. – 1987г

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКОВЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫГРУЖАЕМОГО УГЛЯ

В.Г. Нечепаев

ФГБОУВП «Донецкий национальный технический университет»,  
г. Донецк

**Аннотация.** Выполнен анализ процесса формирования давления в потоке угля, выгружаемого опережающим шнеком системы пассивной и активной выгрузки очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов.

**Abstract.** An analysis of the pressure formation process in the coal flow discharged by the leading screw of the passive and active unloading system of shearer loaders for mining thin, gently dipping seams has been performed.

**Ключевые слова:** очистной комбайн, шнек, исполнительный орган, давление, поток.

**Keywords:** cutter-loader, screw, executive branch, pressure, flow.

Установление рациональных параметров шнековых очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологих пластов, определяет необходимость изучения физической картины формирования и изменения в течение рабочего процесса напряженного состояния выгружаемого угля в их исполнительных органах [1].

С этой целью разработана многопараметрическая нелинейная модель формирования и изменения во времени давления в потоке выгружаемого угля, описывающая трансформацию этого давления в зависимости от конструктивных и режимных параметров системы выгрузки, физико-механических характеристик разрушенного угля, а также параметров активирующих устройств [2,3,4].

Модель представлена зависимостями (1,2).

$$\rho_n = \frac{(\cos\varphi)^{a_2}}{\exp(a_3 \varphi)} - \frac{a_1}{\cos\varphi} \exp[-a_2 \ln(\cos(\varphi)) + a_3 \varphi] d\varphi + \\ + \cos\varphi^{a_2} [\exp(a_3 \varphi)]^{-1} C.$$

$$a_1 = \frac{\rho_y g}{2} (R + r) (\cos \alpha - f_n \sin \alpha). \quad (1)$$

$$a_2 = \frac{n_{\min}}{R - r} (k_v^r r - k_v^{R2} R) (\cos \alpha - f_n \sin \alpha).$$

$$\begin{aligned}
 a_3 = & \frac{n_{\min}}{R-r} \left[ \cos(\alpha)(k_v^r r f_r - k_v^{R1} R f_{R1})(\cos(\alpha) - f_l \sin(\alpha)) + \right. \\
 & \left. + \sin \alpha (k_v^r r f_r - k_v^{R2} R f_{R2})(\sin \alpha - f_l \cos \alpha) \right] \\
 p_l = & \frac{4 \pi r n_{\min} (R k_v^{R2} f_{R2} - r k_v^r f_r) \sin \alpha^2}{(f_l \sin \alpha - \cos \alpha) (R^2 - r^2)} p_n + \\
 & + \frac{2 \pi r \sin \alpha^2}{(f_l \sin \alpha - \cos \alpha) (R + r)} \frac{dp_n}{d\varphi}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Зависимость (1) является многопараметрической функцией, описывающей изменение нормального давления в потоке перемещаемого и выгружаемого угля в зависимости от конструктивных и режимных параметров системы выгрузки, а также от физико-механических характеристик транспортируемой сыпучей массы.

Выражение (2), полученное в результате преобразования (1), позволяет определять значение давления на рабочих поверхностях лопастей шнеков как функцию вышеперечисленных величин.

В зависимостях (1,2) приняты обозначения:

-  $p_n$  - давления в потоке выгружаемого угля;  
 -  $f_R$  - коэффициент трения разрушенного угля по не разрушенному забою

( $f_{R1}$  - коэффициент трения покоя;  $f_{R2}$  - коэффициент трения движения);

-  $f_r$  - коэффициент трения разрушенного угля по ступице шнека;  
 -  $p_l$  - давление на выделенный слой со стороны лопасти;  
 -  $f_l$  - коэффициент трения разрушенного угля по лопасти шнека;  
 -  $\rho_y$  - плотность транспортируемого угля;  
 -  $g$  - ускорение свободного падения;  
 -  $n_{\min}$  - коэффициент бокового давления;  
 -  $k_v^r$  и  $k_v^R$  - коэффициенты, отражающие влияние скорости относительного движения (скольжения) выделенного слоя соответственно по ступице шнека и по наружному диаметру лопасти;

-  $\alpha$  - угол подъема лопастей шнека на радиусе  $r$  (соответствует ступице шнека);

-  $R$  - наружный радиус лопасти шнека;

-  $r$  - радиус ступицы шнека;

-  $\varphi$  - угол охвата шнека.

Анализ приведенных зависимостей и их графической интерпретации (рис.1-8) позволяет сделать следующие выводы, направленные на установление закономерностей трансформации давления

в выгружаемом потоке. Для удобства анализа на графиках (рис.1-3) приведены значения проекции  $p_{но}$  нормального давления  $p_n$  на ось вращения шнека.

1. Изменение плотности выгружаемого угля (горной массы)  $\rho_y$  в практически возможном диапазоне изменения этого параметра оказывает несущественное влияние на изменение давления  $p_n$  (рис. 1), что объясняется, в первую очередь, относительной узостью возможного диапазона изменения  $\rho_y$ . В тоже время, характер влияния  $\rho_y$  на  $p_n$  (возрастание  $p_n$  с возрастанием  $\rho_y$  во всем диапазоне изменения угла охвата  $\phi$ ) свидетельствует о том, что модель качественно верно учитывает массовую (весовую) составляющую величины  $p_n$ .

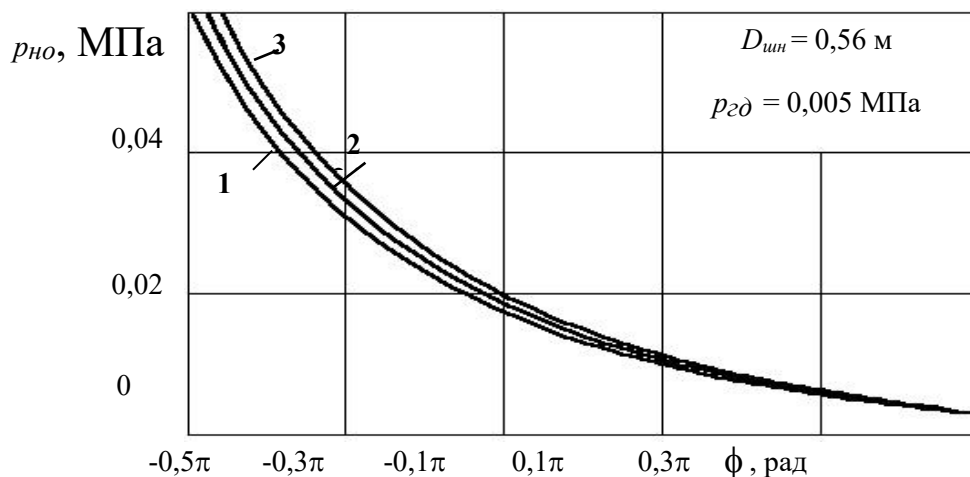


Рис. 1. Графики изменения давления в потоке как функции угла охвата шнека при различных значениях плотности выгружаемого угля  $\rho_y$ : 1)  $\rho_y = 800 \text{ кг/м}^3$ ; 2)  $\rho_y = 1000 \text{ кг/м}^3$ ; 3)  $\rho_y = 1200 \text{ кг/м}^3$

2. Изменение наружного диаметра шнека  $D_{шн}$  в представленном диапазоне его изменения обуславливает несущественное изменение нормального давления  $p_n$  (рис.2). Увеличение  $p_n$  при возрастании  $D_{шн}$  во всем диапазоне изменения этого конструктивного параметра свидетельствует о том, что модель качественно верно отражает нелинейный характер связи между объемом рабочей камеры шнека и его диаметром. Следует отметить, что эта закономерность имеет место также при  $p_{гд} = 0$  (системы пассивной выгрузки), что коррелируется с известной из практики лучшей погрузочной способностью шнеков больших диаметров в сравнении со шнеками меньших диаметров (хотя, безусловно, и не является единственной ее причиной).

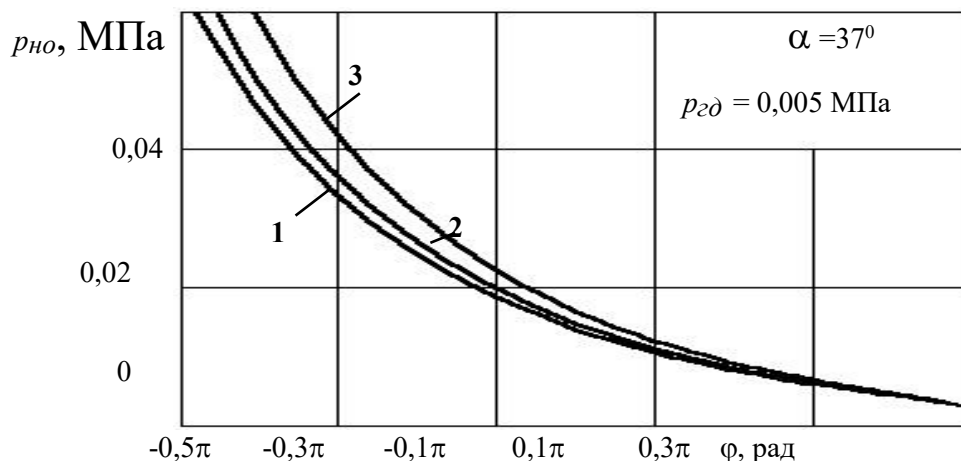


Рис. 2. Графики изменения давления в потоке как функции угла охвата шнека при различных значениях диаметра шнека по резцам  $D_{шн}$ : 1)  $D_{шн} = 0,56$  м; 2)  $D_{шн} = 0,63$  м; 3)  $D_{шн} = 0,71$  м

3. Угол подъема лопастей шнека  $\alpha$  относится к числу параметров, варьирование которых в практически возможном диапазоне изменения в наиболее существенной мере влияют на формирование и изменение величины  $p_n$  (рис. 3 - 5). Давление  $p_n$  в выгружаемом потоке угля в пределах угла охвата  $\varphi = -0,5\pi \dots + 0,5\pi$  является нелинейной функцией  $\alpha$ , возрастающей при уменьшении  $\alpha$ . Следует подчеркнуть, что эта закономерность имеет место для систем как пассивной, так и активной выгрузки во всем диапазоне изменения параметров модели.

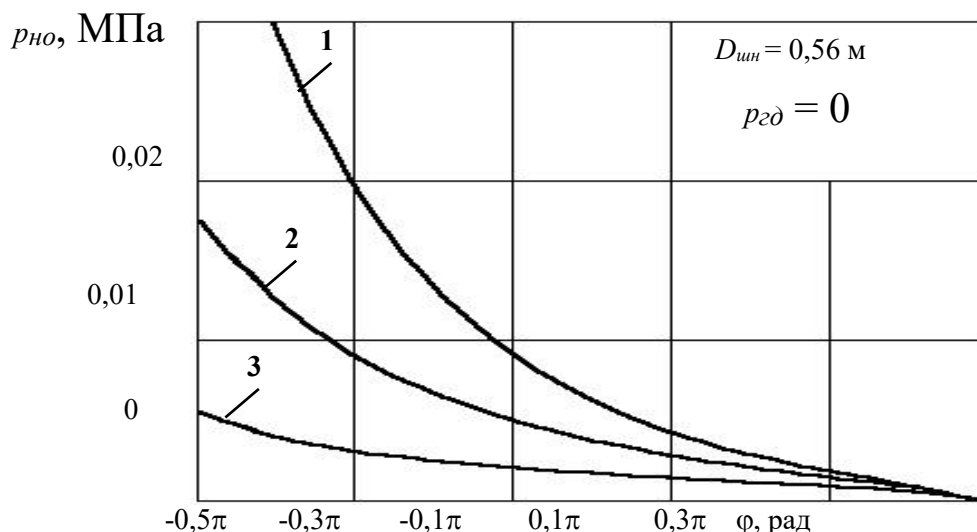


Рис. 3. Графики изменения давления в потоке как функции угла охвата шнека при различных значениях угла подъема лопастей  $\alpha$  ( $p_{гд} = 0$ ): 1)  $\alpha = 30^\circ$ ; 2)  $\alpha = 40^\circ$ ; 3)  $\alpha = 50^\circ$

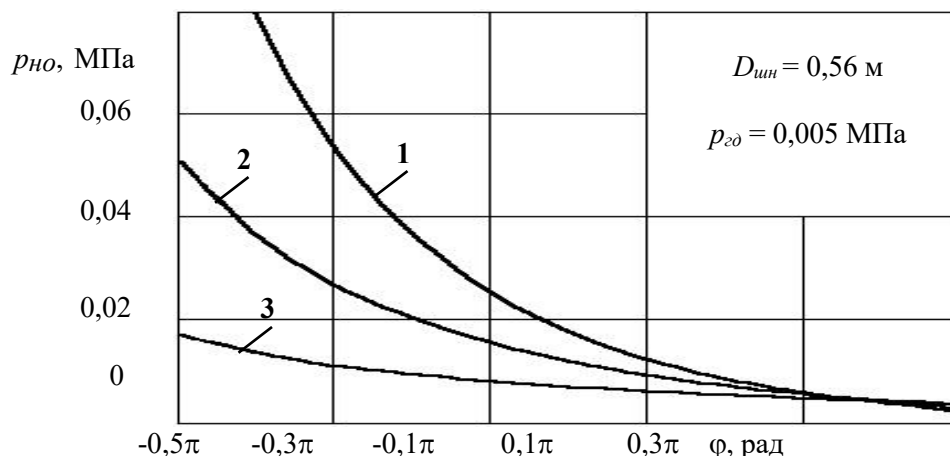


Рис. 4. Графики изменения давления в потоке как функции угла охвата шнека при различных значениях угла подъема лопастей  $\alpha$  ( $p_{гд} = 0,005 \text{ МПа}$ ): 1)  $\alpha = 30^\circ$ ; 2)  $\alpha = 40^\circ$ ; 3)  $\alpha = 50^\circ$

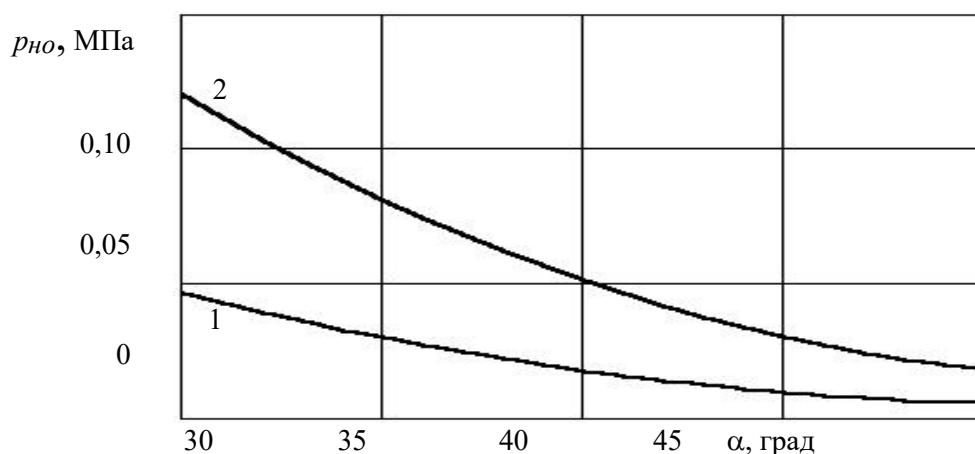


Рис. 5. Графики изменения давления в потоке выгружаемого угля в окрестностях точки  $\varphi = -0,5\pi$  как функции угла подъема лопастей: 1)  $p_{гд} = 0$ ; 2)  $p_{гд} = 0,005 \text{ МПа}$

4. Коэффициенты трения разрушенного угля по лопастям шнека  $f_l$  и по его ступице  $f_r$  также относятся к числу параметров, варьирование которых в практически возможном диапазоне их изменения в наиболее существенной мере влияют на формирование и изменение величины  $p_n$  (рис. 3.17-3.20). Давление  $p_n$  в выгружаемом потоке угля в пределах угла охвата  $\varphi = -0,5\pi \dots +0,5\pi$  является нелинейной функцией коэффициентов  $f_l$  и  $f_r$ , возрастающей при их уменьшении. Эта закономерность имеет место для систем как пассивной, так и активной выгрузки. Совместное одновременное изменение коэффициентов  $f_l$  и  $f_r$  в значительной мере усиливает нелинейность функции  $p_n = F(f_l, f_r)$ .

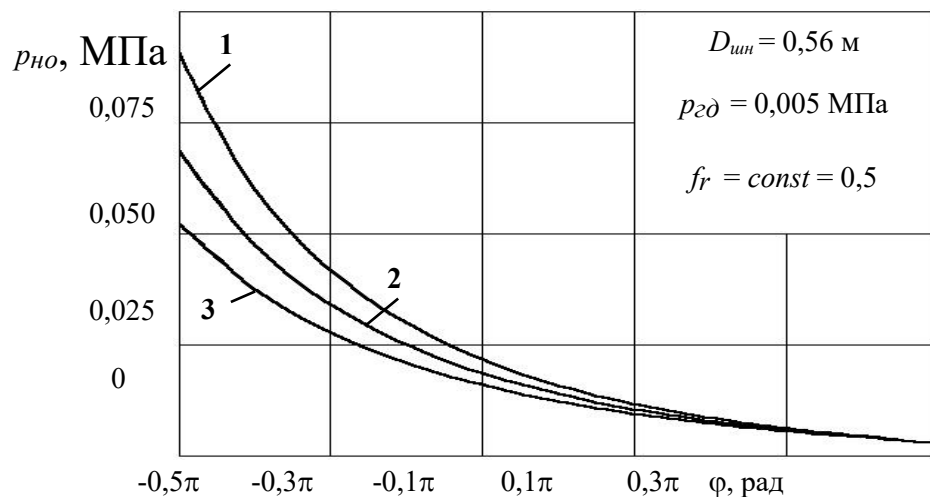


Рис. 6. Графики изменения давления в потоке как функции угла охвата шнека при различных значениях коэффициента трения разрушенного угля по лопасти шнека  $f_l$ : 1)  $f_l = 0,4$ ; 2)  $f_l = 0,5$ ; 3)  $f_l = 0,6$

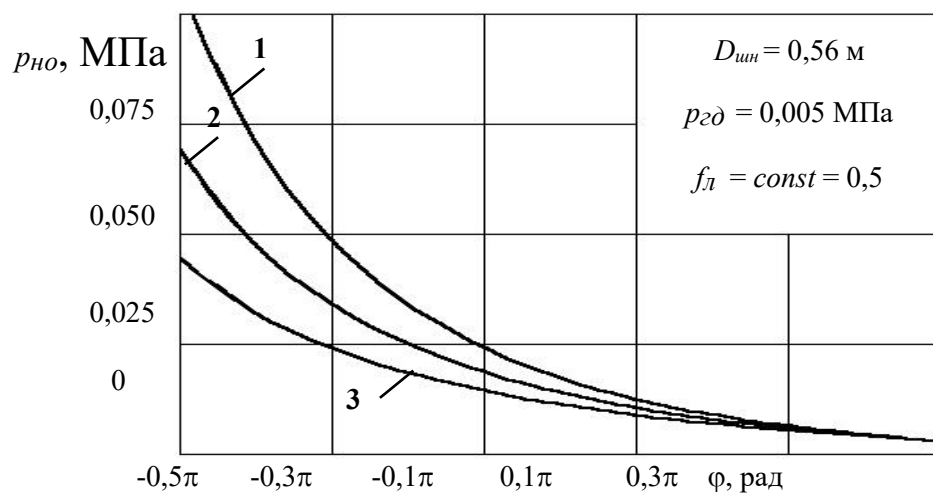


Рис. 7. Графики изменения давления в потоке как функции угла охвата шнека при различных значениях коэффициента трения разрушенного угля по ступице шнека  $f_r$ : 1)  $f_r = 0,4$ ; 2)  $f_r = 0,5$ ; 3)  $f_r = 0,6$

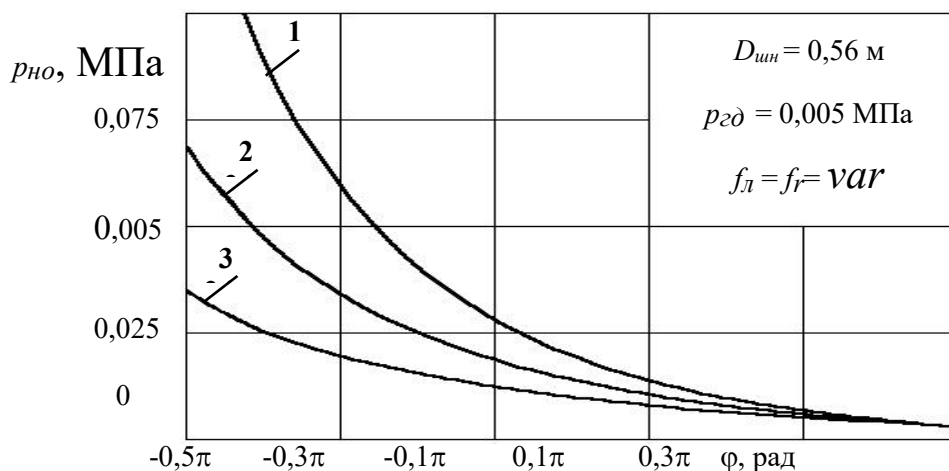


Рис. 8. Графики изменения давления в потоке как функции угла охвата шнека при различных значениях коэффициентов трения  $f_l$  и  $f_r$ : 1)  $f_l = f_r = 0,4$ ; 2)  $f_l = f_r = 0,5$ ; 3)  $f_l = f_r = 0,6$

**Выводы.** Параметрами, в наибольшей мере определяющими значение давления в потоке выгружаемого угля являются давление активирующего воздействия, угол подъема лопастей шнека, коэффициенты трения угля по лопастям и обечайке шнека.

Приложение распределенного активирующего воздействия (давления) к потоку выгружаемого угля в зоне вращательного переноса угля на нерабочую сторону шнека обуславливает значительное - 6...8 кратное приложенному - возрастание давления в выгружаемом потоке в зоне выгрузки. Это определяет возможность эффективного управления значением давления в выгружаемом потоке за счет осуществления и изменения его подпора в заданной зоне.

### Перечень ссылок

1. Шабаев, О. Е. Методика выбора параметров очистных комбайнов со шнеками малых диаметров применительно к заданным горно-геологическим условиям [Текст] / О. Е. Шабаев, В. Г. Нечепаяев, П. П. Зинченко // Международный научно-технический журнал «Вестник Донецкого национального технического университета». – 2020. – №3. – С. 43 – 51.
2. Нечепаяев В.Г. Многопараметрическая нелинейная модель напряженного состояния горной массы в шнеках очистных комбайнов с активной выгрузкой /В.Г. Нечепаяев// Инновационные перспективы Донбасса : материалы междунар. научн.-практ. конф., 28-30 мая 2024 г. Т. 3 : Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов - Донецк, 2024. - С.109-115.
3. Нечепаяев В.Г. Моделирование напряженного состояния горной массы в шнеках очистных комбайнов // Инновационные перспективы Донбасса. Сборник научных трудов 11-й Международной научно- практической конференции. Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. - Донецк : 2025. - С. 97-101.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ГОРНОЙ МАССЫ В ШНЕКОВОМ ИСПОЛНИТЕЛЬНОМ ОРГАНЕ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА

В.Г. Нечепаев

ФГБОУВП «Донецкий национальный технический университет»,  
г. Донецк

**Аннотация.** Разработана математическая модель формирования сопротивления перемещению горной массы в окне выгрузки шнекового исполнительного органа очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов.

**Annotation.** A mathematical model of the formation of resistance to displacement of rock mass in the discharge window of the screw executive body of combine harvesters for excavating thin shallow layers has been developed.

**Ключевые слова:** очистной комбайн, шнек, исполнительный орган, выгрузка, горная масса.

**Key words:** shearer, auger, operating element, discharge, rock mass.

В Донецком регионе основные запасы углей сосредоточены в тонких пологих пластах мощностью (0,55...1,20) м при глубине залегания до 1500 м. В современных условиях выемка таких пластов осуществляется очистными комбайнами со шнековыми исполнительными органами [1,2].

Специфика конструктивной схемы узкозахватных шнековых очистных комбайнов, работающих в условиях тонких пологих пластов, определяет формирование объемного напряженного состояния расположенной в рабочем пространстве шнекового исполнительного органа горной массы. Напряженное состояние горной массы обуславливает существенное ограничение производительности рабочего процесса [1,2,3 и др.].

Определение рациональных параметров шнековых исполнительных органов применительно к этим условиям предполагает, в качестве предварительного этапа решения этой задачи, установление закономерностей формирования сопротивления выгружаемому потоку горной массы в окне выгрузки.

Для моделирования этого сложного процесса в [4] разработана расчетная схема формирования сопротивления перемещению горной массы в окне выгрузки шнекового исполнительного органа очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов.

Сопротивление перемещению в указанной зоне определяется формированием и изменением давления в теле волочения, расположенного между разгрузочным торцом шнека и бортом забойного конвейера (рис.1).

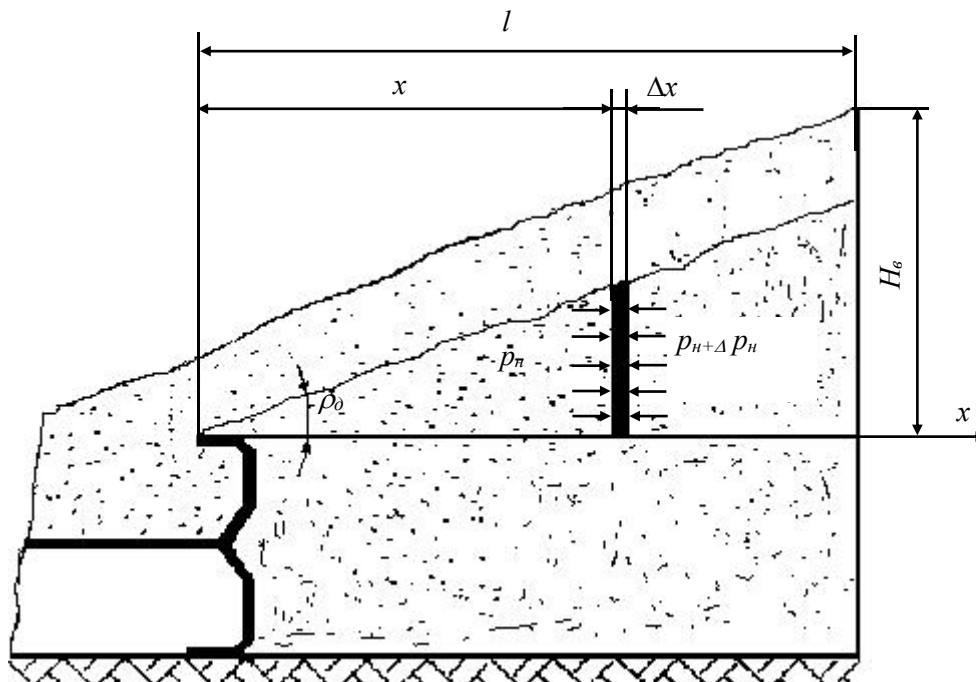


Рис.1. Расчетная схема формирования сопротивления перемещению горной массы в окне выгрузки

Давление, формирующееся в зоне окна выгрузки как следствие сопротивления перемещению тела волочения, можно определить зависимостью

$$p_{ок}(\varphi_{ок}) = \frac{F_n}{S_{ок}(\varphi_{ок})}, \quad (1)$$

где  $F_n$  - сумма сил сопротивления перемещению тела волочения;  
 $S_{ок}(\varphi_{ок})$  - текущее значение площади окна выгрузки.

$$F_n = F_1 + F_2, \quad (2)$$

где  $F_1$  - сила трения по нижней грани тела волочения;

$F_2$  - сила трения по боковым граням тела волочения.

Силу трения по нижней грани тела волочения представим в виде

$$F_1 = \frac{1}{2} S_0 l \rho_y g f, \quad (3)$$

где  $S_0$  - площадь сечения тела волочения по окну выгрузки;

$l$  - длина тела волочения;

$\rho_y$  - плотность насыпного угля;

$g$  - ускорение свободного падения;

$f$  - коэффициент трения угля по углю.

Силу трения по боковым граням тела волочения представим в виде

$$F_2 = 2 S_6 f l^{-1} \int_0^l p_6(x) dx, \quad (4)$$

где  $S_6$  - площадь боковой грани тела волочения.

$$S_6 = \frac{1}{2} H_6 l, \quad (5)$$

где  $H_6$  - высота тела волочения (высота не погруженного массива угля, расположенного в пространстве между бортом забойного конвейера и разгрузочным торцом шнека).

$$H_6 = l \tan \rho_\partial,$$

где  $\rho_\partial$  - динамический угол откоса перемещаемого потока угля.

Величина  $p_6(x)$  - боковое давление в транспортируемом теле волочения, может быть представлена в виде

$$p_6(x) = p_n(x) n_6,$$

где  $p_6(x)$  - боковое давление в теле волочения;

$p_n(x)$  - нормальное давление в теле волочения;

$n_6$  - коэффициент бокового давления.

На расстоянии  $x$  от начала координат выделим элементарный слой толщиной  $\Delta x$ . Уравнение равновесия выделенного слоя имеет вид

$$p_n S(x) + F_{тр} = (p_n + \Delta p_n) S(x),$$

где  $p_n$  и  $\Delta p_n$  - соответственно нормальное давление и его прирост в транспортируемом теле волочения;

$S(x)$  - площадь выделенного элементарного слоя угля;

$F_{тр}$  - сила трения выделенного слоя, возникающая при перемещении тела волочения.

$$F_{тр} = F_{тр}^H + F_{тр}^6,$$

где  $F_{тр}^H$  и  $F_{тр}^6$  - соответственно сила трения по нижней и боковым поверхностям выделенного слоя.

$$F_{тр}^H = f \rho_y g S(x) \Delta x.$$

$$F_{тр}^6 = 2 f H(x) \Delta x p_6,$$

где  $H(x)$  - высота выделенного слоя.

$$H(x) = x \tan \rho_\partial, \quad H|_{x=l} = l \tan \rho_\partial.$$

Обозначив

$$\frac{2 f n_{\delta} H(x)}{S(x)} = m(x), \quad m(x)|_{x=l} = m$$

и выполнив ряд преобразований, получим

$$dx = dp_{\delta} (n_{\delta} \rho_y g + p_{\delta} m)^{-1},$$

$$\text{где } m = 2f n_{\delta} l \tan \rho_{\delta} S_{\delta}^{-1}.$$

Решением этого уравнения (используется метод разделения переменных) является выражение

$$p_{\delta} = n_{\delta} \rho_y g m^{-1} (e^{mx} - 1). \quad (6)$$

Тогда подставив (3) и (4) в (2), после интегрирования получим

$$F_2 = l^2 \tan \rho_{\delta} n_{\delta} \rho_y f m^{-1} (e^{ml} - 1). \quad (7)$$

После подстановки (3) и (6) в (4) и после некоторых преобразований получим

$$F_n = \frac{1}{2} l \rho_y g S_{\delta} [f + (e^{ml} - 1)], \quad (8)$$

а после подстановки (8) в (1), получим

$$p_{ок}(\varphi_{ок}) = \frac{l \rho_y g S_{\delta} [f + (e^{ml} - 1)]}{2 S_{ок}(\varphi_{ок})}. \quad (9)$$

При наличии дополнительного активирующего воздействия на массив насыпного угля, расположенный в пространстве между разгрузочным торцом шнека и бортом забойного конвейера выражение (9) принимает вид

$$p_{ок}(\varphi_{ок}) = \frac{0,5 l \rho_y g S_{\delta} [f + (e^{ml} - 1)] - F_{акт}}{S_{ок}(\varphi_{ок})}, \quad (10)$$

где  $F_{акт}$  - сила активирующего воздействия на массив насыпного угля.

Вид расчетных зависимостей для определения текущего значения площади окна выгрузки  $S_{ок}(\varphi_{ок})$  различен в зависимости от значения величины  $A$  [4]

$$A = R_k - H_{пл} + H_k + \frac{1}{2} D_{л},$$

где  $R_k$  - радиус закругления качалки (корпуса поворотного

редуктора) шнека;

$H_{пл}$  - мощность (толщина) пласта;

$H_k$  - высота забойного конвейера;

$D_l$  - диаметр шнека по лопастям.

$$A < 0$$

$$S_{ок}(\varphi) = \begin{array}{l} \varphi_{ок} \quad [\varphi_{ом1}; 0] \\ \frac{(H_{пл} - \frac{1}{2}D_l - R_k - H_k)^2}{2 \tan \beta} \\ \varphi_{ок} \quad [0; \varphi_k] \\ \frac{(H_{пл} - \frac{1}{2}D_l - R_k - H_k)^2}{2 \tan \beta} + \frac{1}{2}(H_{пл} - \frac{1}{2}D_l - R_k - H_k)^2 (\tan \varphi_{ок}) - \\ - \frac{1}{2}R_k^2 \varphi_{ок} \\ \varphi_{ок} \quad [\varphi_k; \pi] \\ \frac{(H_{пл} - \frac{1}{2}D_l - R_k - H_k)^2}{2 \tan \beta} + \frac{1}{2}(H_{пл} - \frac{1}{2}D_l - R_k - H_k)^2 (\tan \varphi_k) - \\ - \frac{1}{2}R_k^2 \varphi_k + \frac{1}{2}(\frac{1}{2}D_l^2 - R_k^2) (\varphi_{ок} - \varphi_k), \end{array} \quad (11)$$

где  $\varphi_{ом1} = -\arctan \frac{(H_{пл} - \frac{1}{2}D_l - R_k - H_k)}{(H_{пл} - \frac{1}{2}D_l - H_k) \tan \beta};$

$$\varphi_k = \arccos 2 \frac{H_{пл} - \frac{1}{2}D_l - H_k}{D_l}.$$

$$A=0$$

$$S_{ок}(\varphi) = \begin{cases} \varphi_{ок} & [0; \varphi_k] \\ R_k^2 (\tan \varphi_{ок} - \varphi_{ок}) & \\ \varphi_{ок} & [\varphi_k; \pi] \\ R_k^2 (\tan \varphi_k - \varphi_k) + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} D_l^2 - R_k^2 \right) (\varphi_{ок} - \varphi_k); & \end{cases} \quad (12)$$

$$\varphi_{ом2} = 0.$$

$$A > 0$$

$$S_{ок}(\varphi_{ок}) = \begin{cases} \varphi_{ок} & [0; \varphi_{ом3}] \\ 0 & \\ \varphi_{ок} & [\varphi_{ом3}; \varphi_k] \\ \frac{1}{2} (H_{пл} - \frac{1}{2} D_l - H_k)^2 \tan \varphi_{ок} - \frac{1}{2} R_k^2 (\varphi_{ок} - \varphi_{ом3}) - \\ - \frac{1}{2} (H_{пл} - \frac{1}{2} D_l - H_k)^2 \tan \varphi_{ом} & \\ \varphi_{ок} & [\varphi_k; \pi] \\ \frac{1}{2} (H_{пл} - \frac{1}{2} D_l - H_k)^2 \tan \varphi_k - \frac{1}{2} R_k^2 (\varphi_k - \varphi_{ом3}) - \\ - \frac{1}{2} (H_{пл} - \frac{1}{2} D_l - H_k)^2 \tan \varphi_{ом3} + \\ + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} D_l \right)^2 - R_k^2 (\varphi_{ок} - \varphi_k), & \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{где } \varphi_{ом3} = \arccos \frac{H_{пл} - \frac{1}{2} D_l - H_k}{R_k}.$$

Вид расчетных зависимостей для определения значения площади сечения тела волочения по окну выгрузки  $S_{\text{в}}$  различен в зависимости от значения величины

$$B = H_{пл} - H_k - \frac{1}{2} D_l - H_{\text{в}},$$

$$\begin{aligned}
 & B \geq 0 \\
 & S_{ок}(\varphi_6) - \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2} D_{л} - R_{к} \right)^2 \sin 2\varphi_{ок} - \frac{1}{4} \left( \frac{1}{4} D_{л}^2 - R_{к} \right)^2 \sin 2\varphi_{ок} + \\
 & + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} D_{л} - R_{к} \right) R_{к} \cos \varphi_6 \sin \arccos \frac{D_{л} \cos \varphi_6}{2R_{к}} \\
 S_{\varphi} = & B < 0 \\
 & S_{ок}(\varphi_6) + \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2} D_{л} - R_{к} \right)^2 \sin(2\varphi_6 - \pi) + \\
 & + \frac{1}{4} \left( \frac{1}{4} D_{л}^2 - R_{к} \right)^2 \sin(2\varphi_6 - \pi) - \\
 & - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} D_{л} - R_{к} \right) R_{к} \sin\left(\varphi_6 - \frac{1}{2}\pi\right) \cos \arcsin \frac{D_{л} \sin\left(\varphi_6 - \frac{1}{2}\pi\right)}{2R_{к}}, \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & B \geq 0 \\
 & \arccos 2 \frac{H_{пл} - \frac{1}{2} D_{л} - H_{в} - H_{к}}{D_{л}} \\
 \text{где } \varphi_6 = & B < 0 \\
 & \arcsin 2 \frac{\frac{1}{2} D_{л} - H_{пл} + H_{в} + H_{к}}{D_{л}} \quad (15)
 \end{aligned}$$

Зависимости (10-15) являются многопараметрическими функциями и по своей физической сути отражают изменение давления в окне выгрузки в зависимости от:

- угла охвата окна выгрузки в принятой системе координат;
- конструктивных параметров системы выгрузки;
- физико - механических характеристик сыпучей среды;
- силы дополнительного активирующего воздействия на массив угля.

Разработанная математическая модель устойчиво работает при

варьировании перечисленных параметров во всем практически возможном диапазоне их изменения. Таким образом, модель является универсальной как в смысле применимости к различным системам выгрузки (активным и пассивным), так и в смысле практического отсутствия ограничений на возможный диапазон изменения параметров.

**Выводы.** Разработана математическая модель формирования и изменения сопротивления в окне выгрузки шнекового исполнительного органа очистных комбайнов для выемки тонких пологих пластов, учитывающая конструктивные параметры системы выгрузки угля и физико-механические характеристики потока выгружаемой горной массы.

#### **Перечень ссылок.**

1. Шабаев, О. Е. Методика выбора параметров очистных комбайнов со шнеками малых диаметров применительно к заданным горно-геологическим условиям [Текст] / О. Е. Шабаев, В. Г. Нечепаяев, П. П. Зинченко // Международный научно-технический журнал «Вестник Донецкого национального технического университета». – 2020. – №3. – С. 43 – 51.
2. Шабаев, О. Е. . К определению оптимальной схемы набора режущего инструмента шнековых исполнительных органов с учетом вариабельности скорости перемещения очистных комбайнов // Известия высших учебных заведений. [Текст] / О. Е. Шабаев, В. Г. Нечепаяев, П. П. Зинченко // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2026. № 1. С. 17–24.
3. Нечепаяев В.Г. Многопараметрическая нелинейная модель напряженного состояния горной массы в шнеках очистных комбайнов с активной выгрузкой /В.Г. Нечепаяев// Инновационные перспективы Донбасса : материалы междунар. научн.-практ. конф., 28-30 мая 2024 г. Т. 3 : Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов - Донецк, 2024. - С.109-115.
4. Нечепаяев В.Г. Расчетная схема для моделирования сопротивления перемещению горной массы в шнековом исполнительном органе очистного комбайна // Инновационные перспективы Донбасса. Сборник научных трудов 11-й Международной научно- практической конференции Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. - Донецк : 2025. - С. 85-90.

УДК 669.18.013

**ОПЫТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
КОМПЬЮТЕРНОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИННОВАЦИОННОГО  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, М.И. Прилуцкий  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,  
г. Донецк, ДНР

**Аннотация.** *Представлены примеры комплексного использования компьютерного и физического моделирования в ходе проектировании перспективных образцов механического оборудования сталеплавильных цехов, предназначенного для реализации технологических операций выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали.*

**Annotation.** *Examples of the integrated use of computer and physical modeling in the design of advanced mechanical equipment for steelmaking shops, intended for the implementation of technological operations of smelting, secondary processing and continuous casting of steel, are presented.*

**Ключевые слова:** *компьютерная и натурная модели, кислородный конвертер, отсечка шлака, шлакообразующая смесь, кристаллизатор*

**Key words:** *computer and natural models, oxygen converter, slag cutoff, slag-forming mixture, crystallizer*

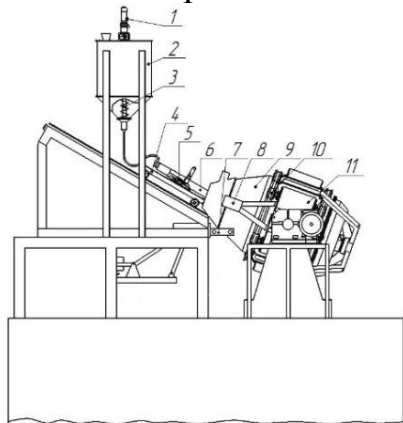
За последнее десятилетие на мировом рынке заметно обострилась конкуренция между ведущими странами-поставщиками металлопродукции. При этом на успех могут рассчитывать те производители, которым удастся поддерживать разумный баланс между ценой и качеством стальных изделий, предлагаемых ими потребителю. Обеспечение указанного требования является главной мотивацией совершенствования технологических процессов выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали, а также оборудования для их реализации. В таких условиях создателям металлургических машин и агрегатов важно сократить период времени, необходимый для воплощения новых идей в реальное производство.

Как известно, с развитием систем автоматизированного проектирования (САПР) удалось существенно сократить сроки проектирования и передачи конструкторской документации

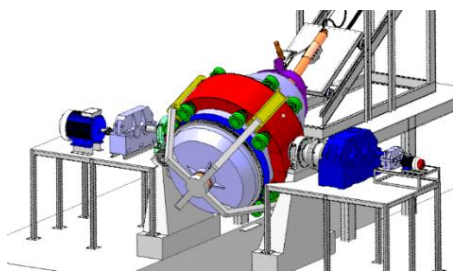
изготовителю оборудования. Современные системы позволяют на основе объектной технологии создавать твердотельную модель, а также видеоизображение проектируемой механической системы, что обеспечивает возможность визуальной оценки взаимодействия ее структурных элементов во время функционирования. Наряду с этим, в ходе выполнения проектных работ на кафедре механического оборудования заводов черной металлургии (МОЗЧМ) Донецкого национального технического университета, а также при подготовке кандидатских и магистерских диссертаций, неоднократно возникали ситуации, когда техническое решение, прошедшее проверку с использованием 3-D моделирования, при натурном исполнении не в полной мере отвечало предъявляемым требованиям. Данный факт, по мнению авторов доклада, можно объяснить тем, что компьютерная программа не всегда в полной мере учитывает особенности реального силового взаимодействия элементов исследуемой системы. Для разрешения указанного противоречия была выработана концепция, предполагающая комплексное использование при проектировании инновационного металлургического оборудования компьютерного и физического моделирования. В соответствии с ней, по выполненной трехмерной компьютерной модели спроектированного объекта в уменьшенном масштабе изготавливается его действующая натурная модель, позволяющая при соблюдении критериев подобия симулировать работу реального промышленного образца [2]. В этих целях на кафедре МОЗЧМ была открыта лаборатория физического моделирования, в которой прошли опытную проверку более сорока выполненных разработок, техническая новизна которых защищена 35 патентами на изобретения. Для наглядной иллюстрации сказанного ниже приведено два примера создания перспективных образцов оборудования сталеплавильного производства с комплексным использованием двух методов моделирования. Первый пример связан с разработкой кислородного мини-конвертера, предназначенного для переработки металлосодержащих отходов.

Данный кислородный конвертер оборудован системой газодинамической отсечки конечного технологического шлака, установленной перед ним на металлоконструкции (рис. 1 а) симметрично вертикальной плоскости, в которой лежит продольная ось его корпуса, выполненного глухонным с горловиной в виде усеченного конуса. Корпус размещен с зазором в опорном кольце 11 на центрирующих роликах 10 и благодаря двум приводам, стационарно установленным со стороны опорных цапф, имеет возможность поворота на 360° в вертикальной плоскости, а также

вращения относительно своей продольной оси симметрии. На опорном кольце по обеим сторонам горловины жёстко закреплены два упора 8. Во время ведения плавки корпус мини-конвертера, вращаемый приводом относительно продольной оси, наклонён к



*a*



*б*



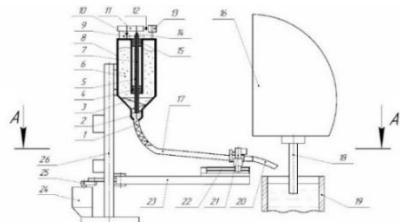
*в*

Рисунок 1 – Общий вид (*a*), 3-D (*б*) и физическая (*в*) модели кислородного мини-конвертера с вращающимся корпусом

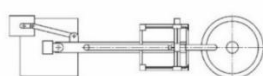
горизонтальной плоскости, а закреплённые на его опорном кольце 11 упоры 8 находятся на заданном удалении над рычагами 7, связанных с С-образными направляющими системы газодинамической отсечки шлака. Благодаря вращению корпуса с заданной частотой, обеспечивается достаточно интенсивное механическое перемешивание предварительно загружённых в него твёрдой и жидкой частей шихты. При этом через фурму 6, закрепленную на каретке 4 и заведенную через горловину конвертера в его полость и совершающую качание, в струе кислорода вдувают мелко-дисперсные реагенты, подаваемые из полости бункера 2 с помощью вертикального шнека 3, вращаемого мотор-редуктором 1. Проверка работоспособности данного конвертера с использованием его компьютерной (рис. 1 *б*) и физической (рис. 1 *в*) моделей подтвердила правильность заложенных в его конструкцию технических решений [3].

Одной из последних разработок кафедры МОЗЧМ является система механизированной подачи шлакообразующих смесей (ШОС) в кристаллизатор МНЛЗ при литье заготовок крупного круглого сечения, схематично показанная на рис. 2 *a*. Она включает бункер 8 с расходуемой шлакообразующей смесью 6, жестко закрепленный на металлической конструкции 23 и снабженный в нижней своей части

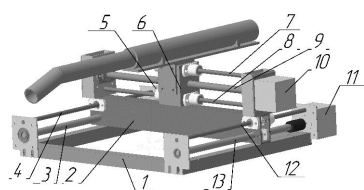
камерой 2, которая связана гибким металлическим рукавом 17 с наклонным направляющим носком 20. Внутри бункера 8 в подшипниковых опорах 4 и 15 размещен вертикальный полый трансмиссионный вал 5 со шнеком 3, нижняя цилиндрическая часть



А-А



а



б



в

Рисунок 2 – Конструктивная схема (а), 3-D модель (б) и натурный образец (в) системы механизированной подачи ШОС в кристаллизатор МНЛЗ

которого соосно расположена в камере 2, а верхняя коническая часть находится в полости бункера. Сверху на бункере установлен электродвигатель 13, посредством муфты 12 сообщаящий вращение быстроходному валу коническо-цилиндрического редуктора 11. Тихоходный вал этого редуктора с помощью муфты 10 и зубчатой пары 9 связан с полым вертикальным трансмиссионным валом 5. В полости данного вала коаксиально размещен второй вал 7, верхний хвостовик которого муфтой 14 соединен с промежуточным валом редуктора 11. К нижнему хвостовику вала 7 прикреплен гибкий спиральный шнек 1, размещенный с возможностью относительного вращения внутри гибкого металлического рукава 17 по всей его длине. Направляющий носок 20, связанный с металлическим рукавом, жестко закреплен на каретке 21 механизма 22, размещенного на конце консоли 23 и обеспечивающего траекторию движения носка в горизонтальной плоскости над зеркалом жидкого металла в кристаллизаторе 19 круглого сечения, в центре которого находится погружной стакан 18, экранирующий струю стали при ее истечении из промежуточного ковша 16 МНЛЗ.

Консоль 23 имеет возможность поворота в горизонтальной плоскости на угол 90° с помощью кривошипно-рычажного механизма 25, приводимого в действие электродвигателем 24, чем обеспечивается

необходимый перевод подвижной части системы в рабочую позицию и последующий возврат в положение парковки.

Равномерное распределение ШОС по свободной поверхности жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ обеспечивается автоматически управляемым механизмом. Данный механизм, 3-D модель которого показана на рис. 2 б, включает размещенные на сварной раме 1 устройства перемещения направляющего носка вдоль двух взаимоперпендикулярных осей. Сам носок закреплен на подвижной каретке 6, смонтированной на траверсе 2 и имеющей возможность реверсируемого поперечного перемещения по двум направляющим 7, 8 с помощью ходового винта 9, вращаемого шаговым электродвигателем 10. В свою очередь траверса может перемещаться в реверсном режиме в продольном направлении по стержням 4, 12 с помощью двух ходовых винтов 3, 13, синхронно вращаемых шаговыми двигателями 5, 11.

Экспериментальная проверка работоспособности принятых технических решений при создании системы механизированной подачи ШОС выполнена на изготовленном ее натурном образце (фото на рис. 2 в). Результаты проведенных с ее использованием лабораторных исследований позволили получить исходную информацию для проектирования промышленного образца [4].

**Выводы.** Комплексное использование методов компьютерного и физического моделирования позволяет не только выполнять проверку еще на стадии проектирования правильности принимаемых конструктивных решений, но и минимизировать временные и материальные затраты на создание новых образцов механического оборудования сталеплавильного производства.

#### **Список литературы**

1. Инновационное металлургическое оборудование. Сталеплавильное производство : учебное пособие / С.П. Еронько [и др.]. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023.- 276 с.
2. Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства : учебное пособие / С.П. Еронько [и др.]. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021.- 324 с.
3. Мини-конвертер для переработки высокофосфористого чугуна / С. П. Еронько [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2010. – № 3. – С. 40–46.
4. Совершенствование систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С.П. Еронько [и др.] // Черные металлы. – 2026. – № 4. – С. 21–28.

УДК 621.695

## РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД

Р.И. Божко, доцент, А.П. Белофаст, магистрант  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,  
г. Донецк, ДНР

**Аннотация.** Разработка эрлифтных установок на основе обоснования рациональных параметров их рабочего процесса для условий откачки загрязненных вод является актуальной научно-технической задачей. Установлены рациональные области применения эрлифтных установок с воздушоструйными компрессорами в качестве источников пневмоэнергии.

**Annotation.** The development of airlift installations based on the justification of rational parameters of their workflow for pumping contaminated water is an urgent scientific and technical task. Rational areas of application of airlift units with air jet compressors as sources of pneumatic energy have been established.

**Ключевые слова:** эрлифтная установка, рациональные параметры, технологическая емкость, подача, расход воздуха, энергоэффективность.

**Keywords:** airlift unit, rational parameters, technological capacity, air supply, air consumption, energy efficiency.

Эксплуатация водоотливного хозяйства предприятия связана с большим количеством вспомогательных операций, значительная часть которых приходится на очистку технологических водосборных емкостей от скопившегося твердого материала и откачку загрязненной воды.

В сравнении с механическими средствами (погрузочными машинами, скреперами) рядом преимуществ обладают гидромеханические средства очистки водосборных емкостей – шламовые насосы, водоструйные насосы (гидроэлеваторы), эрлифты. В этих случаях очистка совмещается с удалением загрязненной воды, процессы могут быть автоматизированы, средства откачки более просты в изготовлении и эксплуатации [1].

Из имеющихся в промышленности средств водоотлива в ряде случаев предпочтительно использование эрлифтных установок, как обладающих меньшими, в сравнении со шламовыми насосами, ограничениями по размерам транспортируемых твердых частиц, не разжижающих, как гидроэлеваторы, транспортируемую гидросмесь

дополнительным количеством напорной воды [1, 2]. Также эрлифты менее чем другие гидромеханические средства подвержены абразивному износу проточной части из-за более низких скоростей движения жидкости.

Для повышения экономичности эрлифтных установок (Рис. 1), которые используются для этой цели, при питании их сжатым воздухом от пневмосети предприятия, когда глубина погружения смесителя эрлифта не превышает 4...5 м, целесообразно применять воздушоструйные компрессоры на подводящих трубопроводах [1, 3].

Практика использования эрлифтов с воздушоструйным компрессором в воздухопроводе доказывает возможность использования излишка давления в пневмосети для инжектирования струйным аппаратом атмосферного воздуха, что позволяет повысить экономичность эрлифтных установок.

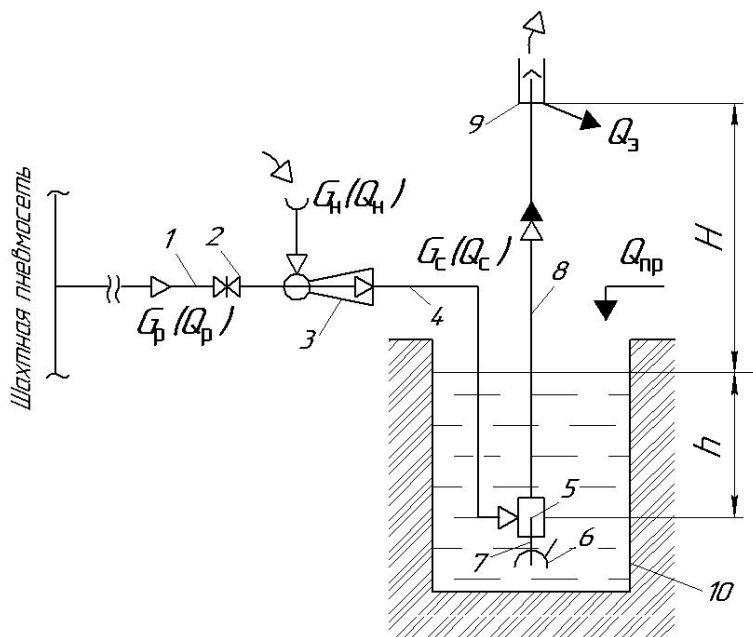


**Рисунок 1 – Принципиальная схема эрлифтной установки с  
воздушоструйным компрессором в воздухопроводе:**

1 – трубопровод рабочего потока; 2 – запорно-регулирующий элемент; 3 – воздушоструйный компрессор; 4 – напорный воздухопровод; 5 – смеситель; 6 – всасывающее устройство; 7 – подающая труба; 8 – подъемная труба; 9 – воздухоотделитель; 10 – водосборная емкость;  $h$  – геометрическое погружение смесителя;  $H$  – высота подъема эрлифта;  $Q_{пр}$  – приток жидкости;  $Q_э$  – подача эрлифта;  $G_p$ ,  $G_n$ ,  $G_c$  – массовые расходы рабочего, инжектируемого и сжатого воздушных потоков соответственно;  $Q_p$ ,  $Q_n$ ,  $Q_c$  – объемные расходы рабочего, инжектируемого и сжатого воздушных потоков соответственно

В общем случае при заданных высоте подъема эрлифта  $H$  и относительном погружении смесителя  $\alpha$  [1, 2, 3] геометрическое

погружение смесителя определяется зависимостью:

$$h = H \frac{\delta}{1 - \delta}, \quad (1)$$

а абсолютное давление в смесителе – выражением:

$$p_{\text{см}} = p_0 + \rho gh, \quad (2)$$

где  $p_0$  – абсолютное давление окружающей среды (атмосферное давление);

$\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости;

$g$  – ускорение свободного падения.

Удельный расход воздуха эрлифтом:

при  $(H + h)/D < 200$ ,  $\rho gh/p_0 < 2$ ,  $4 \leq h \leq 10$  м ( $D$  – эквивалентный диаметр подъемной трубы) [1, 11, 25, 86]:

$$q = 0,7676^{-2,2}; \quad (3)$$

Для рассматриваемой эрлифтной установки правомерно [2]:

- удельный расход воздуха

$$q = \frac{Q_c}{Q_э}; \quad (3)$$

- массовый расход сжатого воздуха

$$G_c = G_p + G_n; \quad (4)$$

- коэффициент инжекции газоструйного компрессора

$$u = \frac{G_n}{G_p}, \quad (5)$$

где  $Q_c$  – объемный расход воздуха на выходе из воздушоструйного компрессора (на входе в смеситель эрлифта) при нормальных технических условиях;  $Q_э$  – объемная подача эрлифта ( $Q_э = Q_c$ );  $G_c$ ,  $G_p$ ,  $G_n$  – массовые расходы соответственно сжатого, рабочего и инжектируемого потоков воздуха в струйном компрессоре.

Удельный расход рабочего воздуха (из пневмосети):

$$q_p = \frac{Q_p}{Q_э} = \frac{q}{1 + u}, \quad (6)$$

поскольку  $\frac{Q_p}{Q_s} = \frac{Q_p q}{Q_c} = \frac{Q_p q}{Q_p + Q_n} = \frac{q}{1+u}$ , где  $Q_p$  – объемный расход

рабочего воздуха (из пневмосети) при нормальных технических условиях,  $Q_p = G_p \rho_{в0}$ .

Для эрлифтной установки с эрлифтом традиционной технологической схемы и струйным аппаратом с использованием выражений (1)...(6), теоретических положений, высказанных в [1-4] с применением разработанной компьютерной программы для вычисления коэффициента инжекции газоструйного компрессора  $u$  в диапазонах значений  $H=3...10$  м,  $\alpha=0,20...0,50$ ,  $p_p=0,4...0,8$  МПа и принятых соотношений  $p_n=p_{н0}=p_0$ ,  $p_c=p_{см}$  определены зависимости:  $q_p/q = f(\alpha)$ ,  $q_p/q = f(H)$ ,  $q_p/q = f(p_p)$  (Рис. 2).

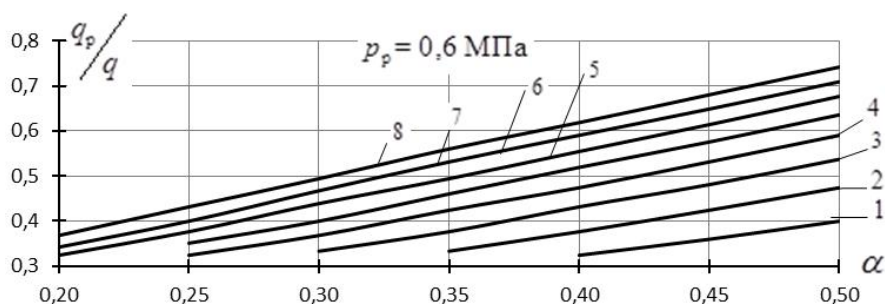


Рисунок 2 – Зависимости относительного удельного расхода рабочего воздуха  $q_p/q$  от относительного погружения  $\alpha$  при  $H$ : 1 – 3 м; 2 – 4 м; 3 – 5 м; 4 – 6 м; 5 – 7 м; 6 – 8 м; 7 – 9 м; 8 – 10 м

При  $p_p = 0,6$  МПа в диапазоне  $H = 3...10$  м уменьшение относительного погружения смесителя от  $\alpha = 0,5$  до  $\alpha = 0,2$  обеспечивает уменьшение относительного удельного расхода рабочего воздуха  $q_p/q$  от  $\sim 0,40...0,75$  до  $\sim 0,32...0,38$  за счет более интенсивного увеличения коэффициента инжекции струйного аппарата  $u$  в сравнении с ростом удельного расхода воздуха  $q$  при уменьшении геометрического погружения смесителя  $h$  (Рис. 2).

Абсолютное значение удельного расхода рабочего воздуха  $q_p$ , как и удельного расхода воздуха эрлифтом  $q$ , уменьшается с увеличением относительного погружения смесителя  $\alpha$  (Рис. 3).

Таким образом, использование воздухомструйного компрессора для преобразования излишне высокого давления рабочего воздуха в диапазонах  $p_p = 0,4...0,8$  МПа,  $H = 3...10$  м,  $\alpha = 0,20...0,50$  обеспечивает снижение расхода воздуха из пневмосети до 2-х раз для эрлифтной установки с эрлифтом традиционной технологической

СХЕМЫ.

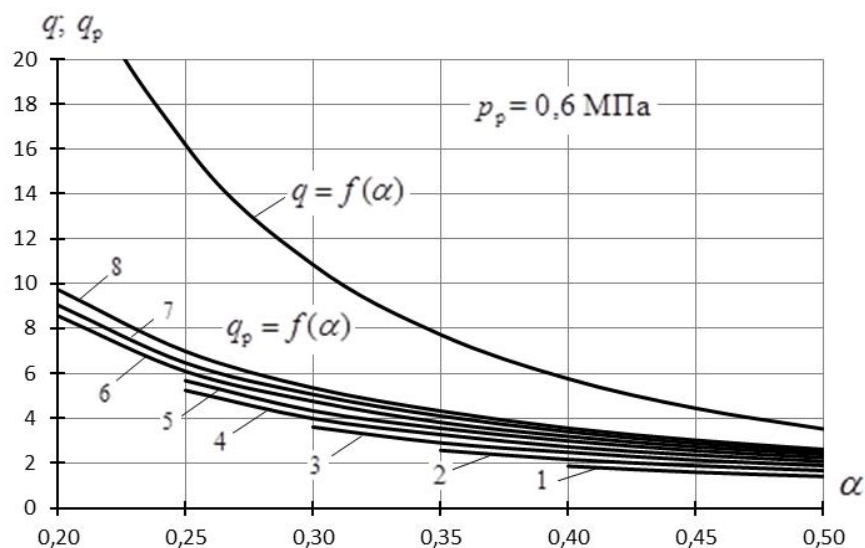


Рисунок 3 — Зависимости удельных расходов рабочего воздуха  $q_p$  и удельного расхода воздуха эрлифтом  $q$  от относительного погружения смесителя  $\alpha$  при  $H$ : 1 – 3 м; 2 – 4 м; 3 – 5 м; 4 – 6 м; 5 – 7 м; 6 – 8 м; 7 – 9 м; 8 – 10 м

Экономичность эрлифтов зависит от многих факторов, в том числе и от условий и качества смешения рабочего тела (сжатого воздуха) с транспортируемой средой (жидкостью или пульпой). Например, в коротких эрлифтах сжатый воздух, в результате проскальзывания, не полностью отдает энергию транспортируемому потоку, что приводит к снижению экономичности работы эрлифта и его коэффициента полезного действия. В наиболее худших условиях в данном отношении находятся эрлифты, работающие с малыми относительными погружениями и со смесителем с элементами струйного аппарата.

Для решения данной проблемы в эрлифтах со смесителем с элементами струйного аппарата требуется усовершенствовать конструкцию следующим образом: на наружной поверхности всасывающей трубы в области смесителя устанавливаются наклонные лопатки и обтекатель на торце всасывающей трубы перед входом в подъемную трубу. Обтекатель выполняется в виде эллипсоида вращения и снабжается наклонно расположенными лопастями. Углы наклона лопаток на всасывающей трубе и лопастей на обтекателе выполняются во взаимно противоположных направлениях.

В результате улучшаются условия смешения сжатого воздуха с транспортируемой средой, что приводит к более полной передаче

энергии от энергоносителя (сжатого воздуха) к гидросмеси или жидкости, так как поток сжатого воздуха ударяется под некоторым углом с частицами жидкости (пульпы). Как следствие уменьшается удельный расход сжатого воздуха, повышается экономичность работы эрлифта и его коэффициент полезного действия.

#### **Выводы:**

Определено, что применение воздушоструйных компрессоров в составе эрлифтных установок традиционной технологической схемы, запитанных от пневмопроводов предприятий общего назначения с давлением рабочего сжатого воздуха  $p_p = 0,4 \div 0,8$  МПа, превышающим потребное для эрлифта, позволяет уменьшить расход рабочего воздуха до 2-х раз в диапазоне высоты подъема  $3 \leq H \leq 10$  м и значений относительного погружения смесителя эрлифта  $0,2 \leq \alpha \leq 0,5$ . Освещены способы повышения экономичности эрлифтных установок. Установлены рациональные области применения эрлифтных установок с воздушоструйными компрессорами в качестве источников пневмоэнергии.

#### **Перечень ссылок**

1. Козыряцкий, Л. Н. Эрлифты и гидроэлеваторы в горной промышленности: учеб. пособ. / Л. Н. Козыряцкий, В. М. Моргунов, В. М. Яковлев, О. А. Геммерлинг. – Донецк: ГОУВПО «ДонНТУ», 2017. – 160 с.
2. Кононенко, А. П. Рациональная область применения нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйными компрессорами / А. П. Кононенко, Р. И. Божко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – № 3(17) – С. 17-25.
3. Кононенко, А. П. Модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока / А. П. Кононенко, Р. И. Божко, В. А. Панов // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля № 11 (29) 2019. – С.75-79.
4. Кононенко А. П. Опыт применения эрлифтных установок в технологических системах ТЭС / А. П. Кононенко, В. И. Мизерный, Л. Л. Глухман // Энергетика та електрифікація. – 2006. – № 11. – С. 8-12.

УДК 621.65

## РАЦИОНАЛЬНЫЕ РАБОЧИЕ ПАРАМЕТРЫ СВОБОДНОВИХРЕВЫХ НАСОСОВ

Р.И. Божко, доцент, Т.И. Колядюк, магистрант  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический  
университет», г. Донецк, ДНР

**Аннотация.** Приведена краткая классификация свободновихревых насосов, рассмотрены основные области их применения, описаны основные конструктивные особенности. Даны рекомендации по выбору основных оптимальных гидродинамических и конструктивных параметров проточной части, характеризующих работу таких машин.

**Annotation.** Classification of free-vortex pumps is presented, their main applications are discussed, and their key design features are described. Recommendations are provided for selecting the key optimal hydrodynamic and design parameters of the flow path, characterizing the operation of such machines.

**Ключевые слова:** Свободновихревой насос, установившееся течение, характеристики, энергоэффективность, рациональные параметры, напор, подача, коэффициент полезного действия.

**Keywords:** Free-vortex pump, steady-state flow, characteristics, energy efficiency, rational parameters, pressure, flow rate, efficiency.

Свободновихревые насосы относятся к гидродинамическим машинам, а именно насосам трения и используются в химической промышленности для подачи агрессивных жидкостей, на аэродромных и автомобильных станциях для перекачивания легколетучих жидкостей, на небольших насосных станциях сельскохозяйственного водоснабжения (для гидротранспорта органических удобрений, картофеля, фруктов, рыбы и т.п.), коммунального хозяйства (для перекачивания грунтовых и сточных вод, канализационного ила), на судах, в качестве вакуум-насосов и компрессоров низкого давления (вместо водокольцевых насосов), как питательные насосы малых вспомогательных котельных установок, в пищевой промышленности и др. [1].

Многими исследователями было проанализировано влияние различных геометрических параметров проточной полости насосов, а также некоторых физических условий работы на их эксплуатационные характеристики, в частности на производительность, энергоэффективность, надежность, шум,

вибрацию и др. [1, 2, 3].

Примечательно, что наличие большого количества параметров, характеризующих форму и размеры проточной полости, а также их сложное взаимное влияние на характеристики вихревых насосов, приводят к материальным и временным затратам при использовании экспериментальных методов исследования. Сложное, нестационарное трехмерное турбулентное движение жидкости в данных насосах затрудняет и теоретические исследования в этой области, а использование методов численного моделирования требует наличия подтвержденной адекватной математической модели течения [2].

По конструктивным признакам и по характеру рабочего процесса свободновихревые насосы (СВН) существенно отличаются от центробежных и имеют следующие особенности [3]:

- благодаря наличию свободной камеры обеспечивается минимальный контакт жидкости с рабочей камерой, что позволяет перекачивать продукты без их особого повреждения;
- при работе свободновихревого насоса, в отличие от центробежного, волокна, взвешенные в жидкости при перекачивании загрязненных и волокнистых смесей, не могут наматываться на лопасти;
- в СВН нет передних уплотнений, следовательно, отсутствуют проблемы, связанные с ними (износ, закупоривание, регулировка, промывка и т. д.);
- более простая форма проточной части снижает металлоемкость насоса, облегчает его сборку, создает лучшие условия для высокой степени унификации;
- высокая устойчивость к износу при перекачивании смесей с включением абразивных твердых частиц ввиду того, что основная часть потока перекачиваемой среды проходит через насос без контакта с рабочей камерой;
- конструктивное исполнение СВН позволяет с небольшими затратами производить ремонт и изготовление запасных частей на месте эксплуатации.

Кроме этого, СВН обладают рядом положительных свойств по сравнению с центробежными: обеспечивают при меньшей подаче напор в 3-9 раз больше при тех же размерах и той же частоте вращения, обеспечивают высокую надежность работы при перекачивании газообразных смесей с содержанием газа до 50 %, имеют высокую всасывающую способность (высота всасывания до 8 м) и мало чувствительны к кавитации.

Основные недостатки СВН – низкая экономичность, которая в зависимости от конструктивного типа и размеров насоса составляет 35–58 %, и ограниченные напоры ( $H \leq 100$  м), что препятствует их применению при больших мощностях, не пригодны для перекачивания высоковязких жидкостей и жидкостей, содержащих абразивные частицы [1].

В настоящее время широкое распространение получили три конструктивные схемы СВН: Вемко, Туро, Сека [3, 4].

Насос типа Вемко (“Wemco”) имеет корпус с осевым всасывающим и тангенциальным напорным патрубками и свободную камеру между РК, расположенным в расточке задней стенки корпуса, и передней крышкой насоса. Рабочее колесо выполнено по типу РК гидромолоты. КПД насосов “Wemco” невысок и составляет 30 – 40 %. Однако эти насосы обеспечивают высокую надежность при гидро-транспорте материалов большой крупности.

Дальнейшие исследования различных конструкций СВН с целью увеличения напора и КПД привели к созданию нового типа насоса – конструктивной схемы Туро (“Turo”), в которой РК (Рис. 1) выполнено в виде диска с прямыми радиальными лопатками (открытого или закрытого на периферии) [3, 4].

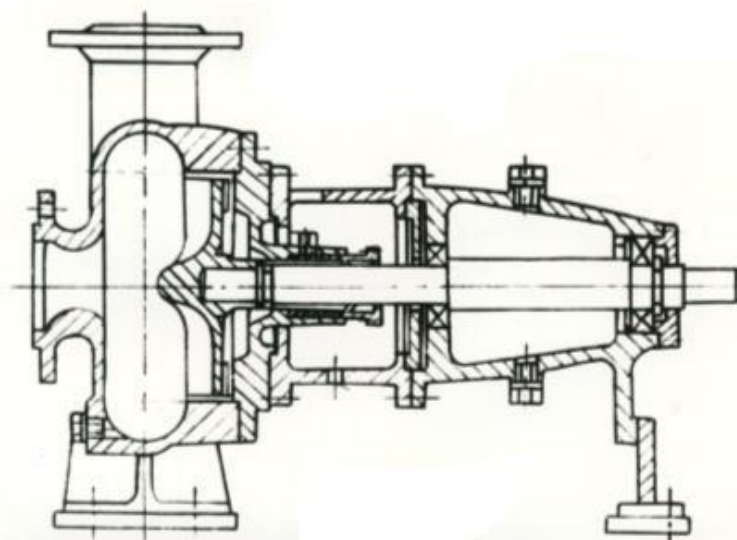


Рисунок 1 – Схема свободновихревого насоса типа “Turo”

В данном насосе резкое изменение направления движения жидкости при выходе из РК в осевом направлении интенсифицирует энергообмен между потоками жидкости, выходящей из колеса и поступающей в свободную камеру, что дает увеличение напора и КПД (КПД насоса “Turo” достиг уровня 54 %).

В основе насосов типа Сека (“Seka”) лежит принцип

выдвижения РК из ниши корпуса в свободную камеру, который увеличивает долю лопастного рабочего процесса и приводит к повышению напора и КПД насоса. Рабочее колесо этого насоса не имеет ограничения на периферии и выдвинуто в свободную камеру, а выходящая из РК жидкость направлена непосредственно в отвод [3, 4]. Однако применение этих насосов ограничено из-за возможного закупоривания перекачиваемым продуктом, особенно при гидротранспорте жидкостей, содержащих волокнистые вещества.

Перечисленные конструктивные схемы – основные, по ним изготавливаются свободновихревые насосы зарубежного производства. Кроме того, существует еще несколько модифицированных вариантов конструктивных схем СВН, которые отличаются формой выходного участка РК, а также размером выдвижения лопатки в свободную камеру.

Конструктивную схему насоса выбирают с учетом условий эксплуатации и свойств перекачиваемой жидкости. Наиболее универсальной и широко применяемой является конструктивная схема СВН “Turo”, обеспечивающая минимальное повреждение перекачиваемого продукта и практическое незакупоривание проточной части при высокой экономичности. [5]. Конструктивной особенностью представленного насоса является то, что РК полностью отодвинута в расточку задней стенки корпуса. Благодаря этому перед РК остается свободным все внутреннее пространство корпуса. Лопатки РК, кроме радиальных, могут быть изогнутыми в сторону, противоположную его вращению.

Гидродинамические параметры, характеризующие работу свободновихревых насосов: напор  $H$ , м; подача  $Q$ , м<sup>3</sup>/с; частота вращения  $n$ , об/мин; мощность  $N$ , кВт;  $\eta$  – КПД, %; геометрические и кинематические параметры – наружный  $D_2$  и внутренний  $D_1$  диаметры РК, м; ширина лопатки колеса на выходе  $b_2$ , м; число лопаток  $Z$ , толщина лопатки  $\delta$ , м; ширина свободной камеры  $B$ , м; диаметр кольцевого отвода  $D_3$ , диаметр входа в насос  $D_0$ , диаметр выхода на уровне языка отвода  $D_6$ , диаметр всасывающего  $D_{вх}$  и напорного  $D_n$  патрубков, м; угол установки лопатки РК на выходе  $\beta_{2л}$ , град; угол выхода лопатки колеса в плане  $\beta_{2у}$ , град; окружная  $U$ , абсолютная  $V$  и относительная  $W$  скорости жидкости в колесе, м/с;  $V_z$ ,  $V_u$ ,  $V_r$ ,  $V_m$  – осевая, окружная, радиальная и меридианная составляющие абсолютной скорости, м/с.

При расчете СВН используют безразмерные коэффициенты:

напора 
$$\bar{H} = \frac{7200}{\pi^2} \frac{gH}{n^2 D_2^2}; \quad (1.1)$$

подачи 
$$\bar{Q} = \frac{240}{\pi^2} \frac{Q}{n^2 D_2^3}; \quad (1.2)$$

мощности 
$$\bar{N} = \frac{1.728 \cdot 10^9}{\pi^4} \frac{N}{\rho n^3 D_2^5}, \quad (1.3)$$

безразмерные геометрические параметры:

$\bar{b}_2 = b_2 / D_2$  – относительная ширина лопадки РК;

$\bar{\delta} = \delta / D_2$  – относительная толщина лопадки РК;

$\bar{D}_1 = D_1 / D_2$  – относительный диаметр входа в РК;

$\bar{B} = B / D_2$  – относительная ширина свободной камеры;

$\bar{D}_0 = D_0 / D_2$  – относительный диаметр входа в насос.

Геометрические параметры СВН типа “Turo” показаны на Рис.

2.

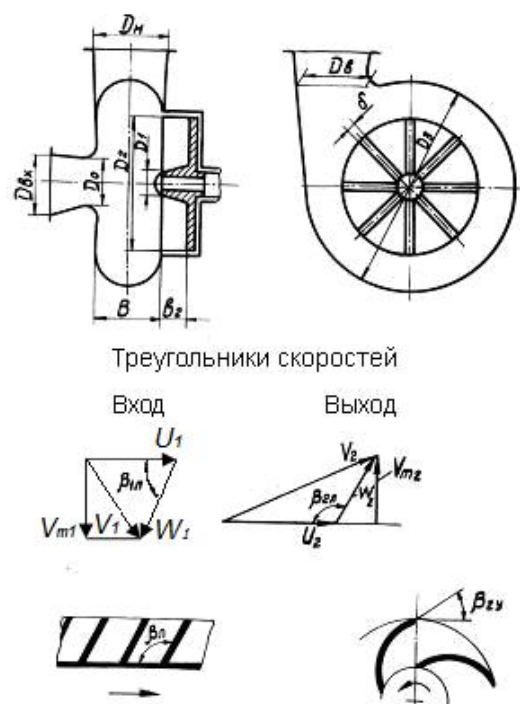


Рисунок 2 – Основные геометрические и кинематические параметры свободновихревого насоса типа “Turo”

В ходе исследований установлено, что на напор и КПД СВН

существенно влияют соотношения геометрических параметров проточной части. На основании опытов, проведенных авторами, а также исследований [3, 5] установлены ниже приведенные оптимальные соотношения геометрических размеров насоса, которые рекомендуются при проектировании проточной части СВН типа “Turo”.

Для рабочего колеса:

- РК с прямыми радиальными лопатками ( $\beta_{2л} = \beta_{2у} = 90^\circ$ ) как наиболее технологичное при изготовлении;
- относительное значение диаметра входа РК  $\bar{D}_1 = 0,15...0,25$  (обычно принимают  $\bar{D}_1 = 0,2$ );
- относительная ширина лопатки колеса на выходе  $\bar{b}_2 = 0,14...0,2$ ;
- число лопаток  $Z = 10$ ;
- относительная толщина лопатки  $\bar{\delta} = 0,015...0,025$  (обычно принимают с учетом абразивности перекачиваемой среды и технологических возможностей).

При проектировании СВН типа “Turo” наиболее технологичной и оптимальной по напору и КПД является кольцевая форма отвода со скругленным меридианным профилем [3-5].

Для кольцевого отвода:

- относительный радиус расположения языка  $\bar{R}_{яз} = 1,3...1,4$ ;
- ширина свободной камеры  $B$  определяется в зависимости от коэффициента быстроходности  $n_s$  графически [3].
- диаметр кольцевого отвода  $D_3 = D_2 + B$ ;
- диаметр выхода на уровне языка отвода  $D_B = B$ ;
- цилиндрический или конфузорный всасывающий патрубок с диаметром

$$D_0 = \sqrt{4 Q / \pi V_0}, \quad (1.4)$$

$$\text{где } V_0 = K_{V0} \sqrt{2gH} \quad (1.5)$$

при коэффициенте входной скорости

$$K_{V0} = (0,2...0,25) \left( \frac{n_s}{100} \right)^{2/3} \quad (1.6)$$

(меньшее значение принимается для более вязких жидкостей с

большим содержанием твердых включений).

По расчетам должно выполняться условие  $D_0 \leq B$ .

#### **Выводы:**

Приведена краткая классификация свободновихревых насосов, рассмотрены основные области их применения, описаны основные конструктивные особенности. Даны рекомендации по выбору основных оптимальных гидродинамических и конструктивных параметров проточной части, характеризующих работу свободновихревых насосов. Приведены оптимальные соотношения геометрических размеров насоса, которые рекомендуются при проектировании проточной части СВН типа “Turo”.

Работу вихревого насоса нельзя рассматривать как работу многоступенчатого лопастного или центробежного насоса без учета потерь энергии. Процессы, аналогичные происходящим в вихревых насосах, характерны и для гидромуфт, и для гидравлических тормозов, которые могут быть объединены в общую группу вихревых гидромашин.

#### **Перечень ссылок**

1. Байбаков, О. В. Вихревые гидравлические машины / О. В. Байбаков. М.: Машиностроение, 1981. 197 с.
2. Болдырев, А. В. Влияние профиля лопасти на характеристики вихревого насоса открытого типа с открытым боковым каналом / А. В. Болдырев, С. В. Болдырев, Д. Л. Карелин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 3 (23). С. 23-37.
3. Герман, В. Ф. Свободновихревые насосы : учеб. пособие / В. Ф. Герман, И. А. Ковалев, А. И. Котенко ; под общ. ред. А. Г. Гусака. – 2-е изд., доп. и перераб. – Сумы : Сумский государственный университет, 2013. – 159 с.
4. Евтушенко, А. А. Рабочий процесс свободновихревого насоса типа «Turo» / А. А. Евтушенко, В. А. Соляник / Вестник НТУУ КПИ, 1999, № 34, с. 346–355.
5. Башта, Т. М. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. 2-е изд., перераб. М : Машиностроение, 1982. 423 с.

УДК 622.619.7

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗА НА ВИБРАЦИОННОМ ПИТАТЕЛЕ

В.В. Сааков

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,  
г. Донецк

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности конструкции и определения основных параметров вибрационных питателей для транспортирования горной массы. Показаны их технические возможности и преимущества перед другими существующими транспортными системами.

**Annotation.** The article examines the design features and the determination of the main parameters of vibrating feeders for transporting mined material. Their technical capabilities and advantages over other existing transport systems are demonstrated.

**Ключевые слова:** вибрационный питатель, транспортная система, горная масса, конструкция.

**Key words:** vibratory feeder, conveyor system, rock mass, construction

Вибрационные питатели широко используются в горной промышленности. Их конструкция включает раму, привод, один или нескольких рабочих органов, связанных с рамой и упругих соединений. По траектории движения рабочего органа различают питатели с круговой, эллиптической, прямолинейной, горизонтальной и наклонной траекториями движения транспортируемого материала. Для этого может использоваться эксцентриковый, инерционный, электромагнитный, гидравлический или пневматический и привод.

Исследования показали [1], что за счет применения новых конструкций рабочих органов возможно снизить их металлоемкость в 1,2...1,5 раза. При этом возможно уменьшить габаритные размеры по высоте и ширине, что особенно важно для работы машин в стесненных подземных условиях.

В статье [2] приведены методики проведения и результаты экспериментальных исследований динамики упругого рабочего органа, оснащенного двумя дебалансными источниками колебаний. Установлено допустимое рассогласование парциальных частот, при котором сохраняется синхронный режим работы вибровозбудителей. Определено влияние конструктивных параметров рабочего органа на

устойчивость синхронного режима. Представлено описание экспериментального образца вибрационного отвалообразователя, результаты испытания которого подтвердили эффективность использования такого оборудования для работы на автомобильных отвалах горных предприятий.

Результаты исследования влияния характеристик опорных элементов на параметры колебаний вибропитателя приведены в работе [3]. Установлено, что конструктивные параметры опорных элементов влияют в основном на величину амплитуды продольных колебаний загрузочного участка рабочего органа. Допустимое провисание рабочего органа может быть обеспечено, если суммарное соотношение параметров опорных элементов загрузочного и разгрузочного участков не превышает 0,025...0,030 м/Н.

Обзор конструкций питателей сыпучих материалов, применяемых в различных отраслях промышленности представлен в работе [4]. Рассмотрены основные типы питателей. Особое внимание уделено анализу конструктивных особенностей каждого типа, влияющих на эффективность и надежность работы.

Исследования [5] посвящены синхронизации сдвоенных вибровозбудителей питателя для транспортирования горной массы. Авторами выполнена оценка механизмов фазовой синхронизации и режимов вибраций, что позволяет проектировать более эффективное и надежное оборудование, адаптированное к специфическим требованиям различных технологических процессов в горнодобывающей промышленности.

Настоящая статья является продолжением указанных работ.

В общем случае исследование вибрационных питателей в эксплуатационных условиях сводится к установлению взаимосвязей в системе «рабочий орган – нагрузка – привод». Движение подобной системы сопровождается колебательными процессами, формирующимися в связях между составляющими ее элементами. Амплитуды колебаний рабочего органа определяют режим движения горной массы. При этом характер перемещений горной массы оказывает влияние на колебательные процессы рабочего органа. Привод, передающий энергию для колебаний рабочего органа, сам подвергается воздействию динамических процессов, возникающих во время эксплуатации. На основании этого работа вибрационного питателя зависит от свойств перемещаемой горной массы, уровня нагрузки и характеристик привода.

Рассмотрим работу вибрационного питателя с инерционным приводом с асинхронным электродвигателем, транспортирующим

горную массу из бункера на ленточный конвейер, расчетная схема которого показана на рисунке 1.

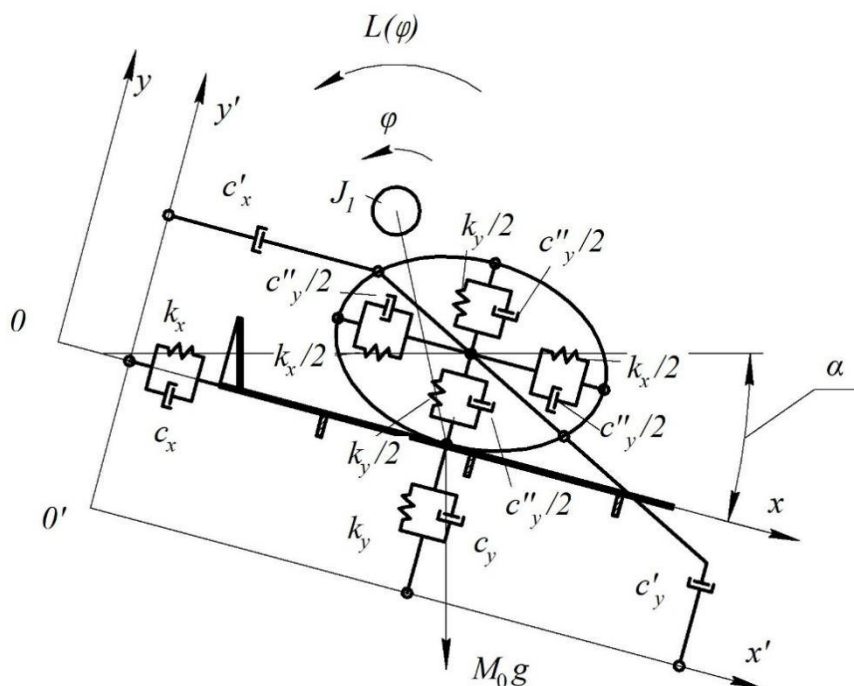


Рисунок 1 – Расчетная схема колебаний вибрационного питателя

В соответствии с расчетной схемой и на основании [6] вибрационный питатель может представлен как динамическая система с тремя степенями свободы  $x$ ,  $y$  и  $\varphi$ . Его движение на холостом ходу может быть описана системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} (M_0 + m_1 + m_2)\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = -(m_1 + m_2)r\dot{\varphi}^2 \cos \varphi - \\ \quad -(m_1 + m_2)r\ddot{\varphi} \sin \varphi; \\ (M_0 + m_1 + m_2)\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = -m_2 r\dot{\varphi}^2 \sin \varphi + m_2 r\ddot{\varphi} \cos \varphi; \\ J\ddot{\varphi} + q_0\dot{\varphi} = L(\dot{\varphi}) - (m_1 + m_2)r\dot{x}' \sin \varphi + m_2 r\dot{y}' \cos \varphi - m_2 g r \sin \varphi, \end{cases}$$

где  $M_0$ ,  $m_1$  и  $m_2$  – соответственно массы грузонесущего органа и дебалансов;  $k_x$  и  $k_y$  – коэффициенты жесткости упругой системы питателя в направлениях осей  $x$  и  $y$ ;  $c_x$  и  $c_y$  – составляющие коэффициента вязкого трения в упругой системе;  $r$  – расстояние до центра масс дебалансов;  $J = J_1 + (m_1 + m_2)r^2$ ;  $J_1$  – приведенный момент инерции ротора двигателя и вращающейся части питателя;  $q_0$  – коэффициент сопротивления вращения вала двигателя;  $L(\dot{\varphi})$  – момент, развиваемый двигателем.

Во время работы под нагрузкой уравнения относительного движения слоя горной массы на участке упругой деформации грузонесущего органа будут:

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + c_y''\dot{y} + k_y y &= -m\ddot{y} - mg \cos \alpha; \\ m\ddot{x} + (c_x' + c_x'')\dot{x} + k_x x &= -m\ddot{x} + mg \sin \alpha - c_x'\dot{x}. \end{aligned}$$

При этом на грузонесущий орган будут действовать следующие силы:

$$F_y = k_y y + c_y \dot{y}; \quad F_x = k_x x + (c_x' + c_x'')\dot{x}.$$

Приведенные уравнения представляют собой математическую модель, описывающую происходящие процессы при перемещении массы по грузонесущему органу. Полученная математическая модель позволяет исследовать вибрационный питатель при различных режимах работы. При этом в каждом исследуемом режиме целесообразно изменять конструктивные параметры грузонесущего органа и дебалансов, а также характеристики транспортируемой горной массы.

#### **Перечень ссылок**

1. Ляшенко, В. И. Совершенствование конструкций грохотов для горнорудной и металлургической промышленности / В. И. Ляшенко, В. З. Дятчин, В. П. Франчук // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 7(1411). – С. 22-31.
2. Левенсон, С. Я. К вопросу обеспечения синхронизации дебалансных вибровозбудителей транспортирующих устройств карьерного отвалообразователя / С. Я. Левенсон, Е. Г. Куликова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2, № 4. – С. 146-154.
3. Гендлина, Л. И. Результаты исследования влияния характеристик опорных элементов на параметры колебаний вибропитателя / Л. И. Гендлина, Е. Г. Куликова, В. М. Усольцев // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 2, № 2. – С. 159-163.
4. Козодой, А. А. Питатели сыпучих материалов. Обзор конструкций питателей / А. А. Козодой, Д. Ю. Бойко // Инновационные подходы в современной науке : Сборник статей по материалам СХСП международной научно-практической конференции, Москва, 20 июня 2025 года. – Москва: ООО "Интернаука", 2025. – С. 70-75.
5. Сааков, В. В. Синхронизация сдвоенных вибровозбудителей питателя для горной массы / В. В. Сааков, В. О. Гутаревич // Горная энергомеханика и автоматика : Сборник материалов XXV Всероссийской научно-технической конференции, Донецк, 28–30 октября 2025 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 52-55.
6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т./ Ред. В. Н. Челомей (пред). - Москва: Машиностроение, 1980 – Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф. М. Диментберга, К. С. Колесникова. 1980. – 544 с.

УДК 621.1.016

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ  
ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНЫЕ КОРПУСА ЭЛЕМЕНТОВ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭНЕРГОЕМКИХ АГРЕГАТОВ В  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ НАУЧНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

А.А. Орлов<sup>1,2,3</sup>, Е.В. Крылова<sup>1,2,3</sup>, А.М. Кенжалыев<sup>1</sup>, Е.А.  
Калашников<sup>4</sup>, Д.Д. Купцова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МЭИ», г. Москва

<sup>2</sup>АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-УЧЕБНО-  
ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «КАРАТ»,  
с. Старое Шаткино

<sup>3</sup>РОССИЙСКАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ, г. Москва

<sup>4</sup>ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС», г. Москва

**Аннотация.** В работе представлено исследование процесса теплопередачи через многослойные корпуса элементов энергетических и энергоемких агрегатов. Проведена аналогия между параметрами теплового процесса и параметрами электрической RC – цепи с построением имитационной модели в программной среде Multisim на персональном компьютере.

**Annotation.** The paper presents a study of the heat transfer process through multilayer enclosures of energy and energy-intensive units. An analogy is drawn between the parameters of the thermal process and the parameters of an electrical RC circuit, with the construction of a simulation model in the Multisim software environment on a personal computer.

**Ключевые слова:** моделирование, теплопередача, многослойный корпус, элемент, энергетический агрегат, энергоемкий агрегат.

**Keywords:** modeling, heat transfer, multilayer casing, element, power unit, energy-intensive unit.

Автоматизированная система научных исследований

неразрушающего контроля элементов энергетических и энергоемких агрегатов (АСНИ) – это программно-аппаратный комплекс на основе вычислительной техники для научных исследований и испытаний новых образцов с использованием моделей изучаемых явлений и процессов [1].

Энергетическая и металлургическая отрасли характерны большим разнообразием энергетических и энергоемких агрегатов, корпуса многих элементов которых представляют собой многослойную конструкцию [2].

Основная цель данной работы состоит в изучении методов электрического моделирования и анализа тепловых процессов, а также в применении этих методов для решения конкретных задач. В качестве объекта исследования выбран процесс теплопередачи через многослойный корпус элемента энергетического агрегата. Было проведено сопоставление между параметрами теплового процесса и характеристиками электрической RC-цепи, на основе чего создана имитационная модель в программной среде Multisim. Изучив процессы заряда и разряда конденсатора в RC-цепи, мы пришли к выводу, что данная модель может эффективно использоваться для определения и оценки параметров и режимов работы элементов энергетических и энергоемких агрегатов в рамках функционирования разработанной АСНИ [3, 4].

На следующем этапе был разработан программный модуль «Расчет сопротивления» АСНИ на языке C# для вычисления параметров RC-цепи с синусоидальным током, в которой резистор и конденсатор соединены параллельно. В первую очередь была решена задача и выведена соответствующая расчетная формула, которая легла в основу алгоритма программы. Затем был создан удобный пользовательский интерфейс для ввода исходных данных. Для проверки корректности работы программы была построена электронная схема RC-цепи в среде Multisim, и при использовании идентичных параметров получены совпадающие результаты, что подтверждает правильность разработанного программного обеспечения.

Была проанализирована параллельная RC-цепь, где источник напряжения  $U$  напрямую соединен с параллельно включенными резистором  $R$  и конденсатором  $C$ . Вследствие такого соединения, напряжение  $U$ , создаваемое источником, одновременно прикладывается к обоим элементам, оставаясь неизменным для них в каждый момент времени (рис. 1).

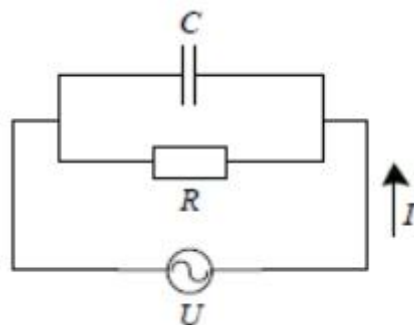


Рис.1 - Параллельная RC - цепочка

Имея заданные значения напряжения (U), силы тока (I) и емкости конденсатора (C), требуется определить величину сопротивления резистора (R). Для достижения этой цели была выведена соответствующая расчетная формула (1), которая затем была интегрирована в программный модуль «Расчет сопротивления» на языке программирования C# (Рис. 2):

$$\begin{aligned}
 I = UY \Rightarrow Y = \frac{I}{U} &\Rightarrow \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(-\frac{1}{X_c}\right)^2} = \frac{I}{U} \Rightarrow \left(\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(-\frac{1}{X_c}\right)^2\right)^2 \\
 &= \left(\frac{I}{U}\right)^2 \Rightarrow \\
 \Rightarrow \frac{I^2}{U^2} - \frac{1}{X_c^2} &= \frac{1}{R^2} \Rightarrow R = \sqrt{\frac{1}{\frac{I^2}{U^2} - \frac{1}{X_c^2}}}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Где  $X_c$  - реактивное сопротивление;

$G_R$  активная проводимость;

$B_C$  - реактивная емкостная проводимость;

$Y$  - полная проводимость цепи.

Рис. 2 - Программный модуль «Расчет сопротивления» АСНИ

Для верификации корректности функционирования программного модуля «Расчет сопротивления» АСНИ, была воспроизведена эквивалентная схема в среде MultiSim, с использованием резистора, имеющего заданное значение сопротивления (Рис.3).

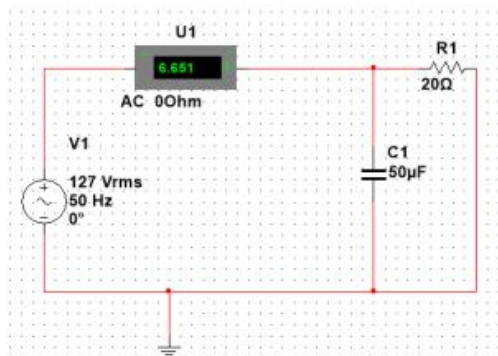


Рис. 3 – Схема RC – в среде MultiSim

После ввода данных в программный модуль «Расчет сопротивления» АСНИ (Рис. 1), соответствующих схеме в среде MultiSim (Рис.2), в соответствующие поля формы, будет определено значение сопротивления R (Рис.4):

Рис. 4 – Результат работы программного модуля «Расчет сопротивления» АСНИ

Значение сопротивления R, равное 20 Ом, подтверждает корректность функционирования программного модуля «Расчет сопротивления» АСНИ.

Значение абсолютной погрешности расчета составляет  $\Delta X = 0,0164801985217$  Ом (2):

$$\Delta X = X_{\text{ПМРС}} - X_{\text{MS}} \quad (2)$$

Значение относительной погрешности расчета составляет менее 0,1% ( $\epsilon=0,082\%$ ), что подтверждает корректность функционирования программного модуля «Расчет сопротивления» АСНИ (3):

$$\epsilon=(\Delta X/ x_{MS})*100\% \quad (3)$$

Выводы:

1. В результате проведенных исследований был разработан программный модуль «Расчет сопротивления» АСНИ и осуществлено электро моделирование созданной имитационной модели, базирующаяся на RC-цепи, которая по своим параметрам эквивалентна процессу теплопередачи через многослойную конструкцию корпуса элемента энергетического агрегата.

2. Рассчитаны значения абсолютной и относительной погрешности, при этом значение относительной погрешности расчета в разработанном программном модуле «Расчет сопротивления» АСНИ составляет менее 0,1%, что подтверждает корректность функционирования программного модуля «Расчет сопротивления» АСНИ

#### **Перечень ссылок**

4. Бекаревич А.А. [и др.]. Тепловой автоматизированный контроль качества и диагностики технического состояния лопаток турбин газотурбинных агрегатов с оценкой надежности эксплуатации. [Текст]. - Москва : Спектр, 2014. - 317 с. : ил., табл., цв. ил.; 21 см.; (ISBN 978-5-4442-0071-1).

5. Бекаревич А.А. Развитие теории теплового неразрушающего контроля металлических изделий сложной формы и разработка автоматизированных средств диагностики и оценки надежности эксплуатации. [Текст]. - Москва : Спектр, 2014. - 77, [1] с. : ил., табл., цв. ил.; 21 см.; (ISBN 978-5-4442-0077-3).

6. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., [и др.] Интеллектуальная система автоматического управления технологическими режимами работы энергоемкого агрегата // Электротехническая сталь – 2024: материалы конференции. – Москва: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024. – С. 40.

7. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., [и др.] Интеллектуальная система мониторинга и диагностики элементов газотурбинной установки (ИСМДЭГТУ) // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27. – № 2. – С. 211–221.

УДК 621-049.32-036.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.А. Кудряшов

ФГБОУ ВО «ХЕРСОНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Г.  
ГЕНИЧЕСК, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**Аннотация.** Объектом исследования является гидроаппаратура, используемая в механическом оборудовании металлургических заводов. Эффективность виброакустической диагностики определяется отсутствием необходимости снятия гидрораспределителя с рабочей позиции, что позволяет осуществлять оперативный контроль их технического состояния и прогнозировать их остаточный ресурс.

**Annotation.** The object of research is the hydraulic equipment used in the mechanical equipment of metallurgical plants. The effectiveness of vibroacoustic diagnostics is determined by the absence of the need to remove the hydraulic distributor from its working position, which allows for the operational control of their technical condition and the prediction of their residual resource.

**Ключевые слова:** виброакустическая диагностика, механическое оборудование, гидрораспределители, износ, техническое состояние, оперативный контроль.

**Keywords:** vibroacoustic diagnostics, mechanical equipment, hydraulic distributors, wear, technical condition, operational control.

Умение прогнозировать сроки безотказной работы оборудования является важным фактором эффективной работы предприятия. Внеплановые ремонты, вызванные неожиданными отказами оборудования, приводят к нарушению ритма работы предприятия. В условиях массового производства это влечет большие экономические потери. Для оптимального планирования предупредительных ремонтов и потребности запасных частей для обеспечения своевременного обслуживания необходимо иметь методику расчета времени безотказной работы оборудования.

Для оборудования, находящегося в эксплуатации длительные сроки, планирование запасных частей и определение времени выхода из строя может вестись на основании накопленного опыта. Для

нового, особенно импортного, оборудования таких данных нет. В частности, для гидроаппаратуры, управляющей работой гидроприводов, следует знать текущее состояние, что позволит обеспечить надежную работу гидроприводов и всего оборудования в целом. Кроме того, необходимо разработать методику определения остаточного ресурса. Это позволит планировать количество и сроки поставки гидроаппаратов, имеющих высокую стоимость.

Для оперативного контроля технического состояния гидроаппаратов необходимо производить оценку состояния при их штатном положении на рабочей позиции. В настоящее время нет эффективно работающей системы диагностирования элементов гидропривода, отвечающей требованиям по оперативности и полноте информации о техническом состоянии аппарата. Вместе с тем, современное состояние вычислительной техники позволяет производить подробный анализ виброакустических шумов для диагностики работающего гидроаппарата.

На первом этапе представленной НИР проведен обзор методов диагностики (в частности виброакустической) машин и механизмов, теоретических и экспериментальных исследований гидромеханических процессов в гидроаппаратах. На основе данного исследования сформирован принцип анализа колебаний звукового спектра, возникающих при перетекании жидкости под давлением в зазорах гидроаппаратов, на котором в дальнейшем был основан метод оценки остаточного ресурса гидрораспределителей на рабочей позиции.

Сформированы технические требования к устройству регистрации параметров, определяющих текущее состояние гидроаппарата: диапазон измеряемых величин, чувствительность, геометрические параметры, защита от помех и др.

Для диагностики технического состояния золотниковых распределителей на подготовительном этапе разработан опытный стенд. Произведено выявление влияния степени износа пары корпус-золотник гидрораспределителя на спектр акустических шумов, выделение наиболее характерных диагностических признаков состояния объекта и диапазонов для их измерения, а также детальное изучение объекта с целью выявления наиболее уязвимых мест, составлением перечня параметров, выходящих за допустимые нормы, и разбиением на классы технических состояний, подлежащих распознаванию. Можно выделить три класса технических состояний гидроаппаратов: начальный, контрольный и критический. Виброакустический сигнал начального класса не содержит

диагностических признаков состояния гидроаппарата и не позволяет судить о степени его износа. Диагностические признаки появляются при возникновении внутренних утечек, поэтому на стадиях контрольного и критического класса технических состояний можно определять степень износа и прогнозировать выход гидроаппарата из строя.

На лабораторном стенде были проведены исследования двух распределителей 1P203 ("распределитель 1" и "распределитель 2") и двух распределителей BE10 ("пилот 1" и "пилот 2").

Цель исследования – выявление влияния степени износа пары корпус-золотник гидрораспределителя на спектр акустических шумов, выделение наиболее характерных диагностических признаков состояния объекта и диапазонов для их измерения.

Зависимости величины внутренних утечек в распределителях от зазора между корпусом и золотником (износа) представлены таблицей 1.

Таблица 1

Внутренние утечки в распределителях, мл/мин, при различных  
степенях износа

|                  | Износ, мкм |    |    |     |    |     |     |      |      |
|------------------|------------|----|----|-----|----|-----|-----|------|------|
|                  | 0          | 3  | 6  | 9   | 10 | 20  | 30  | 50   | 60   |
| Распределитель 1 | 10         |    |    |     |    |     |     | 1560 |      |
| Распределитель 2 | 13,7       |    |    |     |    |     | 383 |      | 1782 |
| Пилот 1          | 0          |    |    |     | 48 | 108 | 840 |      |      |
| Пилот 2          | 7          | 24 | 69 | 108 |    |     |     |      |      |

На рисунке 1 представлены результаты сравнения амплитудно-частотных характеристик сигналов гидрораспределителей на различных стадиях износа с амплитудно-частотными характеристиками эталонных сигналов (без износа).

Анализ представленных результатов показывает относительный (в отношении к средней величине амплитуд полного диапазона частот) рост амплитуд в диапазонах частот 200-500 Гц, 1550-1750 Гц, и в узком диапазоне частот 1726-1736 Гц, соответствующем характерному "свистящему" звуку изношенного распределителя.

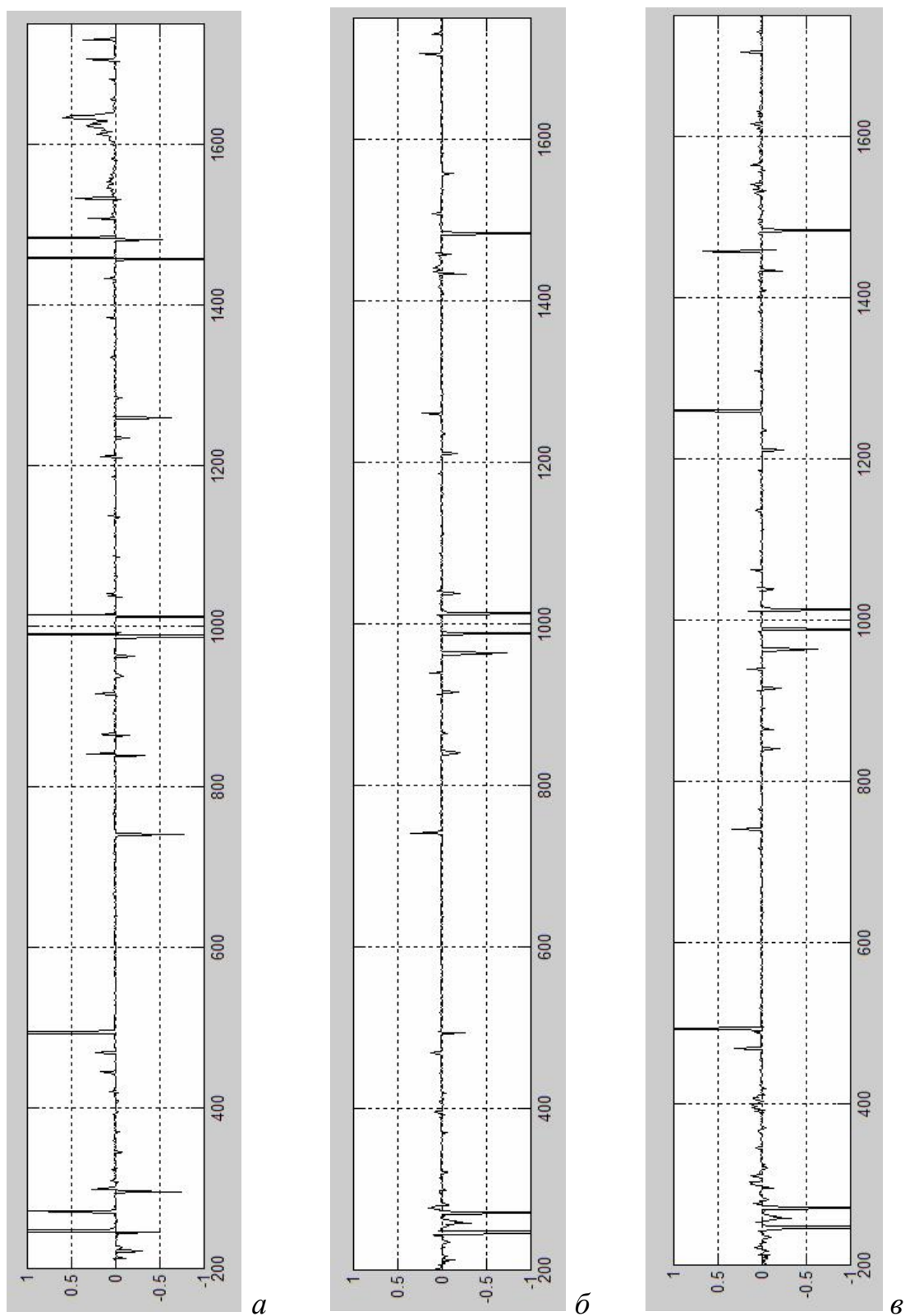


Рисунок 1 – Результаты сравнения АЧХ: *а* – "распределителя 1" с износом 50 мкм, *б, в* – "распределителя 2" с износом 30 и 60 мкм соответственно

Разработан комплекс средств для получения акустических данных гидрораспределителей на рабочей позиции в ходе технологического процесса. В ходе систематизированного исследования группы распределителей получен массив данных для акустического анализа. Анализ этих данных приводит к выводу о большом влиянии фоновых шумов на результат диагностики и о необходимости вычитания фона при обработке программой виброакустического сигнала. Совершенствование метода в этом направлении позволит существенно повысить надежность и качество оценки технического состояния гидроаппаратуры.

#### **Перечень ссылок**

1. Разработка методики диагностирования текущего состояния гидроаппаратуры / А. А. Кудряшов, М. В. Харченко, Р. Р. Дема [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2024. – № 2. – С. 71-79. – DOI 10.36652/0202-3350-2024-25-2-71-79. – EDN EXVGFK.

УДК 621.867

## АНАЛИЗ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РОЛИКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Р.В. Коршаков, Т.П. Мищенко  
ФГБОУВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Аннотация.** В статье рассмотрены некоторые конструкции современных роликовых конвейеров, их преимущества в применении и тенденции к усовершенствованию в области наземных транспортно-технологических комплексов.

**Annotation.** The article discusses some designs of modern roller conveyors, their advantages in application and trends towards improvement in the field of land transport and technological complexes.

**Ключевые слова:** конвейер, ролики, рама, привод, модульные конструкции, новые материалы.

**Keywords:** conveyor, rollers, frame, drive, modular structures, new materials.

Роликовые конвейеры являются важным элементом в современных производственных и логистических системах. Они обеспечивают эффективное перемещение грузов и товаров, снижая затраты на труд и повышая общую производительность. В данном тексте мы рассмотрим основные аспекты роликовых конвейеров, их принцип работы, примеры использования, формулы, связанные с их расчетами, а также людей и компании, которые внесли значительный вклад в их разработку.

Роликовые конвейеры представляют собой механические устройства, состоящие из ряда цилиндрических роликов, установленных на раме. Эти ролики могут вращаться свободно или быть приводными, в зависимости от конструкции конвейера. Основная задача роликовых конвейеров заключается в перемещении грузов в горизонтальном или наклонном направлении. Они могут использоваться для транспортировки различных материалов, включая коробки, паллеты, пакеты и даже сыпучие вещества (рисунок 1) [1].

Основной принцип работы роликового конвейера заключается в том, что груз располагается на поверхности роликов, которые вращаются, позволяя грузу скользить по ним. В зависимости от типа конвейера, движение может быть непрерывным или прерывистым.

Непрерывные конвейеры обычно используются для транспортировки больших объемов однотипных грузов, тогда как прерывистые конвейеры могут быть более гибкими и адаптироваться к переменным условиям работы.



Рисунок 1 – Роликовый конвейер 1

Роликовые конвейеры могут быть классифицированы на несколько типов. Одним из самых распространенных является гравитационный роликовый конвейер, который использует силу тяжести для перемещения грузов. Он не требует электроэнергии и часто используется в складах и распределительных центрах. Приводные роликовые конвейеры, с другой стороны, используют электродвигатели для создания движения. Они более универсальны и могут использоваться для транспортировки грузов на большие расстояния или по сложным маршрутам (рисунок 2) [2].



Рисунок 2 – Роликовый конвейер 2

Обзор литературы по теме конструкций роликовых конвейеров включает научные статьи, авторефераты, материалы конференций и публикации в специализированных базах данных. Основные направления исследований охватывают совершенствование конструкций роликов, выбор материалов, оптимизацию узлов и повышение надёжности систем.

В работе Ушаков Е. Н., Ещеркин А. В., Кострыкин А. П., Шайдулин К. В., Мерзляков П. Е. «Ролики ленточных конвейеров» рассматривают конструктивные особенности роликов, включая типы

подшипников (шариковые радиальные однорядные, в том числе с уплотнениями) [3]. Орлов М. А. в автореферате «Разработка новой конструкции ролика шахтного конвейера с целью повышения его эксплуатационных характеристик» анализирует способы увеличения срока эксплуатации роликов за счёт изменения конструкции, технологии изготовления и сборки. Рассматриваются методы снижения биения ролика и разработки новых торцовых уплотнений [4]. Толкачёв Д. В., Сидоренко В. В. «Конструкции современных роликовых конвейеров» в своей статье рассматривают конструкции современных роликовых конвейеров (рольгангов). Описываются типы роликов (на цапфах, со сквозной вращающейся осью, с неподвижной осью и подшипниками внутри ролика), принципы работы, классификация по механизму действия (приводные и неприводные), геометрии рабочей трассы (прямые, змеевидные, поворотные, раздвижные) [5]. В статье в электронной библиотеке КиберЛенинка «Разработка роликов шахтных ленточных конвейеров повышенной долговечности и ремонтпригодности» предложена конструкция ролика с металлофторопластовыми подшипниками скольжения, которые могут работать без смазки в шахтных условиях. Анализируются конструкции роликов отечественного и зарубежного производства [6]. В работе в журнале Izvestia MGTU MAMI «Experimental evaluation of the load capacity of the rollers of gravity conveyors for pallets» исследуется конструкция роликов гравитационных конвейеров для поддонов, включая диаметры и шаг расстановки. Статья на сайте gramconveyor.com «Advanced Conveyor Belt Roller Design Innovations and Benefits» описывает современные инновации в конструкции роликов: композитные ролики из лёгких полимеров, «умные» ролики с датчиками для мониторинга состояния, покрытия с низким коэффициентом трения, самосмазывающиеся подшипники и другие [7].

С учетом стремительного роста объемов складских операций и требований промышленного комплекса, увеличения потребностей в автоматизации, исследование целесообразности применения конвейеров является актуальным для повышения эффективности работы современных предприятий.

Целью данной работы является необходимость оценить целесообразность применения конвейерных систем в современном транспортно-технологическом комплексе предприятий.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы применения конвейеров.

2. Провести анализ существующего состояния конструкций для использования установок в транспортно-технологическом комплексе нашего региона.

3. Проанализировать преимущества и недостатки внедрения роликовых конвейеров.

Разработка роликовых конвейеров имеет долгую историю, и многие инженеры и компании внесли свой вклад в это дело. Одним из первых патентов на конвейер был выдан в 1795 году, когда изобретатель Джеймс Уатт разработал систему, которая использовала ролики для транспортировки угля. С тех пор технологии значительно эволюционировали, и сегодня существуют различные типы роликовых конвейеров, которые могут удовлетворить потребности самых разных отраслей [8].

Роликовые конвейеры предназначены для перемещения штучных грузов с жёстким основанием: ящиков, поддонов, контейнеров, отливок, металлопроката, труб, плит. Некоторые области применения: - Сборочные линии — в машиностроении рольганги с мотор-роликами и зонным управлением применяются для подачи деталей и сборочных узлов к рабочим местам.

- Металлообработка и прокатное производство — в прокатных станах рольганги — неотъемлемая часть технологической линии. Они делятся на рабочие (расположенные непосредственно у рабочей клетки — для задачи металла в валки и приёма его из валков) и транспортные (связывающие между собой ножницы, правильные машины, холодильники и другое вспомогательное оборудование).

- Упаковочные линии — рольганги с роликами из полиуретана или ПВХ применяются перед автоматическими упаковочными машинами, стретч-обмотчиками и паллетайзерами.

Не подходят рольганги для транспортировки легко повреждаемой продукции (например, плодов или стеклянных банок) и сыпучих грузов.

Некоторые производители роликовых конвейеров (рольгангов):

- Компания «Траяна» — производит роликовое конвейерное оборудование, предлагает широкий ассортимент продукции и комплектующие для ремонта и обслуживания.

- Компания «КС СПБелт» — изготавливает рольганги, в том числе поворотные конвейеры с углом поворота 45°, 90°, 135° и 180°.

- Компания «Юкам-Груп» — предлагает различные типы роликовых конвейеров собственного производства, разрабатывает индивидуальные решения для промышленных предприятий, складов и торговых комплексов.

Роликовые конвейеры классифицируются по типу привода:

1. Неприводные (гравитационные). Груз перемещается под действием силы тяжести или вручную. Устанавливаются под углом 2–5°, подходят для лёгких и средних грузов. Не требуют внешнего питания, просты в обслуживании (рисунок 3).



Рисунок 3 – Гравитационный роликовый конвейер

2. Приводные. Имеют двигатель, который через систему передачи (цепь, ремень) вращает ролики. Позволяют контролировать скорость и направление движения, перемещать грузы горизонтально или с небольшим подъёмом (до 5°). Виды приводных конвейеров [9]:
  - с цепным приводом — надёжны при высоких нагрузках, подходят для тяжёлых грузов;
  - с ременным приводом — тихие, используются в сборочных и упаковочных линиях;
  - с мотор-роликами (MDR) — в каждый ролик встроен небольшой двигатель постоянного тока. Компактные, подходят для накопительных конвейеров, легко адаптируются к уклонам.



Рисунок 4 – Приводной роликовый конвейер

- По геометрии трассы роликовые конвейеры бывают:
- Прямые. Обеспечивают линейное перемещение грузов.
  - Поворотные. Позволяют менять траекторию движения груза. Для этого могут использоваться раздвижные секции или шаровые столы.
  - S-образные. Имеют повороты до 180 градусов.
  - Радиусные (криволинейные) – рисунок 5. Для поворотов в горизонтальной плоскости. Ролики выполняются конусной формы или с переменной длиной по ширине [5].



Рисунок 5 – Радиусный роликовый конвейер

При изготовлении основного элемента роликового конвейера в настоящее время используются следующие современные материалы роликов[10]:

- Сталь и нержавеющая сталь. Прочные, подходят для тяжёлых нагрузок и агрессивных сред .
- Алюминий. Лёгкие, используются для перемещения лёгких грузов.
- Полимеры (ПВХ, полиуретан, стеклонаполненный полиамид). Обладают малым весом, хорошими демпфирующими свойствами (снижают вибрации и шум), химической стойкостью. Подходят для пищевой и химической промышленности .
- Композиты. Сочетают прочность и износостойкость, снижают вес конструкции.

Одной из компаний, активно занимающихся разработкой и производством роликовых конвейеров, является немецкая фирма „Interroll“. Она славится своими инновациями в области автоматизации логистических процессов и предлагает широкий ассортимент конвейерных систем, включая роликовые конвейеры, которые используются в различных отраслях.

Кроме того, важно отметить, что на развитие технологий роликовых конвейеров также влияют исследования в области материаловедения и механики. Современные ролики часто изготавливаются из высокопрочных пластиковых или металлических сплавов, что обеспечивает их долговечность и устойчивость к

различным условиям эксплуатации. Инженеры и ученые продолжают работать над улучшением конструкций и материалов, чтобы повысить эффективность и надежность роликовых конвейеров.

Например, применяют следующие инновационные решения в применении роликовых конвейеров:

- Автоматизация и «умные» технологии. Датчики для мониторинга состояния роликов и прогнозирования износа, системы дистанционного управления.
- Энергосберегающие технологии. Малотормозные материалы и новые подшипники снижают трение, что уменьшает энергопотребление.
- Экологические инновации. Разработка материалов с меньшим углеродным следом и возможностью утилизации.
- Улучшенные конструкции. Например, ролики с подвижной относительно оси обечайкой для автоматического центрирования ленты на желобчатых и трубчатых конвейерах.
- Модульность. Позволяет быстро адаптировать конвейер под разные задачи, менять длину, ширину, траекторию [11].

С каждым годом тенденции развития ускоряются и представлены такими показателями, как компактность, что выражено в разработках более компактных опор и модулей для экономии пространства. Также происходит успешная интеграция с автоматизированными системами: конвейеры могут взаимодействовать с роботами и другими машинами на производственной линии. Повышение износостойкости и долговечности и использование нанотехнологий и инновационных сплавов.

Таким образом, роликовые конвейеры являются неотъемлемой частью современных производственных и логистических процессов. Они обеспечивают эффективность, надежность и скорость при транспортировке грузов, что делает их незаменимыми в самых разных отраслях. С учетом постоянного развития технологий и потребностей рынка, можно ожидать, что роликовые конвейеры будут продолжать эволюционировать, предлагая новые решения для оптимизации логистических цепочек и производственных процессов.

#### **Перечень ссылок**

1. Гнездилов, С. Г. Изучение конструкции системы транспортирующих машин для тарных грузов : учебно-методическое пособие / С. Г. Гнездилов, А. Л. Носко, Е. В. Сафронов. — Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2019. — 16 с. — ISBN 978-5-7038-5151-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/110626.html> (дата обращения: 21.03.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
2. Подъемно-транспортное оборудование. Конвейеры : учебно-методическое

- пособие / Ю.И. Подгорный [и др.].. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2016. — 51 с. — ISBN 978-5-7782-3081-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/91654.html> (дата обращения: 01.05.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей)
3. Шапкин, С.В., НОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ПРИВОДНОЙ ТЕХНИКЕ ЗАРУБЕЖНЫХ ФИРМ / С.В.Шапкин / Сборник материалов научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая-2017». 18-21 апреля 2017 г. КузГТУ, г. Кемерово. — 4 стр.
4. Орлов, М.А. Разработка новой конструкции ролика шахтного конвейера с целью повышения его эксплуатационных характеристик. Автореферат магистерской диссертации.-Донецк.-ДонНТУ.- 2006.
5. Толкачёв, Д. В. «Конструкции современных роликовых конвейеров» / Д.В.Толкачев, В. В. Сидоренко / Материалы научно-практической конференции студентов и магистрантов «Техсервис-2019», Минск, БГАТУ, 2019 г. — с. 211–213.
6. Лускань, О.А. Определение рациональных параметров инерционного роликового конвейера: дис. канд. техн. Наук. Саратов, 2004. 149 с.
7. Лускань, О.А. Анализ приводов инерционных роликовых конвейеров для транспортирования штучных грузов. / О.А. Лускань / Известия ТулГУ. Технические науки. Тула. - 2009. Вып. 2. — с. 39-43.
8. Барышев А.И. Основы расчета транспортирующих машин без тягового органа : учебное пособие / Барышев А.И., Бумага А.Д., Владимиров С.В.. — Донецк : Фолиант, 2019. — 195 с. — ISBN 978-5-6043145-7-9. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/93869.html> (дата обращения: 01.05.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
9. Электронный ресурс. URL: <https://journals.eco-vector.com/> (Дата обращения: 22.04.2026 г.)
- 10 Электронный ресурс. URL: <https://unitmc.ru/> (Дата обращения 11.05.2026 г.)
11. Электронный ресурс. URL: <http://www.gcsconveyor.com/> (Дата обращения 12.05.2026 г.)

УДК 621.875

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗАЧЕРПЫВАНИЯ МАТЕРИАЛА ГРЕЙФЕРНЫМ МЕХАНИЗМОМ

Панченко В.Э.

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,  
г. Донецк, ДНР

**Аннотация:** Рассмотрены процессы, протекающие во время работы двухчелюстного грейферного захвата для насыпных грузов. Установлено, что одним из критериев оптимизации грейфера является минимизация момента захвата. Снижение значения этого параметра позволяет уменьшить требуемую мощность гидравлической системы, снизить энергопотребление и увеличить ресурс оборудования.

**Annotation:** The processes occurring during the operation of a double-jawed grab for bulk cargo are considered. It is established that one of the criteria for optimizing the grab is to minimize the moment of capture. Reducing this parameter allows to reduce the required power of the hydraulic system, diminish energy consumption and increase the technical resource.

**Ключевые слова:** грейферный захват, насыпной груз, критерий оптимизации, усилие смыкания челюстей, резание грунтов, зачерпывание сыпучих материалов.

**Keywords:** grappling, bulk load, optimization criterion, jaw closing force

**Введение.** Грейферный захват является одним из ключевых устройств, применяемых для работы с сыпучими материалами в горной промышленности [1, 2]. Двухчелюстные грейферы получили широкое распространение благодаря своей универсальности и эффективности [3]. Эти устройства активно используются в экскаваторах и перегружателях, обеспечивая быструю и надежную транспортировку насыпных грузов [4]. Однако высокие динамические нагрузки, возникающие при работе с такими материалами, оказывают существенное влияние на ресурс оборудования и безопасность эксплуатации [5]. Снижение этих нагрузок становится критически важной задачей для повышения долговечности грейферов и обеспечения безопасных условий работы на производственных объектах [6, 7]. Резание грунтов грейферами при их экскавации или зачерпывании сыпучих материалов является

сложным процессом. На процесс резания грунта влияет большое количество факторов.

**Целью данного исследования** является изучение процесса работы двухчелюстного грейфера для обоснованного выбора его параметров.

Грейферный захват представляет собой сложную механическую систему, состоящую из нескольких ключевых компонентов, обеспечивающих его функциональность и надежность. Каждый элемент конструкции играет важную роль в общей работоспособности устройства и требует тщательного проектирования с учетом предполагаемых нагрузок и условий эксплуатации.

Общим для грунтов и сыпучих материалов является то, что те и другие являются минерально-дисперсной средой, в которой связи между твердыми частицами отсутствуют (идеальная сыпучая среда) или имеют меньшую прочность, чем прочность частиц. Поэтому не следует проводить строгого отличия между грунтами и целым рядом сыпучих материалов, исходя из общности условий их зачерпывания грейферами.

Зачерпывание материала начинается сразу же после опускания грейфера при включении замыкающей лебедки на замыкание грейфера. Поддерживающая лебедка при этом включается "на подъем" для выбора напуска канатов, либо затормаживается, если напуск отсутствует. При автоматическом управлении загрузкой грейфера каждому положению челюстей грейфера должно соответствовать определенное усилие в замыкающих канатах. В этом случае величина задания усилия в замыкающих канатах должна формироваться в функции положения челюстей с учетом емкости грейфера и физико-механических свойств добываемого материала.

Добыча таких материалов, как кокс, сухой песок, гравий, щебень и других, происходит по-разному. При зачерпывании сухого песка отсутствуют силы сцепления между частицами, а при зачерпывании кокса, графия, щебня достаточно значительные. Очевидно, эти силы определяют относительную взаимную подвижность частиц, которая находится в зависимости сил трения между ними. Параметром подвижности частиц является угол естественного откоса, который тем больше, чем меньше подвижность частиц.

Заполнение грейферного ковша происходит при взаимодействии металлического зачерпывающего контура с сыпучим материалом, поэтому пересчитанные свойства сыпучего материала

качественно должны влиять на процесс заполнения.

Следует различать внутреннюю область зачерпывания и внешнюю, которая находится вне контура грейферного ковша. Во внутренней области происходит уплотнение материала, рыхление и перемещение. Во внешней области происходят также достаточно сложные процессы – уплотнение массива оставшегося материала, содрогание слоев.

Геометрическая форма поверхности играет важную роль и влияет на характер перемещения частиц материала при зачерпывании. Параметрами геометрических форм поверхностей челюсти является угол наклона площади, вид кривой в направлении материала (вогнутая или выпуклая) и кривизна этой кривой.

Если повысить плотность материала, то характер передвижения материала в ковше несколько изменится. Деформация слоев в обоих случаях меньше, чем при зачерпывании неуплотненного песка, при чем деформации поддаются главным образом слои, которые близко лежат к фрикционным поверхностям. В процессе исследования изменялись скорость замыкающего каната и кратность полиспаста. Полученная картина движения материала внутри ковша в процессе смыкания подтверждает возникновение значительного передвижения материала около боковых стенок и скольжения нескольких призм материала.

Для крупных кусков грунта сначала опущенный грейфер углубляется в материал на определенную глубину, затем под действием усилий в замыкающем канате начинается поворот челюстей и незначительное вертикальное перемещение их вниз. Под действием усилия на ножи куски материала под ножом движутся в зоны наименьших сопротивлений: вниз и расщелину между другими кусками и в стороны. Перемещение вне контура ведет к некоторому уплотнению окружающего массива. Однако сопротивление этому уплотнению большое по сравнению с мелкозернистым материалом, поэтому челюсть под действием реактивных сил перемещается к оси грейфера, что вызывает дополнительное усилие сжатия кусков материала, движущегося внутрь контура.

При зачерпывании мелких сыпучих материалов, таких как песок, мелкий уголь, усилие в замыкающем канате во время смыкания челюсти растет равномерно. Совсем иначе происходит процесс при зачерпывании крупнокусковых материалов. В этом случае при смыкании происходит образование из жестких кусков, контактирующих, жестких «балок», линия контакта между которыми характеризуется сложными кривыми. Таких контактных линий в

плоскости зачерпывания, может образовываться одновременно несколько.

При дальнейшем смыкании челюсти нижние уплотненные слои сопротивляются углублению в материал, в результате чего ножи челюсти начинают перемещаться по пологой кривой зачерпывания. При этом проходит подворачивание челюстями кусков и их уплотнение.

Если крупнокусовой материал имеет небольшую прочность, то под действием усилия на ноже может возникать разрезание кусков, разрушение стойкости «балки» из кусков материала и прессования материала. В этом случае траектория ножа по характеру приближается к траектории при зачерпывании мелкокусовых материалов.

**Выводы.** Для сыпучих материалов следует выделить два принципиально разных процесса зачерпывания: первый - для грейферов, которые в процессе заполнения ковша углубляются, и второй - для грейферов, которые в процессе заполнения ковша углубляются в материал незначительно.

С кинематической точки зрения смыкание может быть осуществлено в трех случаях. Первый - когда головка неподвижна, а траверса перемещается вверх. Второй - когда траверса неподвижна, а головка перемещается вниз. Третий - когда головка и траверса будут перемещаться навстречу друг другу или в одну сторону (вверх), причем скорость подъема траверсы выше, чем скорость подъема головки.

#### **Перечень ссылок**

1. Балака, М. Н. Специальный грейферный механизм для разработки прочных грунтов / М. Н. Балака, Д. А. Мишук, Н. Н. Ходневич // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации) : Материалы Национальной научно-технической конференции с международным участием, Тюмень, 13 декабря 2018 года / Ответственный редактор Я.А. Пронозин. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – С. 104-106.
2. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств / В. А. Будишевский и др.; под общ. ред. В. П. Кондрахина; ГОУВПО «ДОННТУ». – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Донецк: ДОННТУ, 2017. – 216 с.
3. Панченко, В. Э. Анализ современных конструкций грейферных захватов для насыпных грузов / В. Э. Панченко, В. О. Гутаревич // Донбасс будущего глазами молодых ученых : Сборник материалов научно-технической конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых, Донецк, 18 ноября 2025 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 79-83.
4. Ярош, В. В. Математическая модель движения механизма грейфера крана / В. В. Ярош // Горная энергомеханика и автоматика: Материалы XX Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию ДонНТУ, Донецк, 27–29 октября 2020 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. – С. 30-35.

5. Моисеенко, В. Л. Технологические аспекты обеспечения надежности деталей гидропривода грейферного захвата / В. Л. Моисеенко, М. П. Кульгейко, Д. В. Мельников // Проблемы безопасности на транспорте : Материалы XIII международной научно-практической конференции, посвященной Году качества. В 2-х частях, Гомель, 21–22 ноября 2024 года. – Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2024. – С. 112-113.

6. Бортяков Д. Е. Учёт динамических нагрузок при проектировании металлоконструкций порталных кранов / Д. Е. Бортяков, А. А. Грачев, С. В. Никитин [и др.] // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2024. – № 2. – С. 79-90. – DOI 10.22281/2413-9920-2024-10-02-79-90.

7. Адамов Е. И. Устройства, снижающие потери сыпучих грузов при перегрузке грейферными кранами / Е.И. Адамов, Н.С. Отделкин, С.Н. Сикарев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – № 6 (28). – 2014. – С. 129-133.

УДК 621.867

## ЦЕЛЕСООБРАЗНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТРУДНОГОРЮЧЕЙ ШАХТНОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ

Т.П. Мищенко

ФГБОУВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Аннотация.** В статье рассмотрены некоторые особенности использования трудногорючих конвейерных лент, преимущества и недостатки, их область применения и перспективы развития.

**Annotation.** The article discusses some of the features of using hard-to-burn conveyor belts, advantages and disadvantages, their scope and development prospects.

**Ключевые слова:** ленточный конвейер, трудногорючая конвейерная лента, воспламенение, испытания, требования.

**Keywords:** conveyor belt, flame retardant conveyor belt, ignition, testing, requirements.

Горнодобывающая промышленность сопряжена с высокими рисками, в том числе – пожарами и взрывами. Один из ключевых способов снизить эти риски – использование трудногораемых шахтных конвейерных лент. Они минимизируют вероятность возгорания и распространения огня, обеспечивая безопасность персонала и оборудования.

Трудногорючие ленты – это материалы, способные противостоять воспламенению и распространению пламени. Они широко применяются в промышленности, транспорте, строительстве и других сферах, где требуется повышенная пожарная безопасность. Трудногорючие конвейерные ленты широко используются в горнодобывающей промышленности, в частности в шахтах и на обогатительных фабриках. Они предназначены для транспортировки угля, породы, горной массы в подземных выработках и на поверхности шахт. Такие ленты сертифицируются по стандартам, например, ГОСТ Р 57032-2016 [1].

Анализ литературы показывает, что исследования в этой области охватывают как технологические аспекты создания таких материалов, так и их практическое применение в различных условиях



Рисунок 1 –Трудногорючая лента

Изучение характеристик трудногорючих лент ведется с завидным постоянством. Исследуются теплофизические и физико-механические свойства композитных материалов, включая коэффициент теплопроводности. Например, была предложена опытная формула и схема экспериментального стенда для определения коэффициента теплопроводности многослойной трудногорючей конвейерной ленты [2].

Анализ пожароопасности конвейерных лент проводится в статье Л. С. Беляевой, А. В. Бондаренко, И. Н. Непочатых и Е. Н. Пастернак (2014 год), где представлены результаты исследований параметров пожароопасности конвейерных лент для угольных шахт. Указывается, что практически все испытанные в период с 2010 по 2014 год конвейерные ленты по группе горючести относятся к категории «трудногорючие». При этом максимальная температура газообразных продуктов горения материала не превышала 260 °С, а потеря массы – не более 60% [3].

В России действуют стандарты, регулирующие требования к конвейерным лентам, включая их пожаробезопасность. Например, ГОСТ Р 56904-2016 устанавливает требования к резинотросовым конвейерным лентам для горнодобывающей промышленности, включая условия эксплуатации трудновоспламеняющихся и трудносгораемых лент. Также упоминаются нормы безопасности, например, РД 03-423-01, которые распространяются на конвейерные ленты, применяемые на опасных производственных объектах[4].

Выделяются три основных направления: создание и применение трудногорючих (трудносгораемых) конвейерных лент, разработка средств контроля работы ленточного конвейера и применение установок автоматического водяного пожаротушения [5].

Исследования показывают, что возгорание или тление

конвейерной ленты может происходить при относительно низких температурах, например, при пробуксовке на барабанах или трении о другие элементы конструкции. Поэтому важно учитывать коэффициент теплопроводности компонентов ленты и процессы, протекающие в аварийных ситуациях. Исследования в аварийных ситуациях проводятся путем анализа тепловых процессов, происходящих при пробуксовке ленты на барабанах конвейера, трении о другие элементы конструкции [6].

В области разработки новых рецептур и технологий упоминается использование инновационных резиновых смесей с повышенной огнестойкостью, например, марки HWR/F (High Wear Resistant/Fire-stop), которая сочетает огнестойкость, ударопрочность и повышенную стойкость к истиранию [7].

Целью данной работы является обоснование целесообразности применения трудногорючих конвейерных лент с точки зрения пожарной безопасности, экономической эффективности и соответствия нормативным требованиям.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы применения шахтных конвейерных лент, в том числе и трудногорючих.
2. Провести анализ существующего состояния производства шахтных трудногорючих конвейерных лент.
3. Проанализировать преимущества и недостатки применения трудногорючих лент.

Основные характеристики трудногорючих лент.

Назначение: транспортировка угля (кусками до 500 мм), породы (кусками до 300 мм), а также других горных пород, руд, сланцев и других материалов. Применяются в угольных, сланцевых, рудных шахтах, опасных по газу и пыли, на открытых горных работах, обогатительных фабриках рудной, нерудной и угольной отраслей [8].

Условия эксплуатации:

- температура окружающей среды: от  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  (в некоторых случаях — до  $-40^{\circ}\text{C}$ );
- угол наклона конвейера: от  $-16^{\circ}$  до  $+18^{\circ}$ ;
- влажность до 98%.

Конструктивные особенности:

- резиноканевый послойный тяговый каркас из синтетических тканей (ТК, ТЛК, ЕР, ЕЕ и др.);
- наружные резиновые обкладки с плоскими поверхностями;
- могут иметь одну защитную (брекерную) прокладку под рабочей

обкладкой;

- резиновые борта.

Каркасная ткань пропитана специальным составом, а резиновые обкладки содержат антипирены — ингредиенты, понижающие горение и придающие ленте способность не продолжать горение при удалении из очага.

Некоторые типы трудногорючих (трудногосгораемых) лент:

- **1.2ШТС(ТГ)**. Предназначены для транспортировки угля и антрацита кусками размером до 700 мм, пород кусками размером до 500 мм.

- **2ШТС(ТГ)**. Подходят для перевозки угля и антрацита кусками размером до 500 мм или пород кусками размером до 300 мм.

Также выделяют следующие виды трудногорючих лент:

- **Ш** — трудновоспламеняющаяся лента, используется для транспортировки грузов при температуре окружающей среды от  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .

- **ШМ** — трудновоспламеняющаяся морозостойкая лента, применяется для перевозки грузов при температуре окружающей среды от  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .

К важным характеристикам трудногорючих конвейерных лент относятся:

- относительное удлинение по основе при нагрузке, составляющей 10% номинальной прочности образца;
- прочность связи между рабочей обкладкой и каркасом;
- прочность связи между прокладками;
- поверхностное электрическое сопротивление;
- время горения в пламени горелки.

Например, для лент типа 1.2ШТС (ТГ) и 2ШТС (ТГ) время горения одного образца с обкладкой не должно превышать 5 секунд, а шести образцов — 18 секунд.

Для производства трудногорючей ленты используют определенные материалы. Трудногорючесть материалов достигается за счёт использования специальных огнестойких компонентов и добавок — антипиренов. К таким компонентам относятся неорганические, элементоорганические или галогенсодержащие каучуки, которые обладают высокой энергией связи и требуют больших теплот затрат для разрушения [7,9].

Среди методов повышения огнестойкости резин выделяют:

- введение в состав полимера фосфора, что увеличивает долю эндотермического процесса (охлаждения материала) и способствует образованию прочного кокса;

- галогенирование (добавление атомов фтора, хлора, брома), которое понижает температуру пламени в газовом слое у поверхности эластомера и ингибирует воспламенение;
- сочетание галогенов (особенно брома) с фосфором или сурьмой, что оказывает синергическое действие на повышение огнестойкости.

Также используются негалогенированные огнестойкие материалы, например, комбинации меламин фосфата и меламин цианурата, которые обеспечивают высокие показатели огнестойкости.

При создании трудногорючих изделий могут применяться полиэфирные смолы, эпоксивинилэфирные смолы и гелькоуты на их основе в сочетании с огнезащитными добавками.

Одной из проблем является необходимость баланса между огнестойкостью и физико-механическими свойствами материалов. Добавление антипиренов может ухудшать пласто-эластические характеристики, прочность и другие параметры. Поэтому продолжают исследования по оптимизации составов и поиску синергетических эффектов между компонентами [9].

Трудногорючие ленты используются не только в горнодобывающей промышленности. Например, самоклеящиеся герметизирующие ленты применяются для герметизации и уплотнения транспортных средств. В электротехнической промышленности огнестойкие адгезивы и ленты используются в качестве изоляционных материалов [10].

Также разрабатываются новые технологии с применением трудногорючих материалов, например, огнестойкий филамент для 3D-печати на основе полипропилена с антипиреновыми добавками.



Рисунок 2 – Трудногорючая лента в рулоне на складе

Производство трудногорючих конвейерных лент регулируется

как российскими, так и международными стандартами.

В России требования к трудногорючести конвейерных лент закреплены, например, в следующих стандартах:

- ГОСТ Р 57032-2016 «Ленты конвейерные для угольных шахт. Технические условия». Стандарт устанавливает, что лента типа ШТС(ТГ) не воспламеняется при трении на барабане и не поддерживает горение вне пламени, соответствует нормам пожарной безопасности и пригодна для эксплуатации в условиях шахт.
- ГОСТ Р 56904-2016 «Ленты конвейерные резиноватросовые для горнодобывающей промышленности. Общие технические условия». Стандарт описывает требования к пожаробезопасности и искробезопасности трудногорючих лент [4].

На международном уровне трудногорючесть конвейерных лент регулирует, например, стандарт ISO 340, который определяет методы испытаний на огнестойкость и трудногорючесть. Соблюдение этих стандартов обязательно для компаний, работающих на международном рынке (ООО «РезиноМир», г.Москва)[1].

Трудногорючие ленты должны соответствовать строгим критериям:

1. Отсутствие воспламенения при трении на барабане. При испытании температура поверхности барабана не должна превышать:
  - 500 °C — для обычных лент;
  - 325 °C — для лент на поливинилхлоридной основе.
2. Кислородный индекс — не менее 30%.
3. Время самозатухания после воздействия пламени спиртовой горелки:
  - для образца с обкладками — не более 5 с;
  - для образца без обкладок — не более 15 с.
4. Отсутствие самостоятельного распространения пламени при испытаниях в модельных штольнях.

Обычные горючие ленты могут не соответствовать этим требованиям, что повышает риск возгорания.

Для оценки горючести ленты применяют несколько методов:

- Испытание трением на барабане — проверка устойчивости к воспламенению при механическом нагреве.
- Определение кислородного индекса — измерение минимального содержания кислорода в атмосфере, необходимого для поддержания горения.
- Испытание в пламени спиртовой горелки — оценка времени самозатухания.

- Испытания в модельных штольнях — моделирование условий подземной выработки, замер скорости распространения пламени и длины сгоревшего участка.

Проведя анализ из имеющихся в свободном доступе источников, можем полученные результаты свести в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика трудногорючих и обычных горючих лент

| Параметр                  | Трудногорючие ленты (ШТС(ТГ), Ш, ШМ)                | Обычные горючие ленты                                        |
|---------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Горючесть                 | Самозатухают после удаления источника огня          | Могут поддерживать горение                                   |
| Воспламеняемость          | Низкая                                              | Зависит от типа (от трудно- до легковоспламеняемых)          |
| Кислородный индекс        | $\geq 30\%$                                         | Обычно ниже 30%                                              |
| Температура воспламенения | Выше (до 500 °С при трении)                         | Ниже                                                         |
| Применение                | Шахты, рудники, опасные производства                | Общепромышленное использование                               |
| Стоимость                 | Выше из за специальных добавок                      | Ниже                                                         |
| Безопасность              | Высокая, снижает риск подземных пожаров             | Ниже, требует дополнительных мер защиты                      |
| Нормативная база          | ГОСТ 20-2018, ОСТ 153-12.2-001-97, ГОСТ 12.1.044-89 | Может соответствовать ГОСТ Р 57032-2016 без оценки горючести |

Также можем выделить преимущества и недостатки трудногорючих лент и обычных горючих (таблица 2).

Будущее трудногорючих лент связано с внедрением новых материалов и технологий производства. Перспективными направлениями являются разработка лент с улучшенными характеристиками трудногорючести, способных выдерживать высокие температуры и предотвращать распространение огня.

Таблица 2 – Преимущества и недостатки трудногорючих и обычных горючих лент.

| Лента           | Преимущества                                                                                                                                                                                         | Недостатки                                                                                                                                                   |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Трудногорючая   | высокая пожарная безопасность;<br>самозатухание снижает риск распространения огня;<br>соответствие строгим отраслевым стандартам для шахт и рудников;<br>минимизация токсичных выбросов при горении. | более высокая стоимость;<br>возможные сложности с сертификацией из-за противоречий в нормативах;<br>меньшая гибкость в некоторых типах конструкций           |
| Обычная горючая | низкая цена;<br>широкий выбор модификаций для разных задач                                                                                                                                           | высокий риск возгорания при трении или контакте с огнём;<br>необходимость дополнительных систем пожаротушения;<br>опасность токсичных выделений при горении. |

Применение трудногорючих конвейерных лент является целесообразным и экономически оправданным решением для предприятий с повышенными требованиями к пожарной безопасности. Несмотря на более высокую стоимость, такие ленты:

- существенно снижают риск возникновения и распространения пожаров;
- обеспечивают соответствие нормативным требованиям;
- уменьшают долгосрочные затраты на ремонт и восстановление после аварий.

Таким образом, исследования в области трудногорючих лент охватывают как фундаментальные аспекты создания огнестойких материалов, так и их практическое применение в различных отраслях. Особое внимание уделяется повышению безопасности в условиях повышенного риска возгорания, например, в шахтах и на промышленных объектах. Их применение регулируется строгими нормативными документами, а развитие технологий в этой области продолжает совершенствоваться.

#### Перечень ссылок

1. Электронный ресурс. URL: <https://rti-land.ru/> «РезиноМир» – надежный

поставщик резинотехнических изделий и промышленных комплектующих с 2005 года. (Дата обращения 11.04.2026 г.)

2. Мищенко, Т.П. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТРУДНОГОРЮЧЕЙ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ В УСЛОВИЯХ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ НА РОЛИКООПОРАХ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА / Т.П.Мищенко/ Материалы международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта : проблемы и пути развития», 17-19 октября 2018 г., г. Петропавловск-Камчатский – КГТУ, 2018 – 5 с.

3. Анализ текущего состояния пожароопасности конвейерных лент для угольных шахт / Л. С. Беляева, А. В. Бондаренко, И. Н. Непочатых, Е. Н. Пастернак // Горноспасательное дело. – 2014. – № 1(51). – С. 116-125. – EDN WAEVVL.

4. База ГОСТ, ГОСТ Р – национальные стандарты РФ. Электронный ресурс. URL: <https://rosgosts.ru/> (дата обращения 15.03.2026 г.)

5. Электронный ресурс. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-pozharnoy-bezopasnosti-lentochnyh-konveyerov> / В.М. Юрченко, К ВОПРОСУ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ. – 11 с.

6. Мищенко, Т.П. Анализ процесса нагрева трудногорючей многослойной в аварийном режиме на концевом барабане шахтного ленточного конвейера / Т.П. Мищенко // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», 22-25 мая 2018 года, Донецк - ГОУ ВПО «ДонНТУ» - МОН ДНР 2018 – с.42-46.

7. Рецептурные приемы создания эластомерных композиций с пониженной горючестью / А. И. Потапова, И. И. Боброва, А. А. Евдокимов, М. А. Венедиктова. // Научно-технический журнал "ТРУДЫ ВИАМ" ISSN: 2307-6046, 2024, №1. ФГУП «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ» НИЦ «Курчатовский институт». ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. Текст : электронный URL: [https://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=2122](https://viam-works.ru/ru/articles?art_id=2122) (дата обращения: 21.03.2026).

8. Электронный ресурс. URL : <https://arlite.ru/> ООО "ЭРЛАЙТ", конвейерная лента и транспортерная лента от производителя, производство и продажа, Донецк, ДНР, ЛНР, Россия [Сайт] (дата обращения 11.04.2026 г.)

9. Эластомерно-тканевые материалы для изделий специальной техники (обзор) / А. М. Чайкун, А. В. Сергеев, Е. С. Правада // Научно-технический журнал "ТРУДЫ ВИАМ" ISSN: 2307-6046, 2023, №6. ФГУП «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ» НИЦ «Курчатовский институт». ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. Текст : электронный URL: [https://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=2122](https://viam-works.ru/ru/articles?art_id=2122) (дата обращения: 25.03.2026).

10. Электронный ресурс. URL: <https://butlerov.com/> "НОВЫЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА, СТРОЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ". Англо-русскоязычный научный химический журнал «Бутлеровские сообщения» (дата обращения 15.04.2026 г.)

УДК 621.45

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ВЕРТОЛЕТНЫХ ГТД

В. Ю. Глушко

ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,  
г. Донецк, ДНР

**Аннотация.** Рассмотрены современные технологии восстановления лопаток турбин вертолётных ГТД, эксплуатирующихся в условиях запыленности, вибраций и термоциклирования. Проанализированы преимущества и ограничения методов HVOF/HVAF-напыления, лазерной наплавки (LMD/DED) и прецизионной TIG-сварки.

**Abstract.** A review of modern restoration methods for helicopter GTE turbine blades: HVOF/HVAF spraying, laser metal deposition (LMD/DED), precision TIG welding. The effectiveness of their combined use for ensuring residual service life while reducing repair costs is demonstrated.

**Ключевые слова:** ГТД, лопатка, восстановление, наплавка, жаропрочные сплавы, защитные покрытия.

**Keywords:** GTE, blade, restoration, metal deposition, heat-resistant alloys, protective coats.

Газотурбинные двигатели (ГТД) – это сложнейшие и критически важные агрегаты, чье надежное функционирование определяет безопасность и эффективность вертолетной авиации. Главная часть любого ГТД – его турбинная ступень, где рабочие и сопловые лопатки подвергаются экстремальным механическим, термическим и коррозионно-эрозионным нагрузкам. Особенности эксплуатации вертолетов – работа в условиях интенсивной запыленности, частые переходные режимы, включая висение («малый газ»), и высокие вибрационные воздействия – делают лопатки их двигателей особенно уязвимыми к повреждениям: эрозии кромок, коррозии, забоинам, трещинам и деформациям.

Полная замена поврежденных лопаток новыми – дорогостоящее решение, учитывая высокую стоимость самих изделий из жаропрочных никелевых и титановых сплавов, а также сложность их изготовления. Поэтому восстановление и ремонт лопаток являются не просто экономически оправданной, но и стратегически необходимой практикой в обслуживании вертолетных ГТД.

Качественное восстановление позволяет существенно продлить ресурс дорогостоящих компонентов, снизить эксплуатационные затраты авиакомпаний и операторов, обеспечить своевременное возвращение техники в строй и, что самое главное, гарантировать требуемый уровень безопасности полетов.

Однако успешность ремонтного цикла напрямую зависит от применяемых технологий восстановления. Традиционные методы, такие как ручная аргодуговая сварка (TIG), все чаще уступают место современным, высокоточным и ресурсосберегающим технологиям. Лазерная наплавка (LMD/DED), высокоскоростное газопламенное (HVOF/HVAF) и холодное газодинамическое (CGDS) напыление, автоматизированные роботизированные комплексы – эти и другие инновационные подходы открывают новые возможности для восстановления геометрии, свойств материала и защитных покрытий лопаток со сложной аэродинамической поверхностью.

Цель данной статьи – провести обзор современных методов восстановления лопаток турбин вертолетных ГТД. Рассмотрены ключевые технологии, их физические принципы, преимущества и ограничения, специфику применения к различным типам повреждений и материалам, а также факторы, определяющие их экономическую эффективность и соответствие строгим требованиям авиационных регуляторов. Понимание этих аспектов критически важно для выбора оптимальной стратегии ремонта, обеспечивающей максимальный остаточный ресурс и надежность лопаток в жестких условиях вертолетной эксплуатации.

Экстремальные условия эксплуатации вертолетных газотурбинных двигателей – интенсивная запыленность, значительные вибрационные нагрузки, частые переходы на режим малого газа и термоциклирование – предъявляют высочайшие требования к надежности турбинных лопаток и неизбежно приводят к их повреждениям. Наиболее характерными являются эрозия передней и задней кромок абразивными частицами, забоины, термомеханические усталостные трещины, коррозионное поражение и деформации полотна. Полная замена таких дорогостоящих компонентов, изготовленных из сложнолегированных жаропрочных никелевых или титановых сплавов, экономически нецелесообразна, что делает восстановление и ремонт стратегически важной задачей для поддержания парка вертолетов в летной годности. Современные технологии восстановления направлены не только на возвращение геометрии, но и на обеспечение остаточного ресурса, сопоставимого с новыми деталями, при строгом соблюдении требований к

балансировке и массе.

Одним из наиболее востребованных классов методов для борьбы с эрозией и восстановления кромок является газотермическое напыление (ГТН). Принцип этих технологий заключается в ускорении и нагреве частиц порошкового материала (металлов, керметов, керамик) газовым потоком с последующим осаждением их на подготовленную поверхность лопатки. Среди них особое место занимает высокоскоростное кислородно-топливное напыление (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel) и его разновидность с использованием воздуха (HVAF – High Velocity Air Fuel). Эти методы обеспечивают исключительно высокую скорость частиц (800-1200 м/с) и умеренную температуру их нагрева. Результатом являются покрытия с минимальной пористостью, высокой плотностью, отличной адгезией к подложке и низким содержанием оксидов [1]. Для восстановления эродированных кромок лопаток вертолетных ГТД, особенно подверженных воздействию песка и пыли, широко применяются керметные порошки на основе карбида вольфрама в кобальтовой или хром-кобальтовой матрице (WC-Co, WC-CoCr). Получаемые покрытия обладают выдающейся твердостью и стойкостью к абразивному износу, что критически важно в условиях внеаэродромной эксплуатации вертолетов. Ключевыми преимуществами HVOF/HVAF для ремонта лопаток являются минимальное тепловложение в основной материал, практически отсутствующая зона термического влияния (ЗТВ), что сохраняет структуру и свойства чувствительных никелевых суперсплавов, а также возможность точного контроля толщины напыляемого слоя. Плазменное напыление, использующее в качестве источника тепла сжатую электрическую дугу (плазму), также остается актуальным методом, особенно для нанесения жаростойких покрытий типа MCrAlY (где M – Ni, Co или их комбинация) после ремонта или для восстановления термобарьерных покрытий (ТБС) [2]. Однако для задач восстановления размеров эродированных кромок HVOF/HVAF часто предпочтительнее из-за более высоких характеристик напыляемых керметов.

Помимо газотермических методов, революционные возможности для восстановления лопаток открывают лазерные аддитивные технологии, в частности, лазерная наплавка (Laser Metal Deposition, LMD), также известная как Direct Energy Deposition (DED). Этот метод использует сфокусированный лазерный луч для создания локальной зоны расплава на поверхности детали, в которую одновременно подается металлический порошок или проволока.

Материал расплавляется и формирует наплавленный валик, точно следующий траектории лазерной головки, управляемой ЧПУ или роботом. Для восстановления лопаток турбин ГТД LMD обладает уникальными преимуществами. Во-первых, это высочайшая точность и управляемость процессом, позволяющая восстанавливать сложные контуры кромок, законцовок и даже локальных сколов с минимальным припуском на последующую механическую обработку. Во-вторых, лазер обеспечивает концентрированный нагрев и высокую скорость охлаждения, что приводит к формированию мелкозернистой структуры в наплавке и узкой ЗТВ в основном металле, минимизируя риски пережога и коробления чувствительных жаропрочных сплавов. В-третьих, возможно использование порошков, химический состав которых максимально близок к материалу восстанавливаемой лопатки (например, сплавы системы Ni-Cr), обеспечивая высокую совместимость по механическим и коррозионным свойствам [3]. Автоматизация процесса с помощью роботизированных комплексов гарантирует стабильное качество и повторяемость, что крайне важно для требовательной авиационной отрасли. LMD особенно эффективен для восстановления значительных объемов материала, например, сильно эродированных задних кромок или поврежденных верхушек лопаток.

Еще более точным и универсальным методом локального восстановления, особенно для уникальных, дорогих лопаток или устранения глубоких дефектов типа трещин, является аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (Tungsten Inert Gas, TIG) в ее современном, высокотехнологичном исполнении. Хотя TIG относится к более традиционным методам, ее потенциал раскрывается при использовании импульсных источников тока, микросварки и прецизионной подачи присадочной проволоки. Для ремонта лопаток из никелевых суперсплавов критически важно использование импульсного режима: короткие мощные импульсы обеспечивают глубокое проплавление с минимальным общим нагревом, а паузы между ними позволяют металлу остыть, снижая риск образования горячих трещин и коробления [4]. Современные установки TIG с ЧПУ и роботизированными манипуляторами позволяют с высочайшей точностью воспроизводить сложные траектории швов, необходимые для заварки трещин в корневых частях, ремонте замков крепления или восстановлении небольших сколов на полотне лопатки. Обязательным условием успешного применения TIG для ремонта критичных деталей ГТД является последующая термообработка (отпуск, старение) для снятия

сварочных напряжений и стабилизации структуры материала в зоне шва и ЗТВ. Несмотря на появление новых технологий, прецизионная импульсная TIG-сварка остается незаменимым инструментом в арсенале ремонтных предприятий для решения специфических задач восстановления лопаток, требующих ювелирной точности.

Неотъемлемой частью современного ремонтного цикла лопаток, напрямую влияющей на их остаточный ресурс и надежность, являются термическая обработка и нанесение функциональных покрытий. После операций наплавки или сварки детали обязательно подвергаются термообработке. Цели термообработки многообразны: снятие остаточных напряжений, гомогенизация структуры в зоне ремонта, растворение нежелательных фаз, выделившихся при нагреве, и, в случае упрочняемых сплавов, проведение старения для выделения упрочняющих фаз. Конкретные режимы (температура, время выдержки, скорость нагрева и охлаждения) строго регламентированы технологической документацией на ремонт конкретного типа лопатки и сплава и направлены на восстановление оптимального комплекса механических свойств (прочность, пластичность, сопротивление усталости и ползучести). Не менее важным этапом является восстановление защитных покрытий. Для рабочих лопаток турбины это, прежде всего, жаростойкие покрытия (MCrAlY), наносимые преимущественно методом вакуумного плазменного напыления (VPS – Vacuum Plasma Spraying) или электронно-лучевого физического осаждения из паровой фазы (EB-PVD) [3]. Эти покрытия защищают материал лопатки от высокотемпературной коррозии и окисления. Для вертолетных двигателей, работающих в условиях абразивного износа, критическое значение имеет также восстановление эрозионно-стойких покрытий на передних кромках рабочих и сопловых лопаток. Здесь наиболее эффективны покрытия на основе карбидов (WC-CoCr), наносимые методами HVOF/HVAF, как наиболее стойкие к удару твердых частиц [3]. Контроль качества нанесенных покрытий (толщина, адгезия, структура) осуществляется в соответствии с жесткими авиационными стандартами.

Выбор конкретного метода или комбинации методов восстановления лопатки вертолетного ГТД является сложной инженерной задачей. Он зависит от типа лопатки, характера и локализации повреждения (эрозия кромки, трещина в корне, деформация полотна), материала лопатки, требований к остаточному ресурсу и, экономической эффективности. Современные технологии, такие как высокоскоростное газопламенное напыление и лазерная наплавка, дополненные прецизионной сваркой и пост-ремонтной термообработкой и нанесением защитных покрытий, позволяют возвращать в строй поврежденные лопатки, обеспечивая необходимый уровень надежности и безопасности для

специфических условий вертолетной эксплуатации.

**Перечень ссылок**

1. Рахадиллов, Б. К. Применение технологии HVOF для получения износостойких покрытий на основе WC - обзор / Б. К. Рахадиллов, Н. Муктанова, Л. Г. Журерова // Вестник НЯЦ РК. – 2023. – № 1. – С. 4-14. – DOI 10.52676/1729-7885-2023-1-4-14. – EDN PQZQFO.
2. В. А. Барвинок, В. И. Богданович, Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. – М.:Машиностроение, 1999. – 309 с.: ил.
3. Кондрашин, А. А. Аддитивные технологии для формирования объемных металлических структур / А. А. Кондрашин, А. Н. Лямин, В. В. Слепцов // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. – 2019. – Т. 11, № 4. – С. 5-12. – DOI 10.18127/j22250980-201904-01. – EDN WYIUWB.
4. Бахматов, П. В. Исследование влияния техники манипулирования рабочим торцом электрода при TIG сварке на качество формирования шва / П. В. Бахматов, А. В. Фролов, А. С. Кравченко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2021. – № 3(51). – С. 90-94. – DOI 10.17084/20764359-2021-51-90. – EDN AJMALF.

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

## ОСОБЕННОСТИ РЕМОНТА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

А. Н. Михайлов, Д. О. Киселица, Д. В. Огренич, Д. С. Жарких  
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк, ДНР, РФ

**Аннотация.** В работе рассмотрены особенности ремонта лопаток компрессора газотурбинных двигателей с применением отделочно-упрочняющей обработки. Применение отделочно-упрочняющей обработки позволяет улучшить качество поверхностного слоя, снизить шероховатость, повысить твердость, сформировать благоприятные остаточные напряжения сжатия и увеличить сопротивление усталостному разрушению. Рассмотрены основные методы отделочно-упрочняющей обработки, их влияние на эксплуатационные характеристики восстановленных лопаток.

**Annotation.** The paper discusses the features of repairing the compressor blades of gas turbine engines using finishing and hardening treatment. The use of finishing and hardening treatment improves the quality of the surface layer, reduces roughness, increases hardness, forms favorable residual compressive stresses, and increases resistance to fatigue fracture. The paper examines the main methods of finishing and hardening treatment and their impact on the performance of the repaired blades.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, лопатки компрессора, ремонт лопаток, отделочно-упрочняющая обработка, поверхностный слой, эрозионный износ.

**Keywords:** gas turbine engine, compressor blades, blade repair, finishing and hardening treatment, surface layer, erosion wear.

Газотурбинные двигатели широко применяются в авиационной, энергетической и транспортной отраслях благодаря высокой удельной мощности, надежности и эффективности. Одними из наиболее нагруженных элементов конструкции ГТД являются лопатки компрессора, которые в процессе эксплуатации подвергаются воздействию значительных аэродинамических, механических и температурных нагрузок. Работа в сложных условиях приводит к постепенному ухудшению состояния поверхности и материала деталей, появлению различных дефектов и снижению их эксплуатационной надежности [1].

Наиболее распространенными повреждениями лопаток компрессора являются эрозионный износ кромок, царапины, забоины, трещины, деформации и усталостные повреждения. Наличие таких дефектов ухудшает аэродинамические характеристики компрессора, снижает коэффициент полезного действия двигателя и может стать причиной серьезных отказов. В связи с этим своевременный и качественный ремонт лопаток является важной задачей технического обслуживания и восстановления работоспособности газотурбинных двигателей.

Современные технологии ремонта предусматривают комплекс операций, включающий дефектацию, восстановление геометрических размеров, механическую обработку и последующее улучшение свойств поверхностного слоя лопатки. Особое значение при этом приобретает отделочно-упрочняющая обработка, поскольку именно состояние поверхностного слоя в значительной степени определяет долговечность и надежность работы лопаток. Данный вид обработки способствует формированию упрочнённого слоя с повышенными механическими характеристиками, уменьшению шероховатости поверхности и созданию остаточных напряжений сжатия, препятствующих развитию усталостных трещин [2].

Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения ресурса газотурбинных двигателей, сокращения затрат на техническое обслуживание и увеличение срока службы дорогостоящих деталей. Использование отделочно-упрочняющей обработки в процессе ремонта лопаток компрессора позволяет восстановить геометрию и обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики лопатки.

Цель работы – повышение эксплуатационных свойств лопаток компрессора ГТД посредством технологического обеспечения синтеза рациональной структуры технологического процесса ремонта и восстановления.

Для достижения данной цели необходимо решение следующих задач: выполнить анализ особенностей действия неравномерных воздействий на лопатки в процессе их эксплуатации, провести исследование существующих методов повышения ресурса лопаток, разработать структуру технологического процесса ремонта применяя отделочно-упрочняющую обработку (ОУО).

Лопатки компрессора являются важными элементами газотурбинного двигателя, обеспечивающими сжатие воздуха и его подачу в камеру сгорания. В процессе эксплуатации они работают в сложных условиях, подвергаясь воздействию значительных

аэродинамических нагрузок, вибрации, перепадов температур и влиянию внешней среды. Длительное действие этих факторов приводит к постепенному изменению состояния поверхности и структуры материала, что вызывает износ деталей и ухудшение их эксплуатационных характеристик.

Износ лопаток компрессора представляет собой процесс постепенного разрушения или изменения поверхностного слоя материала под воздействием различных факторов. Наиболее интенсивному изнашиванию обычно подвергаются входные ступени компрессора, поскольку они непосредственно контактируют с воздушным потоком, содержащим пыль, песок, мелкие твердые частицы, капли влаги и другие загрязнения. При столкновении таких частиц с поверхностью лопаток происходит механическое повреждение материала, приводящее к изменению геометрических параметров деталей.

Одним из наиболее распространённых видов повреждений является эрозионный износ (рисунок 1), возникающий в результате воздействия твердых частиц, движущихся с высокой скоростью. Наиболее часто повреждаются входные и выходные кромки лопаток, где появляются микроповреждения, царапины, углубления и участки локального разрушения материала. Со временем такие дефекты могут увеличиваться и приводить к изменению профиля лопатки [1].

Существенное влияние на долговечность деталей оказывает усталостный износ. Во время работы двигателя лопатки испытывают переменные нагрузки, вызванные вращением ротора, вибрациями и изменением режимов работы. Под действием циклических напряжений в материале постепенно накапливаются повреждения, которые со временем могут привести к образованию микротрещин и последующему разрушению детали [3].



Рисунок 1. а – износ рабочей лопатки компрессора, б –  
неравномерный абразивно-эрозионный износ направляющего  
аппарата лопаток компрессора

Появление износа приводит к ухудшению аэродинамических характеристик компрессора, снижению эффективности сжатия воздуха и уменьшению коэффициента полезного действия двигателя. Кроме того, изменение геометрии лопаток может стать причиной нарушения устойчивости работы компрессора и возникновения опасных режимов эксплуатации. Поэтому своевременное выявление дефектов и проведение ремонтно-восстановительных работ являются важными условиями обеспечения надёжной и безопасной эксплуатации газотурбинных двигателей.

Анализируя сущность абразивно-эрозионного износа позволяет сделать вывод о том, что данный процесс протекает неравномерно по поверхности лопаток компрессора газотурбинного двигателя. Характер распределения износа определяется совокупностью факторов, включая условия взаимодействия абразивных частиц с поверхностью материала, локальные аэродинамические особенности потока и конструктивные параметры лопаток.

Материал изготовления лопаток компрессора – титановые сплавы  $\alpha+\beta$  (BT6, BT3-1, BT8, BT8M).

Анализ существующих методов повышения ресурса лопаток компрессора ГТД показал, что наиболее рациональными являются комплексные технологии ремонта и восстановления, сочетающие механическую обработку, восстановление геометрии, нанесение защитных покрытий и отделочно-упрочняющую обработку. В современных технологических процессах широко применяются операции наплавки повреждённых участков, вакуумного отжига, шлифования, полирования и глянцеования, обеспечивающие восстановление геометрических параметров и снижение шероховатости поверхности.

На рисунке 2 представлена структура технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора газотурбинного двигателя. Процесс начинается с проведения входного контроля, осмотра и дефектации лопаток, в ходе которых определяются характер, локализация и степень повреждений рабочих поверхностей. По результатам дефектации производится сортировка деталей и принимается решение о возможности их дальнейшего восстановления. Далее производится очистка лопаток от продуктов коррозии, эрозионного износа, нагара и остатков ранее нанесённых защитных покрытий. Для повышения качества очистки могут применяться абразивно-струйная обработка и ультразвуковая очистка.

Следующим этапом после подготовки поверхности является

восстановление повреждённых участков методом наплавки с подбором соответствующего присадочного материала [4] и технологического режима. Для снятия внутренних напряжений, возникающих после наплавки, проводится термическая обработка в виде вакуумного отжига.

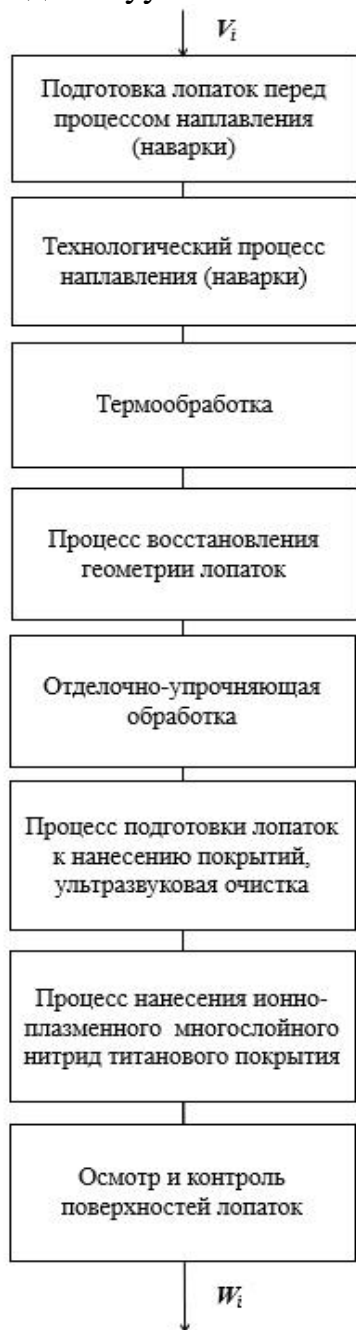


Рисунок 2. Структура технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора ГТД

После восстановления геометрии выполняется механическая обработка, включающая фрезерование и шлифование, обеспечивающие удаление излишков наплавленного металла и формирование профиля лопатки, максимально приближенного к номинальному. Далее производится полирование рабочих поверхностей для снижения шероховатости, устранения микродефектов и повышения качества поверхностного слоя. После контроля отсутствия прижогов методом травления выполняется операция глянцеваания, позволяющая получить шероховатость поверхности порядка  $Ra = 0,2-0,3$  мкм.

После механической доводки и контроля геометрических параметров лопатки подвергаются травлению и безразмерному полированию методом виброабразивной обработки. Данный метод обеспечивает снижение шероховатости поверхности и упрочнение поверхностного слоя за счёт воздействия абразивных гранул и металлических шариков, перемещающихся относительно детали под действием вибраций. Регулирование частоты и амплитуды колебаний, а также параметров рабочей среды позволяет изменять интенсивность съёма материала и степень упрочнения поверхности. Для обработки лопаток применяются радиальные вибраторы [5] торового типа, обеспечивающие циркуляционное движение деталей и рабочей среды в камере. Последовательная обработка гранулами

различной зернистости и металлическими шариками позволяет уменьшить шероховатость поверхности до  $Ra\ 0,16\text{--}0,32\ \mu\text{м}$ . Применение отделочно-упрочняющей обработки способствует формированию благоприятных остаточных напряжений сжатия, повышению твёрдости поверхностного слоя и увеличению сопротивления усталостному разрушению.

Завершающими этапами являются подготовка поверхности к нанесению защитного покрытия, ультразвуковая очистка, нанесение многослойного нитрид-титанового покрытия ионно-плазменным методом. На заключительном этапе выполняется контроль качества восстановленных лопаток, включающий проверку геометрических параметров, шероховатости поверхности и отсутствия дефектов после ремонта.

### **Выводы**

В результате выполненной работы рассмотрены основные виды повреждений лопаток компрессора ГТД в процессе эксплуатации. Проведён анализ современных методов ремонта и восстановления, на основании которого разработана рациональная структура технологического процесса с применением отделочно-упрочняющей обработки. Установлено, что применение виброабразивного полирования, глянцевого и нанесения нитрид-титанового покрытия позволяет повысить качество поверхностного слоя и эксплуатационные характеристики.

### **Перечень ссылок**

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора : монография. В 2 частях. Ч. 1 / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк [и др.]. – Запорожье : Мотор Сич, 2003. – 396 с.
2. Богуслаев, А. В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей / А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник [и др.] ; под редакцией Д. В. Павленко, С. А. Субботина. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2009. – 468 с.
3. Петухов, А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД / А. Н. Петухов. – Москва : Машиностроение, 1993. – 332 с.
4. Михайлов, А. Н. Основные особенности синтеза технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора ГТД / А. Н. Михайлов, Д. В. Огренич // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2024. – № 4(87). – С. 54-62. – EDN GMLYIP.
5. Полетаев, В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В. А. Полетаев. – Москва : Машиностроение, 2006. – 256 с. – (Библиотека технолога).