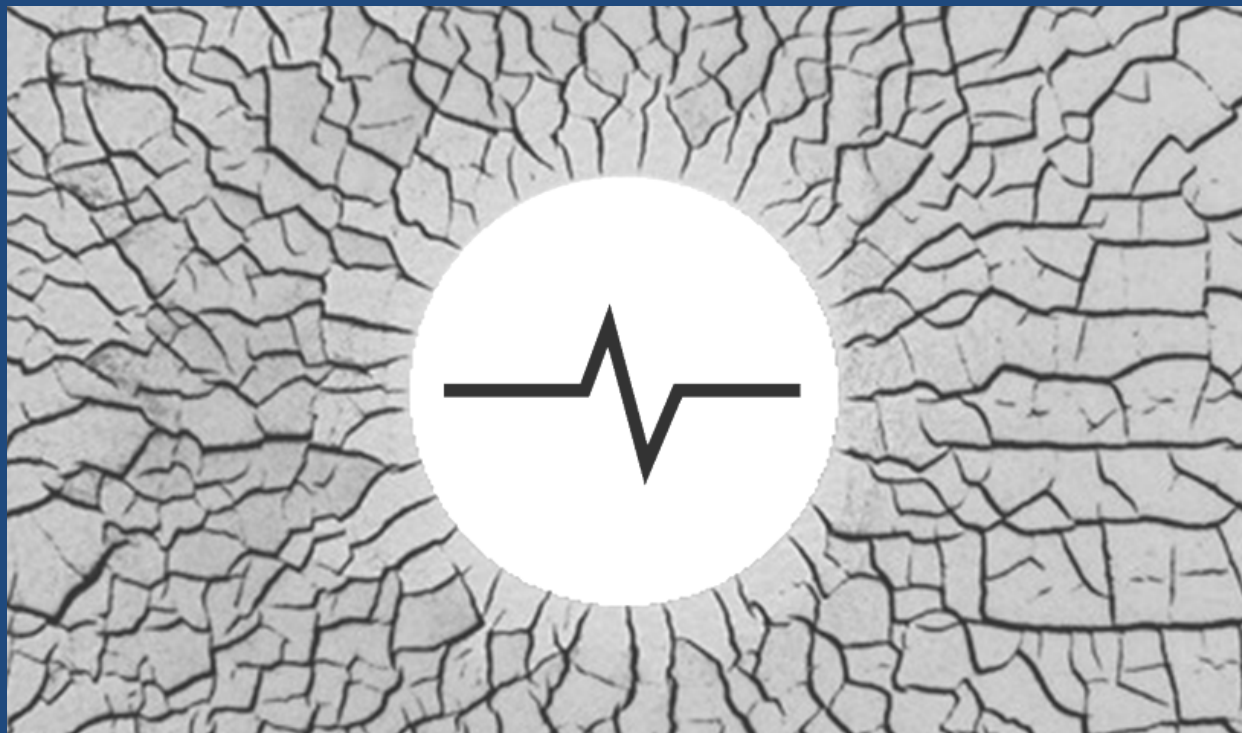




Сибирский государственный университет  
науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

# ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



КРАСНОЯРСК 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева

# **ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**

*Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции  
(27–28 февраля 2025 г., Красноярск)*

Электронное издание

Красноярск 2025

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2025

УДК 629.7  
ББК 39.5  
И88

**Редакционная коллегия:**

В. Ю. ЖУРАВЛЕВ, Г. М. ГРИНБЕРГ, Е. В. СУТАК, А. В. ГИРН

**Под общей редакцией**

кандидата технических наук, профессора В. П. НАЗАРОВА

**Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика** [Электронный И88 ресурс] : сб. материалов VII Всерос. науч.-практ. конф. (27–28 февраля 2025 г., Красноярск). – Электрон. текстовые дан. (1 файл, 7,47 МБ). – Систем. требования: Internet Explorer; Acrobat Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата .pdf) / под общ. ред. В. П. Назарова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2025. – Режим доступа: <https://www.sibsau.ru/scientific-publication/>, свободный. – Загл. с экрана.

Представлены результаты научных исследований студентов, аспирантов и специалистов высших учебных заведений, НИИ, промышленных предприятий аэрокосмического комплекса региона по приоритетным направлениям отраслей науки и производства. Рассмотрены теоретические и прикладные вопросы разработки и использования современных технологий испытаний и диагностики оборудования и сооружений. Описаны проблемы и указаны пути их решения в области обеспечения надежности и безопасности конструкций.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов и специалистов, работающих в области надежности и диагностике изделий.

**УДК 629.7  
ББК 39.5**

---

Подписано к использованию:  
01.04.2025. Объем 7,47 МБ.

Макет и компьютерная верстка *В.Ю. Журавлева*.

СибГУ им. М. Ф. Решетнева.  
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| От редакционной коллегии ..... | 6 |
|--------------------------------|---|

### *Секция*

#### **«Современные методы испытаний и диагностики изделий»**

|                                                                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Кононович Д. О. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ .....</b>                                           | <b>8</b>  |
| <b>Коркин Ю. Н., Носов Д. С., Белан В. М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D ПЕЧАТИ .....</b> | <b>14</b> |
| <b>Поспелов А. А. КОНТРОЛЬ СПЛОШНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СМЕСИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ.....</b>                       | <b>23</b> |
| <b>Раткин Ф.А. КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА .....</b>                                                                      | <b>27</b> |
| <b>Татычев В. А. , Редько А.С. , Журавлев В.Ю. КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ В ИЗДЕЛИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ .....</b>              | <b>32</b> |
| <b>Школьников Л.Д. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ..</b>                        | <b>37</b> |
| <b>Панасенко В. Ю. ИСПЫТАНИЕ ЛОПАТОК ТУРБИН НА ВИБРОПРОЧНОСТЬ И ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ .....</b>                                         | <b>41</b> |
| <b>Шестаков И.Я., Ходенков С.А., Тимофеев Е.Н., Шестаков В.И. БЕЗНАСОСНЫЙ СПОСОБ ГИДРОИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ .....</b>              | <b>48</b> |
| <b>Шестаков И.Я., Шестаков В.И., Тимофеев Е.Н. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАРОК МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....</b>                | <b>50</b> |

### *Секция*

#### **«Контроль и диагностика технологических процессов машиностроения»**

|                                                                                                                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Амельченко Н.А., Черкасов Л.Е., Раменская Е.В., Фадеев А.А., Янковская Н.Ф. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВАФЕЛЬНОГО ФОНА.....</b> | <b>53</b> |
| <b>Кишкин А. А., Шевченко Ю. Н., Делков А. В. СОДЕРЖАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ.....</b>                              | <b>59</b> |
| <b>Литовка О. В., Левко В. А. СПЕЦИФИКА ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ .....</b>                                                                 | <b>64</b> |
| <b>Матвиенко В. И. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРАКТИК ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПОСТОБРАБОТКОЙ.....</b>                   | <b>69</b> |

|                                                                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Петецкая А. Е. ОБРАБОТКА АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ НЕТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТИПА ОТВЕРСТИЕ МАЛОГО РАЗМЕРА .....</b>                                                                      | <b>73</b>  |
| <b>Причина А. С. ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕДНЫХ ВОЛНОВОДОВ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ 3D ПЕЧАТИ И ГАЛЬВАНОПЛАСТИКИ .....</b>                                                               | <b>80</b>  |
| <b>Сысоева Л. П., Левко В. А. ОСОБЕННОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОТОКОМ ШАРИКОВ .....</b>                                                        | <b>85</b>  |
| <b>Тимошева А.Ю., Орешкин Д.И., Гирн А.В., Савельев Д.О., Раводина Д.В. ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ .....</b>                                  | <b>89</b>  |
| <b>Шевченко Ю. Н., Делков, А. В., Кишкин А. А. ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ ПОДВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ МИКРОТУРБИНЫ .....</b> | <b>95</b>  |
| <b>Черкасов А.С. СРАВНЕНИЯ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ФОРМ ИЗДЕЛИЙ.....</b>                                                                                                                        | <b>102</b> |
| <b>Черкасов Л. Е., Боженкова А. Ю. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ С ВАФЕЛЬНЫМ ФОНОМ .....</b>                                                              | <b>107</b> |

#### *Секция*

#### **«Испытания, контроль, надежность систем автоматического управления»**

|                                                                                                                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Андреев В.Д., Чубарь А. В. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УДАРНЫМ СТЕНДОМ.....</b>                                                                                                           | <b>113</b> |
| <b>Нехаев Е.А., Гринберг Г.М. КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ЗА ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ НА КОСМОДРОМЕ .....</b>                            | <b>121</b> |
| <b>Рыжков А.Н. БОРТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА МОДЕЛЬНЫХ РАКЕТ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ .....</b>                                                                                                      | <b>132</b> |
| <b>Самохов Д.А. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТАМИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА .....</b>                                                                                 | <b>135</b> |
| <b>Е.А. Голубев, А.Д. Мартыненко, Г.Л. Редкоус, И.Е. Бородин, К.О. Фаилов СТЕНД ДЛЯ СНЯТИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕЕБЕКА .....</b>                                            | <b>142</b> |
| <b>Журавлев И.М., Струговец А.Г. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ .....</b> | <b>146</b> |
| <b>Нечепуренко В.М., Гринберг Г.М. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА БОРТОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ СБОРОК СТУДЕНТАМИ .....</b>                                                                               | <b>151</b> |

*Секция*  
**«Контроль и испытания ракетно-космической техники»**

|                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Руденко М.С., Гирн А.В., Михеев А.Е., Орешкин Д.И., Тимошева А.Ю.</b><br>ИСПЫТАНИЕ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ<br>КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ВИДЕ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ.....                                                                                                  | 155 |
| <b>Евтифьев М. Д.</b> ИЗ ОПЫТА НАЗЕМНОЙ ПОДГОТОВКИ СИСТЕМ<br>ВЗАИМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ «КУРС» КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ К ПОЛЕТУ ....                                                                                                                                             | 160 |
| <b>Крашенинникова О. В., Сидоров В.Г.</b> ИСПЫТАНИЯ ГАЗОВЫХ РУЛЕЙ.....                                                                                                                                                                                                | 167 |
| <b>Рутковская М.А., Лопатин А.В.</b> МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПОЗИТНОЙ<br>СПИЦЫ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ ЗОНТИЧНОЙ АНТЕННЫ<br>КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....                                                                                                                           | 171 |
| <b>Манохина Э.С., Рейфшнейдер Д.П., Албычаков А.А., Раменский Б.А.,<br/>Иванов А.С.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЯ<br>ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ<br>С РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДАМИ<br>АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ..... | 174 |
| <b>Крашенинникова О. В.</b> ИСПЫТАНИЯ ПРОПЕЛЛЕРА<br>ДЛЯ ХВОСТОВОЙ ЧАСТИ РАКЕТЫ .....                                                                                                                                                                                  | 182 |
| <b>Смирнов Е. Е.</b> РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАКЕТЫ<br>С ПАССИВНОЙ СИСТЕМОЙ СПАСЕНИЯ .....                                                                                                                                                                                  | 186 |
| <b>Черненко В.В., Черненко Д.В.</b> МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОГО<br>РАБОЧЕГО ТЕЛА В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ<br>МАЛОРАСХОДНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ .....                                                                                                            | 189 |
| <b>Наумов К. В., Файзуллин Р. Р., Матвеев М. В., Васильева Д. А., Рябков Д. В.</b><br>ВЫБОР И ДИАГНОСТИКА ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ<br>ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ СВОДА МАЛЫХ<br>КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ .....                                          | 195 |
| <b>Назаров В. П., Наумов К. В., Васильева Д. А., Рябков Д. В.</b> КОНТРОЛЬ<br>КАЧЕСТВА И ИСПЫТАНИЯ ТОРМОЗНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ,<br>ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ .....                                                                                | 199 |
| <b>Шестерня В.И., Хоменко В.О., Троцкий Д.А., Захарова Е.Е.</b> РАЗРАБОТКА<br>КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ-ДЕМОНСТРАТОРА<br>ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ<br>СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ.....                                                              | 205 |
| <b>Назаров В.П., Шестерня В.И., Хоменко В.О., Троцкий Д.А., Захарова Е.Е.</b><br>МЕТОДИКА РАСЧЕТА АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ<br>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО<br>ДВИГАТЕЛЯ-ДЕМОНСТРАТОРА.....                                                            | 210 |
| <b>И.А. Максимов, С.Г. Кочура, В.Г. Сомов, С.А. Ходенков, Д.О. Малышев,<br/>А.А. Демичева</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ<br>ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОНСТРУКЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО<br>АППАРАТА.....                                                | 216 |

## ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Перед Вами шестой сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции **«Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика»**.

Конференция проводится для студентов, аспирантов и специалистов предприятий и организаций, высших учебных и научно-исследовательских заведений, дает им возможность представить свои разработки, результаты исследований. Конференция – это замечательная возможность общения высококвалифицированных специалистов с новым кругом будущих ученых и производителей.

В сборнике представлены доклады, имеющие отношение к проектированию, созданию, решению научных проблем по обеспечению надежности оборудования, изделий и конструкций, новым подходам к решению вопросов развития методов диагностики и испытания изделий. В связи с тематической направленностью мероприятия организаторы включили в сборник не все научные сообщения, а наиболее интересные и перспективные, характеризующие новизну и глубину проводимых научных исследований.

УДК 67.02:62-03:672

## **ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Д. О. Кононович

Научный руководитель – М. В. Кубриков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: kononovich29@bk.ru

*Темой данной работы является описание основных видов дефектов сварных швов, возникающих при сварочных операциях и подбора методов неразрушающего контроля сварных соединений.*

*Ключевые слова:* Сварка, дефект, сплав, соединение.

Ракетно-космическая техника (РКТ) предъявляет высочайшие требования к надежности и безопасности всех своих компонентов, в том числе и сварных соединений. В условиях экстремальных нагрузок, температурных колебаний и агрессивных сред даже малейшие дефекты в сварных швах могут привести к катастрофическим последствиям. Поэтому неразрушающий контроль (НК) сварных соединений является неотъемлемой частью производственного процесса в РКТ, обеспечивая гарантию качества и соответствие высоким стандартам.

Физические методы НК играют ключевую роль в этом процессе, предоставляя возможность выявлять дефекты без повреждения сварных соединений. Эти методы основаны на взаимодействии физических полей и волн (электромагнитных, акустических, радиационных и т.д.) с материалами и позволяют получать информацию о структуре, целостности и свойствах сварных соединений, выявлять внутренние и поверхностные дефекты, оценивать их размеры, форму и расположение.

Дефекты сварных соединений представляют собой отклонения от идеального состояния сварного шва, которые могут снизить прочность, надежность и долговечность сварной конструкции. Эти дефекты возникают в результате различных факторов, связанных с технологией сварки, характеристиками свариваемых материалов и условиями проведения работ.

В основу классификации методов неразрушающего контроля (НК) положены физические процессы взаимодействия физического поля с объектом контроля (ОК). С точки зрения физических явлений, на которых они основаны, выделяют девять видов НК: магнитный, вихретоковый, электрический, радиоволновый, тепловой, визуально-оптический, радиационный, проникающими веществами и акустический

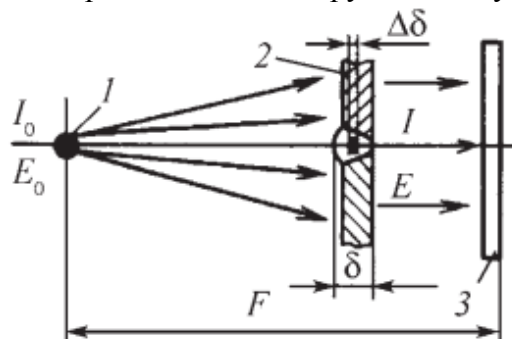
Радиационный метод НК основан на регистрации и анализе проникающего через ОК ионизирующего излучения. Информативным параметром метода является ослабление



интенсивности ионизирующего излучения. Этот метод, применимый к любым материалам, позволяет определить не только макродефекты, но и микроструктуру металлов.

При радиационном контроле используют три основных элемента (рис. 1):

- источник ионизирующего излучения;
- объект контроля (ОК);
- детектор, регистрирующий прошедшее ионизирующее излучение.



– Рис. 1. Схема просвечивания:

- 1 — источник; 2 — изделие; 3 — детектор;  $I$  — интенсивность излучения;
- $E$  — энергия излучения;  $F$  — фокусное расстояние;  $\delta$  — толщина контролируемого объекта;
- $\Delta\delta$  — размер дефекта

При радиационной дефектоскопии сварных соединений в основном применяют тормозное (рентгеновское), нейтронное и  $\gamma$ -излучения. Тормозное и  $\gamma$ -излучения представляют собой разновидность электромагнитных колебаний, которые по сравнению с видимым светом и ультрафиолетовым излучением имеют как общие волновые свойства, так и специфические особенности, связанные с их корпускулярными (квантовыми) свойствами. В частности, длина волны  $\lambda$  видимого света равна  $10^{-9} \dots 4 \cdot 10^{-7}$  м; рентгеновского излучения  $6 \cdot 10^{-13} \dots 10^{-8}$  м;  $\gamma$ -излучения  $10^{-13} \dots 4 \cdot 10^{-12}$  м.

Разница между рентгеновским (R) и  $\gamma$ -излучениями заключается в механизме их возникновения: рентгеновское излучение — внеядерного происхождения,  $\gamma$ -излучение — продукт распада ядер. Обладая одной и той же природой, рентгеновское и  $\gamma$ -излучения подчиняются одинаковым закономерностям при взаимодействии с веществами.

Рентгеновское излучение, открытое в 1895 г. немецким физиком В. Рентгеном, получают чаще всего с помощью электронных рентгеновских трубок (рис. 2).

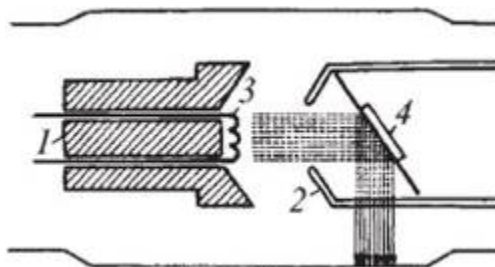


Рис. 2. Рентгеновская трубка:

- 1 — катод; 2 — фокусирующие пластины; 3 — нить накала; 4 — анод.

Рентгеновская трубка представляет собой стеклянный баллон с высокой степенью разрежения газа ( $10^{-6} \dots 10^{-7}$  мм рт. ст.). В трубке впаяны электроды — анод А и катод К. Катод служит источником электронов, анод — мишенью для торможения электронов. Катод изготавливают в виде спирали из вольфрамовой проволоки, а анод — из вольфра-

мовой пластинки. Анод впаивают в пустотелый медный стержень, который во время работы охлаждается.

Спираль катода при работе нагревается до температуры  $\sim 3000$  °С током 3...6 А от трансформатора накала напряжением 5...12 В. Для создания определенной направленности в движении электронов и придания им необходимой скорости к электродам трубки прикладывают высокое напряжение с разностью потенциалов порядка нескольких десятков или сотен киловольт. Кинетическая энергия электронов, падающих на анод, находится в прямой зависимости от напряжения, приложенного к трубке. При соударении движущихся с большой скоростью электронов с атомами материала анода электроны резко замедляются, теряя кинетическую энергию, которая частично превращается в лучистую энергию, выделяемую в виде фотонов рентгеновского излучения, а частично тратится на нагревание анода.

Эта часть энергии зависит от анодного напряжения  $U$  и порядкового номера материала анода  $Z$ :

$$E = 1,4 \cdot 10^{-7} ZU$$

Основные принципы радиационного контроля:

- Проникновение излучения: Ионизирующее излучение обладает способностью проникать через материал, при этом интенсивность излучения ослабевает в зависимости от толщины и плотности материала, а также его химического состава.
- Ослабление излучения: Различные дефекты, такие как поры, трещины, непровары и шлаковые включения, имеют иную плотность, чем основной металл, и по-разному ослабляют проходящее излучение.
- Регистрация ослабления: Приемник излучения (например, рентгеновская пленка, цифровой детектор) регистрирует пространственное распределение интенсивности излучения, прошедшего через сварной шов.
- Анализ изображения: Полученное изображение (радиографический снимок) анализируется для выявления дефектов и оценки их характеристик

Основные виды радиационных методов:

- Рентгенография: Использует рентгеновское излучение, получаемое от рентгеновских трубок;

Преимущества: Хорошее разрешение, возможность контролировать соединения различной толщины (зависит от мощности трубки), относительно недорогое оборудование.

Ограничения: Необходимость электропитания, сравнительно низкая проникающая способность (для особо толстых соединений), наличие специальной защиты от излучения.

- Гаммаграфия: Использует гамма-излучение от радиоактивных изотопов (например, кобальт-60, иридий-192);

Преимущества: Высокая проникающая способность, возможность контроля толсто-стенных соединений, портативность оборудования.

Ограничения: Низкое разрешение, необходимость обращения с радиоактивными источниками, более длительное время экспозиции.

- Рентгеноскопия (радиография реального времени): Позволяет наблюдать изображение в режиме реального времени на экране монитора, а также производить цифровую обработку;

Преимущества: Высокая производительность, возможность автоматизации процесса контроля, оперативный анализ результатов.

Ограничения: Более сложное и дорогое оборудование, меньшее разрешение по сравнению с рентгенографией.

Основные преимущества радиационных методов:

- Высокая чувствительность: Обнаружение мелких внутренних дефектов.
- Информативность: Получение детального изображения внутренней структуры сварного шва.
- Контроль толстостенных соединений: Возможность контроля швов большой толщины, недоступных для других методов НК.
- Контроль соединений из различных материалов: Применимость к сталям, алюминиевым, титановым сплавам, а также к композиционным материалам.
- Архивирование данных: Возможность хранения рентгеновских снимков.
- Объективность: Независимость результатов контроля от субъективного мнения оператора.

Основные ограничения радиационных методов:

- Безопасность: Необходимость строгого соблюдения правил радиационной безопасности.
- Ограничения по доступу: Требуется обеспечение доступа к сварному соединению для установки источника излучения и детектора.
- Экономические затраты: Более высокая стоимость оборудования и расходных материалов по сравнению с некоторыми другими методами НК.
- Ограничения по толщине: Для очень толстых изделий, необходимы мощные источники и длительная экспозиция.
- Плохая обнаруживаемость плоскостных дефектов, расположенных вдоль оси излучения.

Магнитные методы контроля основаны на регистрации и измерении магнитных полей и их неоднородностей. Магнитное поле существует вблизи проводника с током и постоянных магнитов. Причиной его возникновения является упорядоченное движение зарядов в проводнике или электронов в атомах вещества магнита.

Характеристики постоянного магнитного поля. Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции  $B$ . Вектор  $B$  направлен по касательной к магнитным силовым линиям, поэтому о его направлении можно судить по виду силовых линий. Вектор  $B$  определяет плотность магнитного потока  $\Phi$ . Для наглядности представления магнитного поля линии магнитной индукции условно проводят так, чтобы их число, приходящееся на единицу площади перпендикулярной к ним поверхности, было пропорционально магнитной индукции  $B$ . Поэтому магнитный поток  $\Phi$  через какую-либо поверхность пропорционален общему числу силовых линий, пронизывающих эту поверхность. В однородном магнитном поле магнитный поток  $\Phi$  через площадь  $S$  поверхности, расположенной перпендикулярно к магнитным линиям, равен произведению магнитной индукции  $B$  на площадь  $S$  ( $\Phi = BS$ ). Магнитный поток выражается в веберах ( $Вб$ ), а магнитная индукция — в теслах ( $Тл$ ).

Другой важной характеристикой магнитного поля является вектор напряженности  $H$ . Он определяет поле, создаваемое внешним по отношению к данному телу источником. На практике эти поля чаще всего создаются различными намагничивающими катушками или постоянными магнитами. Между индукцией и напряженностью магнитного поля существует зависимость:

$$B = \mu_0 \mu H$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость в вакууме,

$\mu$  — относительная магнитная проницаемость,

$H$  — напряженность магнитного поля, А/м.

Магнитные свойства материала. Все вещества в той или иной степени обладают магнитными свойствами, которые характеризуются магнитной проницаемостью  $\mu$ . В зависимости от ее значения все материалы подразделяют на три группы:

- диамагнитные, у которых  $\mu$  на несколько миллионов или тысячных долей  $< 1$  (медь, цинк, серебро и др.);
- парамагнитные, у которых  $\mu$  на несколько миллионов или тысячных долей  $> 1$  (марганец, платина, алюминий);
- ферромагнитные, у которых  $\mu$  достигает десятков тысяч. К таким материалам относят только четыре элемента (железо, никель, кобальт, гадолиний) и некоторые сплавы металлов.

Ферромагнитные свойства металлов обусловлены внутренними молекулярными токами, в основном вращением электронов вокруг собственной оси. Магнитные поля молекулярных токов образуют результирующее поле домена в пределах малых объемов ( $10^{-8} \dots 10^{-5}$  см<sup>3</sup>) элементарных областей.

Магнитные поля доменов при отсутствии внешнего магнитного поля направлены произвольно и компенсируют друг друга. Суммарное поле доменов в этом случае равно нулю, деталь оказывается размагниченной. Если на деталь действует внешнее поле, то под его влиянием поля отдельных доменов устанавливаются по направлению внешнего поля с однородным изменением границ между доменами. В результате образуется общее магнитное поле доменов, деталь оказывается намагниченной. При намагничивании магнитное поле доменов накладывается на внешнее магнитное поле в контролируемой детали.

### Библиографические ссылки

1. Авторское свидетельство № 727377 А1 СССР, МПК В23К 25/00. Способ устранения дефектов типа "кратер" сваркой плавлением : № 2553201 : заявл. 05.12.1977 : опубл. 15.04.1980 / Н. Г. Третьяк, А. А. Бондарев, Д. М. Рабкин [и др.] ; заявитель ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ИМ.Е.О.ПАТОНА АН УССР. – EDN YRRHNB.Шашков, С. Ю. Верификация процесса механической обработки корпусных деталей с вафельным фоном в производстве РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ / С. Ю. Шашков // Решетневские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 541-542. – EDN YLYYSM.

2. Козлов, И. К. Исследование причин возникновения дефектов контактной стыковой сварки сопротивлением круглозвенных цепей / И. К. Козлов, А. С. Трофимов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 3(114). – С. 131-137. – EDN WNGDTV.

3. Керенцев, А. Дефекты паяных соединений при монтаже внешних выводов транзисторов в силовых модулях / А. Керенцев, В. Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2010. – № 3(39). – С. 58-63. – EDN MUGTTN..

4. Авторское свидетельство № 1681230 А1 СССР, МПК G01N 29/04. Способ контроля качества акустического контакта сварных соединений при ультразвуковом контроле сварных соединений : № 4655721 : заявл. 27.02.1989 : опубл. 30.09.1991 / А. К. Вошанов, В. Ю. Баранов, А. Е. Петров, Л. Ю. Могильнер ; заявитель МГТУ ИМ.Н.Э.БАУМАНА. – EDN JMNKRR.

5. Лукашева, Л. И. Радиационный метод контроля качества сварных соединений трубных деталей для оборудования химического производства / Л. И. Лукашева, О. В. Гальцева // Образование. Наука. Производство : Сборник докладов XV Международного

молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 57-60. – EDN CKKZLY.

© Кононович Д. О., 2025

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D ПЕЧАТИ

Ю. Н. Коркин, Д. С. Носов, В. М. Белан.

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева;  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: iur.korkin@yandex.ru

*В данной статье проводится анализ механических свойств образцов, изготовленным методом 3D печати из пяти разных пластиков, а именно: PLA производителя Gick-fillamen. ABS производителя Gick-fillamen. ABS-GF4 производител Filamentarno, Nylon производитель Print product, PC-поликарбонат производитель Print product. Также выполнен расчет модуля упругости всех пяти образцов, и сделан их сравнительный анализ. В заключение отмечены особенности применения каждого пластика в области 3D печати.*

*Ключевые слова: механические свойства, модуль упругости, испытания на разрыв, пластика для 3D печати, прочность, относительное удлинение, средняя нагрузка при растяжении.*

### **Введение.**

Целью данного исследования было определение модуля относительного удлинения и сопротивления различных пластиков, применяемых в технологии трёхмерной печати, для упрощения процесса выбора подходящего материала в соответствии с требуемыми характеристиками.

### **Проведение эксперимента.**

Для исследования различных пластиков нами были спроектированы 3D модели образцов для испытаний на разрыв согласно ГОСТ 1497-84. (рис.1) [1]



Рис. 1. 3D модель образца

Для исследования были выбраны следующие виды пластмасс:

1. PLA производителя Gick-fillamen.
2. ABS производителя Gick-fillamen.
3. ABS-GF4 (Композит на основе ABS армированного 4% рубленым стекловолокном.) производител Filamentarno
4. Nylon производитель Print product
5. PC-поликарбонат производитель Print product

Печать всех образцов производилась с одинаковыми настройками печати, за исключением температур стола и сопла. [2]

Испытания проводились на разрывной машине Eurotest T-50, относительная погрешность которой составляет 0,5%. (рис.2) В результате проведения испытания аппарат ре-

гистрирует следующие данные: перемещение в миллиметрах, время в секундах, нагрузку в Ньютонах, прочность в Мега Паскалях



Рис.2. Испытательная машина Eurotest T-50

Испытания пластмасс на разрыв с помощью испытательной машины Eurotest T-50 проводились по 3 образцам из каждого материала. (Результаты испытаний приведены на рисунках 3–7).

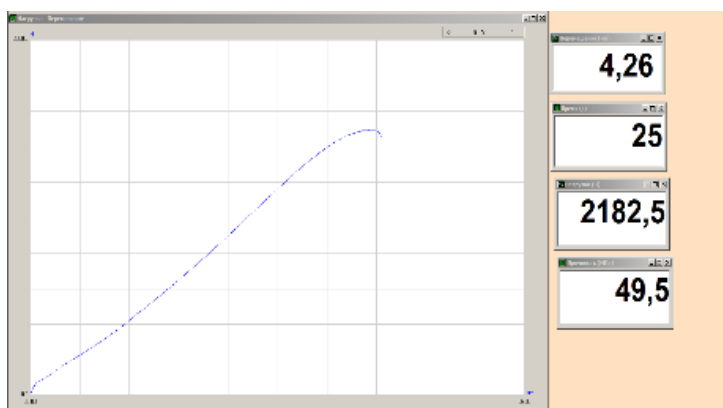


Рис.3а. Диаграммы испытаний PLA (образец 1)

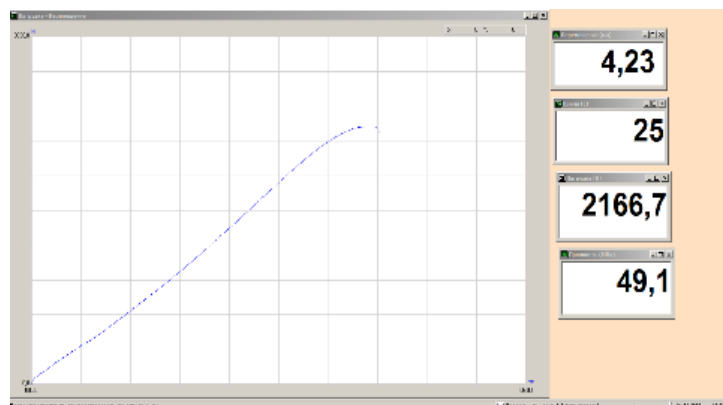


Рис.3б. Диаграммы испытаний PLA (образец 2)

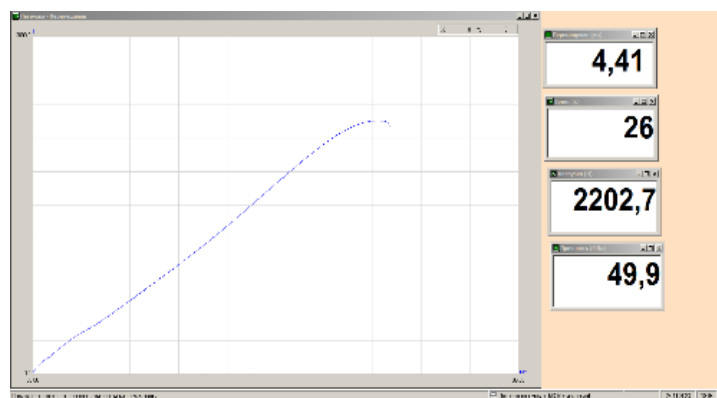


Рис.3в. Диаграммы испытаний PLA (образец 3)

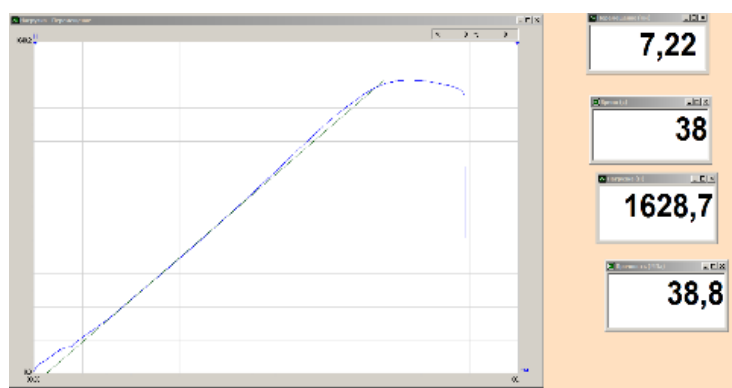


Рис.4а. Диаграммы испытаний ABS (образец 1)

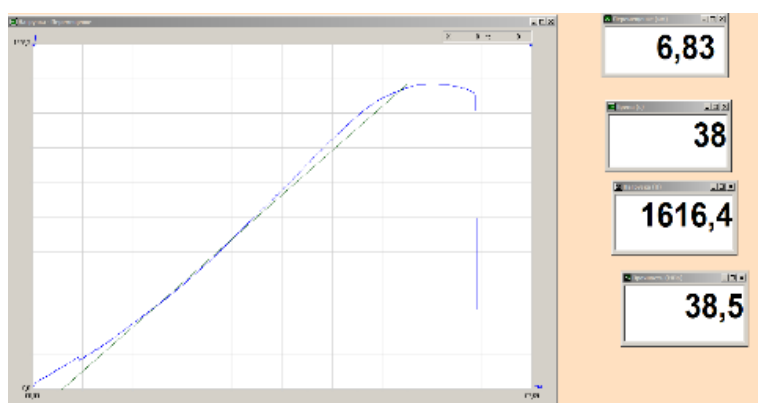


Рис.4б. Диаграммы испытаний ABS (образец 2)

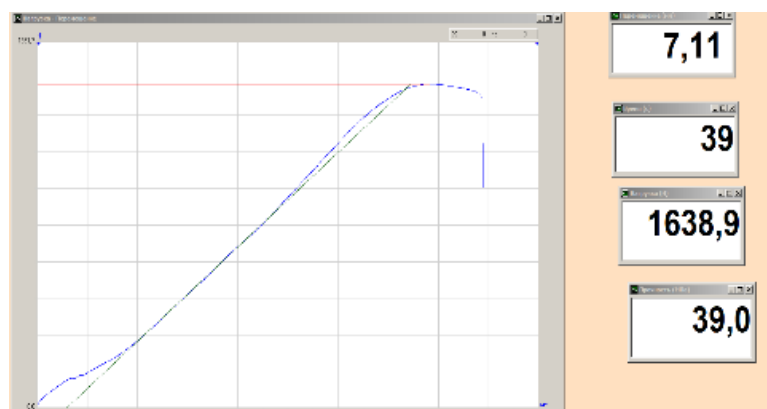


Рис.4в. Диаграммы испытаний ABS (образец 3)



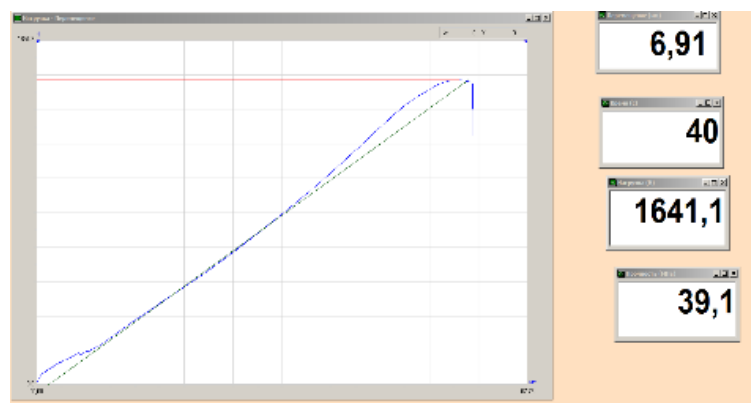


Рис.5а. Диаграммы испытаний ABS–GF (образец 1)

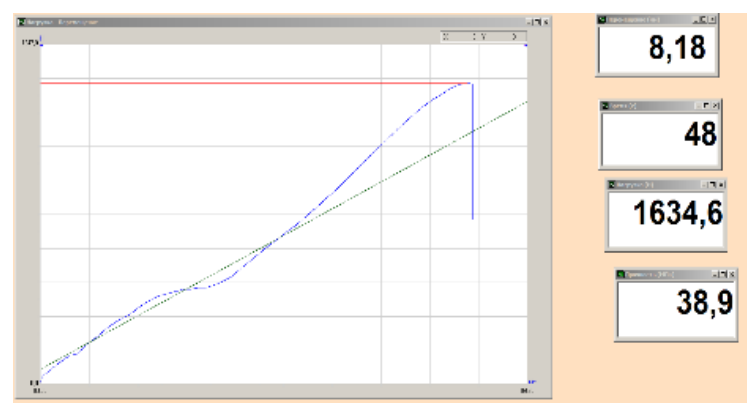


Рис.5б. Диаграммы испытаний ABS–GF (образец 2)

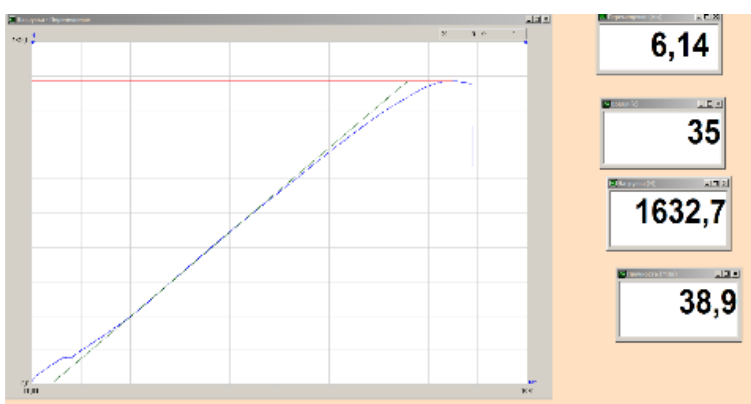


Рис.5в. Диаграммы испытаний ABS–GF (образец 3)

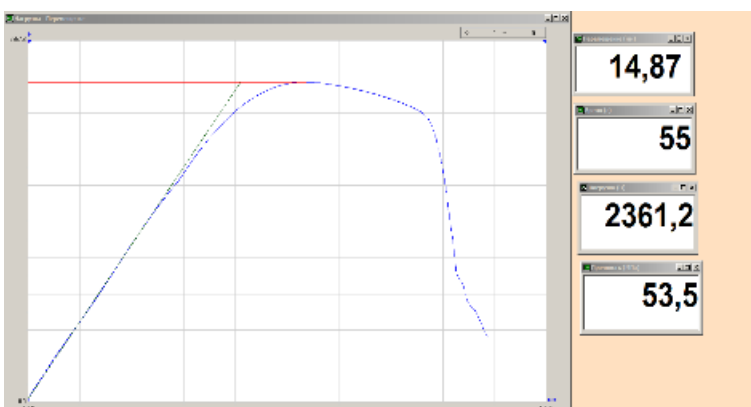


Рис.6а. Диаграммы испытаний Nylon (образец 1)

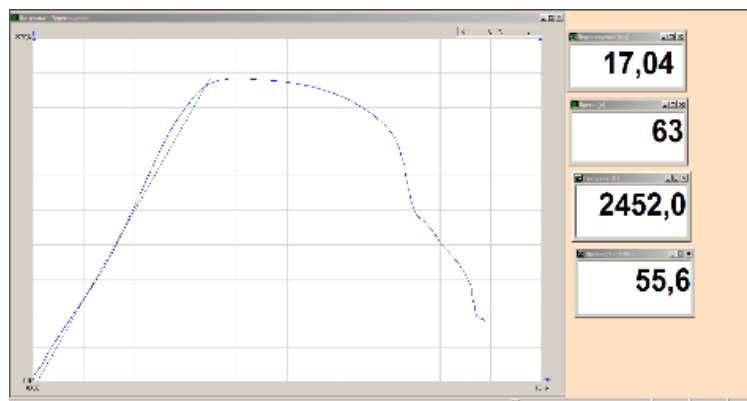


Рис.6б. Диаграммы испытаний Nylon (образец 2)

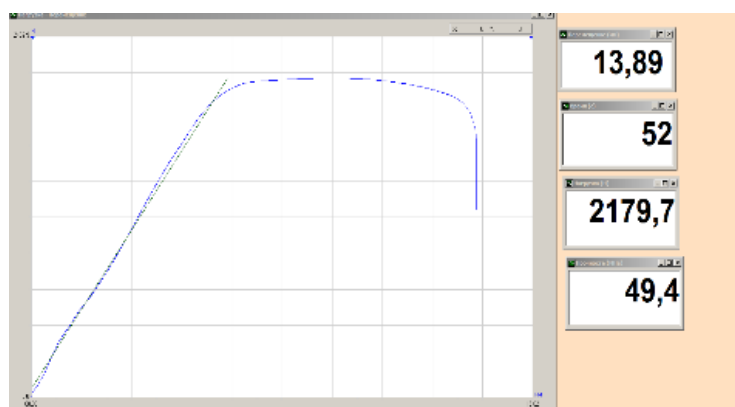


Рис.6в. Диаграммы испытаний Nylon (образец 3)

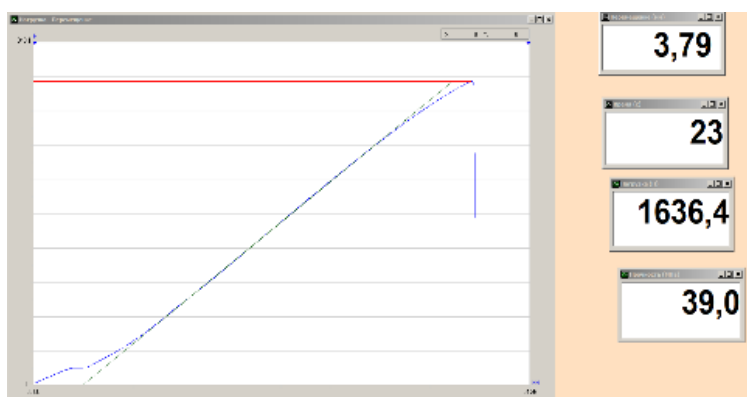


Рис.7а. Диаграммы испытаний PC–поликарбонат (образец 1)

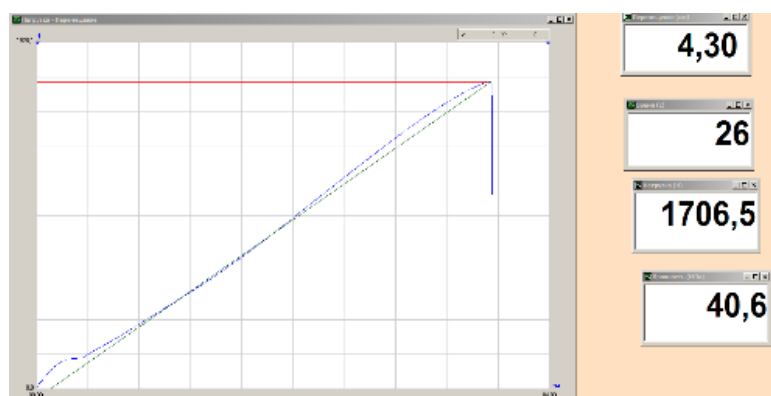


Рис.7б. Диаграммы испытаний PC–поликарбонат (образец 2)

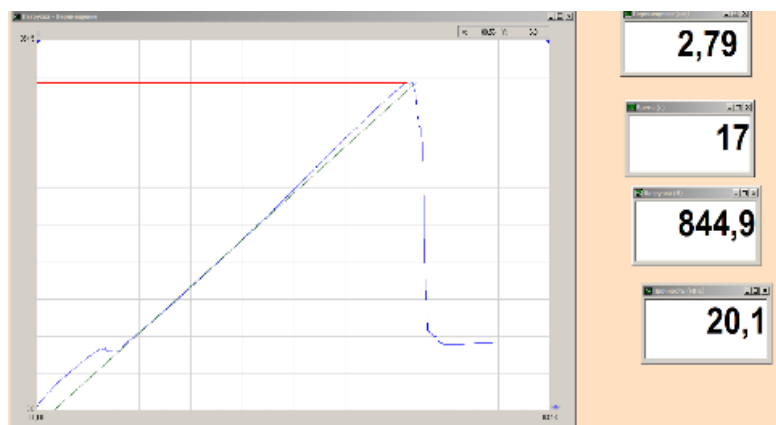


Рис.7в. Диаграммы испытаний РС–поликарбонат (образец 3)

### Порядок расчёта модуля упругости $E$ .

Средняя расчетная нагрузка, действующая на образцы каждого материала, определялась по формуле [3]

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

Среднеквадратическое отклонение полученных значений нагрузки определялось по формуле:

$$P_{\text{скд}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \Delta P)^2}{n-1}}.$$

Абсолютная погрешность нагрузки определялась по формуле:

$$\Delta P = \sqrt{(P_{\text{срд}} t_{\alpha}^n)^2 + \delta_n^2}.$$

где  $t_{\alpha}^n$  – коэффициент Стьюдента,  $\delta_n$  – класс точности машины.

Тогда относительная деформация будет равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Среднеарифметическая относительная деформация определялась по формуле:

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n}.$$

Среднее удлинение образца находилось по формуле:

$$\Delta l_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta l_i}{n}.$$

Абсолютная погрешность относительной деформации определялась по формуле:

$$\Delta \varepsilon = \sqrt{\left(\frac{1}{l_0} \cdot \delta_n\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_{\text{ср}}}{l_0} \cdot \sigma_n\right)^2},$$

где  $\delta_n$  – класс точности измерительного прибора [4]

Абсолютная погрешность напряжений определялась по формуле:

$$\Delta \sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{b \cdot h} \cdot \Delta P\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{ср}}}{b \cdot h^2} \cdot \Delta h\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{ср}}}{h \cdot b^2} \cdot \Delta b\right)^2}.$$

Модули упругости материалов определялись по формуле:

$$E = \frac{P_{\text{ср}}}{F \cdot \varepsilon_{\text{ср}}}.$$

Абсолютные погрешности модулей упругости материалов определялись по формуле:

$$\Delta E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}.$$

Результаты расчета модуля упругости  $E$  для различных материалов образцов пластика представлены в таблицах 1...5.

Результаты расчёта PLA представлены в таблице №1

Таблица 1

| № | $\Delta l$<br>мм | P<br>кН | P <sub>ср</sub><br>кН | P <sub>срд</sub><br>кН | $\Delta P$<br>кН | $\epsilon$ | $\epsilon_{ср}$ | L <sub>ср</sub><br>мм | $\Delta \epsilon$     | $\Delta \sigma$<br>МПа | E<br>МПа | $\Delta E$<br>МПа |
|---|------------------|---------|-----------------------|------------------------|------------------|------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------|-------------------|
| 1 | 4.26             | 2.185   | 2.184                 | 0.018                  | 0.011            | 0.036      | 0.036           | 4.3                   | $3.584 \cdot 10^{-3}$ | $2.646 \cdot 10^{-3}$  | 1.452    | 0.074             |
| 2 | 4.23             | 2.1667  |                       |                        |                  | 0.035      |                 |                       |                       |                        |          |                   |
| 3 | 4.41             | 2.2027  |                       |                        |                  | 0.037      |                 |                       |                       |                        |          |                   |

Результаты расчёта ABS представлены в таблице №2

Таблица 2

| № | $\Delta l$<br>мм | P<br>кН    | P <sub>ср</sub><br>кН | P <sub>срд</sub><br>кН | $\Delta P$<br>кН      | $\epsilon$ | $\epsilon_{ср}$ | L <sub>ср</sub><br>мм | $\Delta \epsilon$     | $\Delta \sigma$<br>МПа | E<br>МПа  | $\Delta E$<br>МПа |
|---|------------------|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------|-------------------|
| 1 | 7.2<br>2         | 1.628<br>7 | 1.62<br>8             | 0.01<br>1              | $7.974 \cdot 10^{-3}$ | 0.06       | 0.05<br>9       | 7.05<br>3             | $5.878 \cdot 10^{-3}$ | $1.899 \cdot 10^{-3}$  | 0.65<br>9 | 0.03<br>2         |
| 2 | 6.8<br>3         | 1.616<br>4 |                       |                        |                       | 0.05<br>7  |                 |                       |                       |                        |           |                   |
| 3 | 7.1<br>1         | 1.638<br>9 |                       |                        |                       | 0.05<br>9  |                 |                       |                       |                        |           |                   |

Результаты расчёта ABS–GF4 представлены в таблице №3

Таблица 3

| № | $\Delta l$<br>мм | P<br>кН | P <sub>ср</sub><br>кН | P <sub>срд</sub><br>кН | $\Delta P$<br>кН     | $\epsilon$ | $\epsilon_{ср}$ | L <sub>ср</sub><br>мм | $\Delta \epsilon$     | $\Delta \sigma$<br>МПа | E<br>МПа | $\Delta E$<br>МПа |
|---|------------------|---------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------|-------------------|
| 1 | 6.91             | 1.6411  | 1.636                 | $4.405 \cdot 10^{-3}$  | $5.56 \cdot 10^{-3}$ | 0.058      | 0.059           | 7.067                 | $5.889 \cdot 10^{-3}$ | $1.824 \cdot 10^{-3}$  | 0.942    | 0.31              |
| 2 | 8.18             | 1.634.6 |                       |                        |                      | 0.068      |                 |                       |                       |                        |          |                   |
| 3 | 6.14             | 1.6327  |                       |                        |                      | 0.051      |                 |                       |                       |                        |          |                   |

Результаты расчёта Nylon представлены в таблице №4

Таблица 4

| № | $\Delta l$<br>мм | P<br>кН    | P <sub>ср</sub><br>кН | P <sub>срд</sub><br>кН | $\Delta P$<br>кН | $\epsilon$ | $\epsilon_{ср}$ | L <sub>ср</sub><br>мм | $\Delta \epsilon$ | $\Delta \sigma$<br>МПа | E<br>МПа  | $\Delta E$<br>МПа |
|---|------------------|------------|-----------------------|------------------------|------------------|------------|-----------------|-----------------------|-------------------|------------------------|-----------|-------------------|
| 1 | 14.8<br>7        | 2.361<br>2 | 2.33<br>1             | 0.13<br>9              | 0.07<br>7        | 0.12<br>4  | 0.12<br>7       | 15.2<br>7             | 0.01<br>3         | $1.824 \cdot 10^{-3}$  | 0.43<br>6 | 0.14<br>3         |
| 2 | 17.0<br>4        | 2.452<br>0 |                       |                        |                  | 0.14<br>2  |                 |                       |                   |                        |           |                   |
| 3 | 13.8<br>9        | 2.179<br>7 |                       |                        |                  | 0.11<br>6  |                 |                       |                   |                        |           |                   |

Результаты расчёта PC– поликарбонат представлены в таблице №5

Таблица 5

| № | $\Delta l$<br>мм | P<br>кН | P <sub>ср</sub><br>кН | P <sub>срд</sub><br>кН | $\Delta P$<br>кН | $\epsilon$ | $\epsilon_{ср}$ | L <sub>ср</sub><br>мм | $\Delta \epsilon$     | $\Delta \sigma$<br>МПа | E<br>МПа | $\Delta E$<br>МПа |
|---|------------------|---------|-----------------------|------------------------|------------------|------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------|-------------------|
| 1 | 3.79             | 1.6364  | 1.396                 | 0.478                  | 0.264            | 0.032      | 0.03            | 3.627                 | $3.023 \cdot 10^{-3}$ | $2.832 \cdot 10^{-3}$  | 1.1      | 0.937             |
| 2 | 4.3              | 1.7065  |                       |                        |                  | 0.036      |                 |                       |                       |                        |          |                   |
| 3 | 2.79             | 0.8449  |                       |                        |                  | 0.023      |                 |                       |                       |                        |          |                   |

### Общее сравнение образцов пластика по разным показателям.

Общее сравнение образцов пластика для 3D печати на основе их механических характеристик представлена в диаграммах (рис. 8–11). [5]

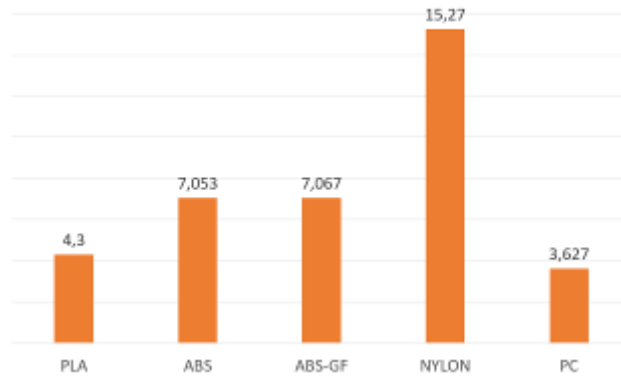


Рис. 8. Диаграмма удлинения испытанных образцов пластика.

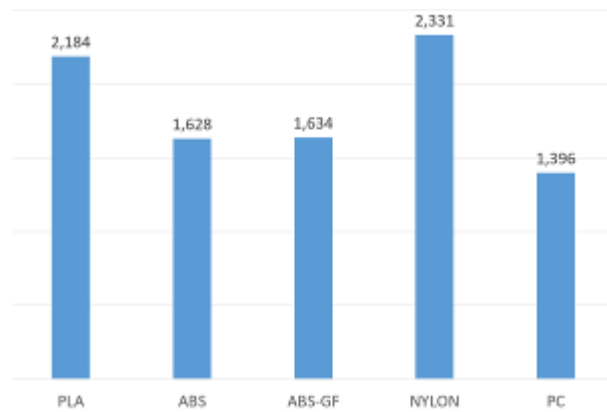


Рис. 9. Диаграмма по средней нагрузке при растяжении испытанных образцов пластика.

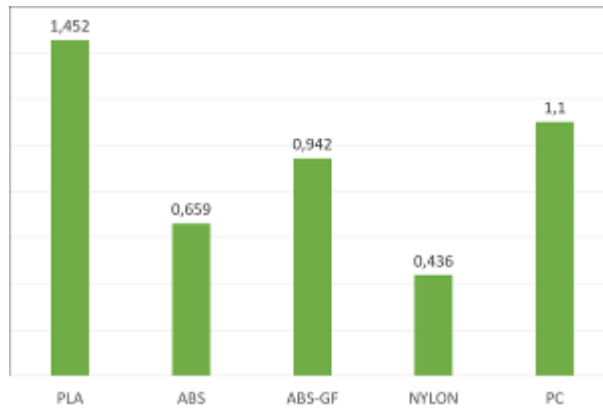


Рис. 10. Диаграмма по модулю упругости испытанных образцов пластика.

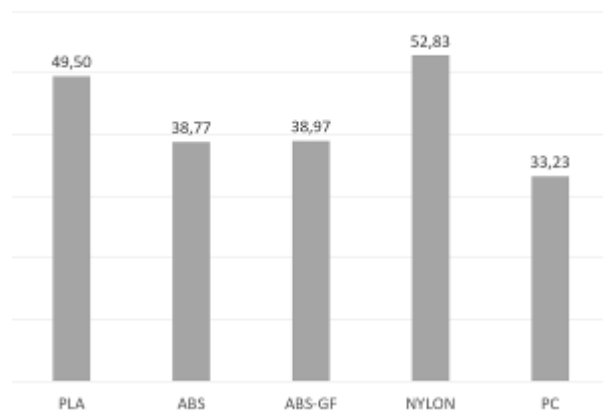


Рис. 11. Диаграмма прочности испытанных образцов пластика.

## **Выводы.**

В рамках данного исследования были проанализированы механические свойства пяти различных пластиков, используемых в 3D печати. Сделаны следующие выводы:

- PLA пластик демонстрирует наилучший результат по модулю упругости, а также обладает высокими показателями прочности и нагрузки, необходимой для разрыва. Однако его способность к удлинению ограничена. Следовательно, PLA-пластик хорошо подходит для печати изделий, которые не подвергаются значительным разрывным воздействиям.
- Пластики ABS и ABS–GF4 имеют схожие характеристики, но благодаря добавлению небольшого количества композитного материала ABS–GF4 превосходит обычный ABS по всем параметрам, а по модулю упругости так и вовсе в 1,5 раза. В целом же, результаты исследования показывают, что пластики группы ABS имеют средние показатели по всем параметрам, что свидетельствует об их универсальности.
- Пластик Nulon (Нейлон) демонстрирует высокие показатели прочности и нагрузки, необходимой для разрыва, а также отличную способность к удлинению. Однако модуль упругости этого материала оказался наименее выраженным среди исследуемых, что означает малую жёсткость и низкую устойчивость к деформации изделий, изготовленных из данного материала для 3D печати.
- Пластик Поликарбонат (PC) показал наименее впечатляющие результаты по большинству параметров, за исключением модуля упругости. Это обстоятельство обуславливает узкоспециализированную область применения данного материала в области 3D печати.

## **Библиографические ссылки**

1. Аддитивные технологии – что это такое и где применяются. [Электронный ресурс]. URL: [https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2019/09/18/additivnye-tehnologii-\\_1320\\_-chto-eto-takoe-i-gde-primenyayutsya.aspx](https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2019/09/18/additivnye-tehnologii-_1320_-chto-eto-takoe-i-gde-primenyayutsya.aspx)
2. Всё о 3D-печати. Аддитивное производство. Основные понятия. [Электронный ресурс]. URL: [https://3dtoday.ru/wiki/3D\\_print\\_technology](https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology)
3. Кац А. М. ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ. Издание второе, стереотипное. Санкт-Петербург, 2002. 208 с.
4. Александров А. В., Потапов В. Д. Основы теории упругости и пластичности. Москва «Высшая школа», 1990. 400 с.
5. Э. С. Манохина, В. Ю. Журавлев. Особенности механических свойств материала inconel 718, полученного методом SLM-печати. Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2023. С 25–27.

© Коркин Ю. Н., Носов Д. С., Белан В. М., 2025

## **КОНТРОЛЬ СПЛОШНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СМЕСИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

А. А. Пospelов

Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: pospelovaleksandr@mail.ru

*Темой данной работы является контроль сплошности в смесительной головке жидкостного ракетного двигателя. Рассмотрены акустический и термографический методы. Проведен сравнительный анализ методов.*

*Ключевые слова: смесительная головка, сплошность, термографический контроль, акустический мониторинг*

Контроль сплошности смесительной головки является важным аспектом обеспечения надежности и безопасности работы ракетных двигателей в ракетно-космической технике. Смесительная головка, отвечающая за смешивание горючего и окислителя, должна функционировать без утечек, так как любые аномалии могут привести к снижению производительности, а в худшем случае — к аварийным ситуациям. В условиях высоких температур и давлений, характерных для работы ракетных двигателей, необходимость в точном и своевременном обнаружении утечек на этапе технологического процесса становится особенно актуальной.

Контроль сплошности проводится на различных стадиях — начиная от производства отдельных компонентов до сборки целых узлов и окончательного тестирования ракеты или космического аппарата. В данной статье рассмотрены акустический и термографический контроль. Акустический контроль позволяет выявлять утечки на ранней стадии, фиксируя звуковые волны, возникающие в результате повреждений или утечек. В то же время, термографический контроль использует инфракрасные камеры для обнаружения температурных аномалий, связанных с утечками, что позволяет визуализировать проблемы без вмешательства в работу системы.

Акустический метод контроля — использующий звуковые волны для выявления утечек и повреждений в системе, в частности в форсунках. Основной принцип акустического метода контроля заключается в распространении упругих волн через исследуемый объект. Акустические волны взаимодействуют с дефектами, отражаясь, преломляясь или изменяя амплитуду [1]. При наличии дефекта (например, трещины или пустоты) часть волны отражается, а часть преломляется, образуя сигнал, который может быть зафиксирован и проанализирован. Использование разных частот позволяет исследовать материал на различной глубине, а тип волны подбирается в зависимости от задач и характеристик объекта. На практике контроль проводится как через стандартные колебания, так и через ультразвуковые частоты (свыше 20 кГц), которые повышают чувствительность диагностики и позволяют выявлять даже малейшие повреждения.

Перед началом акустического метода контроля необходимо убедиться, что оборудование и системы находятся в нормальном рабочем состоянии. Все соединения должны быть правильно закреплены, а система не должна подвергаться нагрузкам, превышающим рабочие параметры. Для акустического метода контроля применяются специализи-

рованные приборы, такие как ультразвуковые датчики и акустические камеры (рис. 1). Ультразвуковые датчики способны улавливать высокочастотные звуки, которые не воспринимаются человеческим ухом, но возникают при утечках газа или жидкости. Проводят измерения фоновых шумов и устанавливают базовые параметры работы системы. Это позволяет определить, какие звуки считаются нормальными и какие могут указывать на утечку.

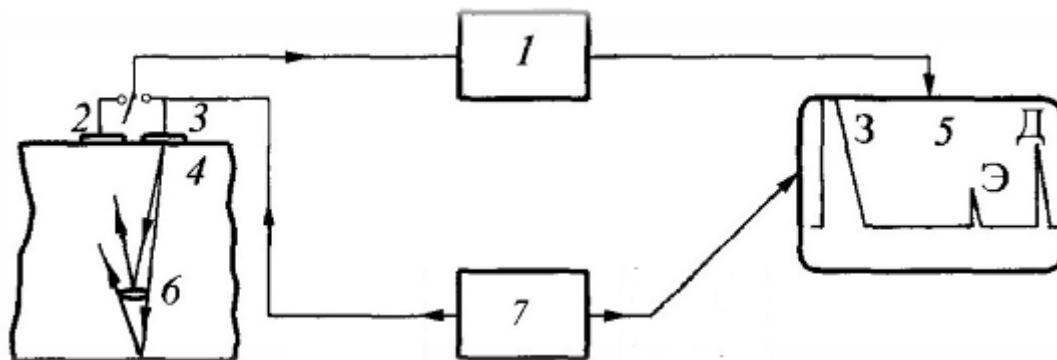


Рис.1. Акустический метод контроля  
1-усилитель; 2,3-преобразователи; 4-объект контроля; 5-развертка; 6-дефект;  
7-синхронизатор.

Во время работы системы проводятся регулярные замеры акустических сигналов. Оборудование фиксирует звуки, возникающие в результате работы форсунок и соединений. Специалисты могут прослушивать данные в реальном времени или записывать их для последующего анализа. Сравнение полученных данных с установленными базовыми уровнями позволяет выявить аномалии. Звуки, связанные с утечками, могут иметь характерные характеристики, такие как повышение частоты или изменение громкости, и могут быть идентифицированы с помощью анализа спектра звуковых колебаний. Если подозрительные звуки были выявлены, можно использовать направленные датчики или микрофоны для локализации источника утечки. Например, ультразвуковое оборудование позволяет "слушать" различные участки системы и определить, где происходит утечка.

Камеры термографического контроля, также известные как инфракрасные камеры, представляют собой мощный инструмент для выявления утечек и оценки состояния оборудования, включая форсунки. Этот метод основан на измерении инфракрасного излучения, которое объекты излучают в зависимости от их температуры [3].

Все объекты с температурой выше абсолютного нуля излучают инфракрасное тепло. Чем выше температура объекта, тем больше инфракрасного излучения он выделяет. Инфракрасные камеры фиксируют это излучение и преобразуют его в изображение, где цветовая палитра отображает температурные различия (рис. 2). Теплые участки на изображении выделяются другими цветами по сравнению с холодными, что позволяет быстро идентифицировать аномалии.





Рисунок – 2. Камера термографического контроля

Перед началом термографического контроля важно обеспечить, чтобы система находилась в нормальном рабочем состоянии. Это позволяет получить наиболее точные и надежные измерения. Инфракрасная камера настраивается и калибруется в соответствии с условиями окружающей среды и характеристиками объекта. Этот этап включает установку параметров, необходимых для получения точных температурных значений, что критически важно для последующего анализа. Специалист с инфракрасной камерой проходит по участкам, где могут возникать утечки, особенно в форсунках и их соединениях. Камера осуществляет съемку в инфракрасном диапазоне, фиксируя тепловое излучение. На термографических изображениях аномалии, такие как повышение температуры или неожиданные холодные участки, могут указывать на наличие проблем. Например, утечка жидкости может привести к тому, что горячая жидкость выйдет на поверхность, и это место будет отображаться как теплая зона на термографической картине. Полученные термографические изображения подвергаются тщательному анализу для выявления потенциальных источников утечек. Специалисты сравнивают результаты с ранее установленными стандартами или базовыми уровнями, чтобы определить наличие значительных отклонений. Если в процессе анализа были выявлены подозрительные области, рекомендуется провести дополнительную проверку для подтверждения утечки и определения необходимых мер.

Подводя итог, проведем небольшой сравнительный анализ.

Выбор метода зависит от конкретных условий и целей:

1. Для фиксации утечек газа или жидкости, особенно в шумных условиях, может быть целесообразным использовать акустический метод контроля, так как он может чувствовать даже самые тихие утечки.
2. Для жидкостей, особенно в системах, где ожидается высокая температура, термографический контроль будет более эффективным.
3. Акустический метод контроля позволяет более точно зафиксировать участки несплошности конструкции и определить их размеры.
4. Термографический контроль более мобильный метод, позволяющий оперативно определить участки несплошности конструкции и в дальнейшем сократить затраты на более точное исследование другими методами параметров выявленных участков.

В идеале, лучше всего использовать комплексный подход, сочетая оба метода для достижения наилучшего результата [2]. Например, акустический метод контроля может

предложить быстрое обнаружение, в то время как термографический контроль позволит провести более детальный анализ состояния оборудования. Таким образом, выбор метода зависит от конкретных требований и условий эксплуатации, а комбинация обоих считается наиболее эффективным решением

### **Библиографические ссылки**

6. Михайлов М.М. Акустическая диагностика утечек: методы и технологии. Журнал ракетной техники, 2020, № 6, с. 40-45.
7. Соловьев С.С. Сравнительный анализ методов контроля герметичности. Журнал контроля и диагностики, 2022, № 11, с. 35-40.
8. Фролов Ф.Ф. Методология анализа результатов термографического контроля. Журнал ракетной техники, 2021, № 5, с. 55-60.

© Поспелов А. А., 2025

## КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА

Раткин Ф.А.

Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: fedi2001@mail.ru

*Темой данной работы является контроль механических свойств металла. Рассмотрены такие методы как: метод Виккерса и ультразвуковое исследование. Проведен сравнительный анализ методов.*

*Ключевые слова: механические свойства, метод Виккерса, ультразвуковое исследование, твердость.*

Для контроля механических свойств металлов при производстве изделий ракетно-космической техники используются различные методы. Наибольшее распространение получили две группы методов: методы, основанные на экспериментальном определении твердости металла [3]; методы, основанные на зависимости скорости распространения и отражения ультразвуковых волн в металле от его механических свойств. При выборе метода учитывается ряд факторов, рассматриваемых в данной работе.

**Метод Виккерса** — это один из методов измерения твердости материалов, основанный на вдавливании алмазного пирамидального индентатора с углом  $136^\circ$  между его гранями в поверхность исследуемого материала под заданной нагрузкой.

### **Принцип работы:**

1. **Индентора** — алмазная пирамида с углом между противоположными гранями  $136^\circ$ .
2. **Нагрузка** — на индентора воздействует постоянная сила (обычно от 1 до 100 кг).
3. **Измерение отпечатка** — после того, как индентора воздействует на материал, он оставляет отпечаток. Размер диагоналей отпечатка измеряется микроскопом с высокой точностью.
4. **Расчет твердости** — твердость по методу Виккерса (HV) определяется по формуле в соответствии с ГОСТ 2999-75 [1, 2]:

$$HV = \frac{2 * F * \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2}$$

где F — нагрузка в килограмм-силах,

d — средняя длина диагонали отпечатка в миллиметрах,

$\alpha$  — угол пирамиды индентатора  $136^\circ$  (рис.1).

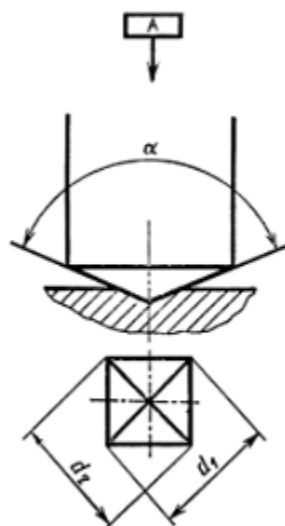


Рис. 1. Схема вдавливания пирамиды по методу Виккерса

#### Преимущества метода Виккерса:

- Подходит для материалов с разной твердостью, от мягких до твердых.
- Применяется для тонких материалов и покрытий.
- Позволяет точно измерять твердость на малых участках, включая микро- и наноразмерные.

#### Механические свойства, которые можно оценить

1. **Прочность на растяжение:** Твердость по Виккерсу коррелирует с прочностью на растяжение, поскольку более твердые материалы обычно имеют более высокую прочность. При этом для точной оценки прочности лучше использовать прямые методы испытания на растяжение.

2. **Предел текучести:** существует эмпирическая зависимость между твердостью по Виккерсу и пределом текучести материала. В частности, для стали можно применить приблизительное соотношение:

$$\sigma_{\text{тек}} = 0,3 \cdot HV$$

Это соотношение помогает оценить, при каком напряжении материал начнет испытывать пластическую деформацию.

3. **Износостойкость:** Твердость тесно связана с износостойкостью материала, поскольку более твердые материалы обычно имеют более высокую способность противостоять трению и износу. Это особенно важно для деталей, работающих в условиях интенсивного контакта и трения.

4. **Жесткость:** Хотя жесткость и твердость — это разные характеристики, их связь существует. Более твердые материалы обычно обладают большей жесткостью, то есть они с меньшей вероятностью деформируются при приложении внешней нагрузки.

5. **Коррозионная стойкость:** Твердость может также служить косвенным индикатором коррозионной стойкости материала. Например, более твердые материалы с высокой прочностью часто обладают лучшей стойкостью к коррозии.

#### Применение:

Метод Виккерса широко используется в материаловедении для исследования твердости металлов, сплавов, керамики и других твердых материалов, а также для контроля качества деталей и материалов с высокой точностью.

**Ультразвуковое исследование механических свойств металла** основано на применении ультразвуковых волн для оценки свойств материала, таких как прочность, жесткость и упругость [4]. Этот метод использует высокочастотные звуковые волны, кото-

рые проходят через материал, и анализирует время их прохождения и отражение от различных внутренних структур, таких как дефекты, границы зерен или фазы.

#### **Принцип работы:**

1. **Передача волн:** Ультразвуковой датчик генерирует высокочастотные звуковые волны, которые распространяются через материал.
2. **Отражение и время прохождения:** Волны отражаются от границ материала, дефектов или неоднородностей, а также могут изменять свою скорость в зависимости от плотности и упругости материала.
3. **Анализ данных:** Измеряется время прохождения волн через материал, что позволяет оценить его плотность, упругость и наличие дефектов. Эти данные используются для вычисления механических свойств, таких как модуль упругости и твердость.

**Ультразвуковое исследование** позволяет оценить несколько важных механических свойств материалов, особенно в случае контроля качества и диагностики состояния изделий. Хотя ультразвуковое исследование не всегда дает прямое измерение всех механических свойств, оно позволяет получить косвенные данные, которые могут быть использованы для оценки ряда характеристик. Вот основные механические свойства, которые можно оценить с помощью ультразвукового метода:

- **Скорость звука** в материале — напрямую связана с плотностью и упругостью металла.

$$V_{\text{прод}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad V_{\text{попер}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$V_{\text{прод}}$  - скорость продольной волны

$V_{\text{попер}}$  - скорость поперечной волны

$E$  – модуль Юнга

$G$  – модуль сдвига

$\rho$  – плотность материала

- **Модуль Юнга** (модуль упругости) — характеризует упругость материала.

$$E = V_{\text{прод}}^2 * \rho$$

- **Коэффициент Пуассона** — характеризует соотношение поперечной и продольной деформации.

$$\nu = \frac{1}{2} * \left( 3 - \frac{V_{\text{попер}}^2}{V_{\text{прод}}^2} \right)$$

- **Плотность материала** — может быть косвенно определена через скорость прохождения звуковых волн.

$$\rho = \frac{G}{V_{\text{попер}}^2}$$

Метод Виккерса и ультразвуковое исследование механических свойств металла — это два различных подхода для оценки свойств материалов, каждый из которых имеет свои особенности, преимущества и ограничения. Рассмотрим их в контексте применения для исследования механических свойств металлов.

#### **1. Сравнение измеряемых механических свойств**

- **Метод Виккерса:**

— Твердость: Метод напрямую измеряет твердость материала, которая коррелирует с его прочностью, износостойкостью и жесткостью.

— Косвенно можно оценить **предел текучести и пластичность** материала.

- **Ультразвуковое исследование:**

— Модуль упругости (модуль Юнга), плотность.

— Косвенно можно оценить предел текучести и износостойкость материала.

— Механические дефекты: Наличие трещин, пустот и других дефектов, которые могут повлиять на механические свойства.

## 2. Сравнение применения и области использования

- **Метод Виккерса:**

— Используется в лабораториях и на производственных предприятиях для тестирования твердости, особенно для материалов с высокой точностью.

— Применяется для проверки отдельных образцов, а также для сравнительных исследований в процессе разработки новых материалов.

— Применяется для испытаний в микро- и макромасштабах, включая исследование тонких пленок и покрытий.

- **Ультразвуковое исследование:**

— Неразрушающий контроль на всех этапах производства и эксплуатации. Используется для анализа крупногабаритных изделий, таких как сварные швы, трубы, корпуса судов, детали самолетов и другие компоненты.

— Широко применяется для выявления дефектов (трещины, пустоты, коррозия) и для оценки внутренней структуры.

— Применяется в реальном времени, например, для диагностики во время эксплуатации.

В таблице 1 приведено сравнение двух методов контроля механических характеристик металлов по различным параметрам оценки.

**Сравнительная таблица методов контроля**

Таблица 1

| Характеристика             | Метод Виккерса                                 | Ультразвуковое исследование                                                         |
|----------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Принцип работы</b>      | Вдавливание алмазного индентатора с нагрузкой  | Передача ультразвуковых волн и анализ их отражений                                  |
| <b>Измеряемое свойство</b> | Твердость (HV)                                 | Модуль упругости, плотность, дефекты, модуль сдвига                                 |
| <b>Применение</b>          | Лабораторные исследования твердости материалов | Неразрушающий контроль и диагностика дефектов                                       |
| <b>Преимущества</b>        | Высокая точность, простота, доступность        | Неразрушающий метод, выявление внутренних дефектов, применимость к крупным объектам |
| <b>Ограничения</b>         | Ограничение по толщине, подготовка поверхности | Косвенные данные о механических свойствах, чувствительность к геометрии             |
| <b>Типы материалов</b>     | Твердые металлы, сплавы, покрытия              | Все типы материалов, включая крупные изделия                                        |

### Заключение

Метод Виккерса и ультразвуковое исследование имеют разные области применения и являются важными инструментами для оценки механических свойств металлов. Метод Виккерса преимущественно используется для измерения твердости материалов с высокой точностью, в то время как ультразвуковое исследование позволяет выявлять дефекты и оценивать механические характеристики материала в целом, а также использоваться для контроля качества на всех этапах производства и эксплуатации. Выбор метода зависит от целей исследования и типа материала.

### **Библиографические ссылки**

9. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
10. ГОСТ 2999-75. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ. Метод измерения твердости по Виккерсу.
11. Воронков В.А. Общие вопросы неразрушающего контроля. Терминологический справочник / В.А. Воронков. – М., 2003. – 22 с.
12. Муравьев В.В., Комаров К.Л. Ультразвуковой индикатор структурных превращений ИСП-12. Новосибирск: ЦНТИ, 1993. № 181. С. 93.

© Раткин Ф.А., 2024

## КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ В ИЗДЕЛИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В. А. Татычев, А. С. Редько, В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: tatychev01@mail.ru

*Темой данной работы является контроль герметичности изделий ракетно-космической техники. Рассмотрены масс-спектрометрический и электронно-захватный методы. Проведен сравнительный анализ методов.*

*Ключевые слова:* контроль герметичности, течеискание, масс-спектрометрия, электронно-захватный метод

Контроль герметичности является одной из важнейших процедур при производстве и эксплуатации ракетно-космической техники (РКТ). Любые утечки в системах, которые должны быть герметичными, могут привести к серьезным авариям, снижению эффективности работы, а в некоторых случаях и к полному отказу техники.

Герметичность — это способность изделия или системы удерживать определенные среды (газ, жидкость) внутри себя, предотвращая их утечку наружу или попадание внешних агрессивных факторов внутрь. Для РКТ это особенно важно, так как большинство ее элементов работают в условиях вакуума космоса или высоких нагрузок и механических воздействиях.

Контроль герметичности проводится на различных стадиях — начиная от производства отдельных компонентов до сборки целых узлов и окончательного тестирования ракеты или космического аппарата. Современные методы контроля включают использование газоанализаторов, акустических методов, вакуумных камер и других высокоточных технологий, которые позволяют обеспечить максимальную надежность проверяемых систем.

Таким образом, контроль герметичности изделий РКТ является неотъемлемой частью производственного процесса и одной из ключевых составляющих безопасной и эффективной эксплуатации ракет и космических аппаратов [1, 6].

Течь — это канал или пористый участок изделия или его элементов, нарушающих их герметичность. Малые размеры сечений, неоднородность их по длине произвольно извилистых каналов не позволяют характеризовать течи геометрическими размерами. Величину течей принято определять потоками проникающих через них веществ.

Утечка  $Q$  по зазорам и микронеровностям определяется по формуле [2]:

$$Q = K \frac{B}{l} \cdot \frac{\Delta P}{\mu} \delta^3,$$

где  $K$  - коэффициент формы щели,

$B, l, \delta$  - ширина, длина, высота,

$\mu$  - коэффициент вязкости щели.

В работе рассмотрены и сравнены по эффективности, стоимости применения, точности и простоте использования два метода течеискания, основанных на различных физических принципах.



Современная техника течеискания – это область науки и техники, обеспечивающая создание и применение комплекса аппаратуры и методов контроля качества герметизации разнородных систем и изделий.

Методы течеискания различаются как по чувствительности и избирательности реакции на пробное вещество, так и принципу обнаружения пробного вещества, проникающего через течи.

Пузырьковый метод обнаружения течи — это один из первых разработанных и широко используемых, простой способ выявления утечек в системах, работающих с газами или жидкостями [2, 5]. Этот метод основан на возникновении пузырьков на поверхности, где может возникнуть утечка, и визуальном наблюдении за их образованием. Этот метод имеет несколько вариантов фиксации положения и оценки интенсивности течи.

Пузырьковый метод заключается в погружении сварной или паянной конструкции в которой с помощью воздуха создано избыточное давление (рис.1) в емкость с жидкостью. Участки течи выявляют по выделяющимся пузырькам воздуха. Если размеры сварной конструкции не позволяют поместить ее в емкость, то лицевую поверхность сварного шва покрывают пенообразующим веществом (мыльным раствором) и участки течи фиксируют по мыльным пузырькам.

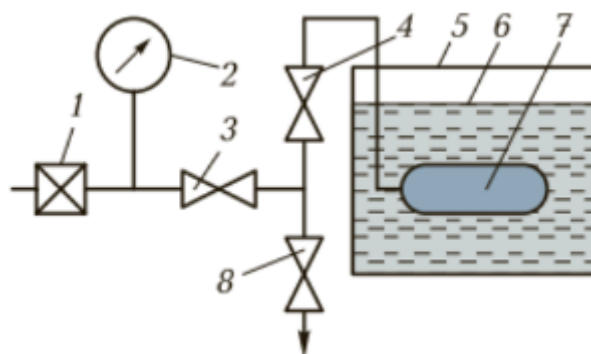


Рис. 1. Схема пузырькового метода контроля течеискания.

1 — редукционный клапан; 2 — манометр; 3 — нагнетательный клапан; 4 — предохранительный клапан; 5 — бак; 6 — жидкость; 7 — контролируемый объект; 8 — вентиль сброса давления

Путем визуального наблюдения можно быстро определить местоположение утечки. Это позволяет корректировать оборудование или систему.

Пузырьковый метод обнаружения течи представляет собой простой и эффективный способ для выявления утечек в различных системах. Несмотря на свои ограничения, он по-прежнему широко используется во многих отраслях, включая нефтегазовую, химическую и водоснабжение, благодаря своей простоте и эффективности.

Преимущества пузырькового метода:

1. Доступен и прост в использовании. Требуется лишь мыльная жидкость и, возможно, базовое оборудование для создания давления.
2. Не требует специальных знаний и может быть выполнен любым оператором.
3. Широко используется в менее строгих условиях, например, в бытовых и некоторых промышленных применениях; хорош для больших и видимых утечек.

Недостатки:

4. Предоставляет ограниченную информацию о количестве и типе газа, который может утекать; ориентирован на визуальное выявление утечек.
5. Обычно эффективен для обнаружения средних и крупных утечек, но может не реагировать на очень мелкие утечки.

Наиболее распространенным в вакуумной технике методом контроля герметичности и поиска течей является масс-спектрометрический метод, обладающий высокой чувст-

вительностью [3, 4]. Сущность метода заключается в регистрации прохождения через оболочку пробного вещества с помощью масс-спектрометра, настроенного на данное пробное вещество. Отечественной промышленностью выпускается серия масс-спектрометрических течеискателей и измерителей концентрации, настроенных на гелий. Основным элементом течеискателя является масс-спектрометрический анализатор, представляющий собой масс-спектрометр с магнитным отклонением пучка ионов.

Принцип действия демонстрируется на рис. 1, на котором показана масс-спектрометрическая камера течеискателя, предназначенного для работы с гелием в качестве пробного газа. Электроны, эмиттируемые катодом 9, попадают в камеру ионизации 8. Источник питания катода 11 подключен к анализатору через фланец 10. В случае негерметичности вакуумной системы, в связи с утечкой газа из контролируемого изделия, молекулы гелия через фланец 5 проникают в камеру ионизации. Положительные ионы гелия ускоряющим напряжением направляются в камеру магнитного анализатора 6. Ускоряющее напряжение  $E_y$  и магнитная индукция  $B$  подбираются таким образом, чтобы ионы гелия, прошедшие через входную щель 7, двигаясь по траектории 4, попали в выходную щель 2. Остаточные газы по траектории 3 разряжаются на стенках анализатора.

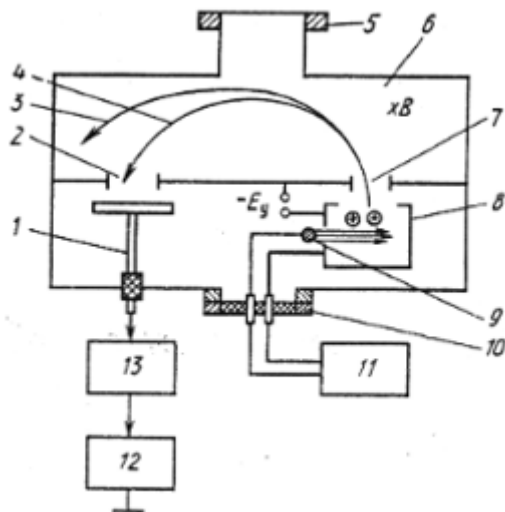


Рис. 1. Масс-спектрометрическая камера течеискателя.

- 1 – коллектор ионов; 2 – выходная щель камеры; 3, 4 – траектории движения ионов;  
5 – входной фланец; 6 – камера магнитного анализатора; 7 – входная щель камеры;  
8 – камера ионизации; 9 – катод; 10 – фланец подключения источника питания;  
11 – источник питания; 12 – блок измерения ионного тока; 13 – усилитель сигнала

Коллектор ионов 1 соединяется с электрометрическим каскадом 13, усиливающим падение напряжения на высокоомном сопротивлении. Блок измерения ионного тока 12 после дополнительного усиления выходного сигнала электрометрического каскада выводит результаты измерений на стрелочный прибор или самописец.

Контроль герметичности может производиться методами локального поиска негерметичности, а также методами контроля суммарной негерметичности изделия.

К методам локального поиска относятся:

1. Метод щупа
2. Метод обдува
3. Метод вакуумных присосок
4. Метод местных камер внешнего давления

К методам контроля суммарной негерметичности относятся:

1. Метод вакуумирования (контролируемый объект заполняется пробным газом под давлением, затем снаружи объекта создается вакуум с помощью вакуумной камеры).

2. Метод с использованием камеры внешнего давления (снаружи контролируемого объекта создается давление пробным газом, с помощью камеры внешнего давления, во внутренней полости изделия создается вакуум с помощью специальных вакуумных насосов)

Принцип работы электронно-захватного метода контроля герметичности (ЭЗК) основан на использовании специализированного электронного захватного детектора, который реагирует на молекулы определённых газов, например, галогеносодержащих (таких как фреон). Эти газы обычно добавляются в проверяемую систему в качестве тестового или индикаторного вещества, если они не являются её рабочей средой.

Электронно-захватный детектор – это прибор, использующий явление захвата электронов газовыми молекулами (рис. 2). Принцип работы детектора включает несколько ключевых этапов:

1. Создание потока электронов:

Внутри детектора создается поток медленных (тепловых) электронов. Это достигается за счет ионизации газовой среды под действием радиоактивного излучения, например, от источника никеля-63 (Ni-63).

2. Захват электронов молекулами тестового газа:

Когда молекулы индикаторного газа (обычно галогеносодержащего) попадают в область действия электронного потока, они захватывают электроны, превращаясь в отрицательно заряженные ионы. Галогеновые молекулы обладают высокой электроотрицательностью, что делает их способными эффективно захватывать свободные электроны.

3. Измерение изменения тока:

Образовавшиеся отрицательные ионы приводят к изменению количества свободных электронов в детекторе, что вызывает уменьшение силы тока. Это уменьшение пропорционально концентрации газа в окружающей среде. Таким образом, по изменению тока можно судить о наличии и уровне утечки газа.

Для проверки герметичности системой с использованием электронно-захватного метода обычно делается следующее:

В закрытую систему подается индикаторный газ под давлением, если это позволяет конструкция. Электронно-захватный детектор размещают вдоль потенциально уязвимых участков системы, таких как стыки, соединения и уплотнения. Если герметичность нарушена, индикаторный газ начнет просачиваться из системы, и его молекулы захватит детектор. В случае утечки концентрация газа увеличивается, и детектор фиксирует это как отклонение в силе тока, выдавая сигнал о наличии утечки.

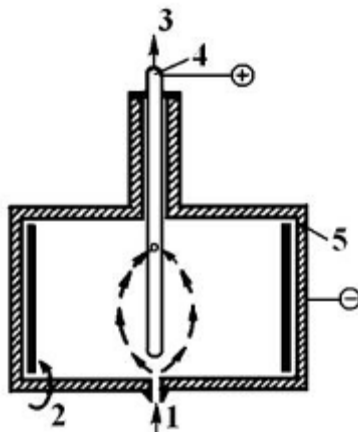


Рис. 2. Схема электронно-захватного детектора.

1 – ввод газа; 2 – источник излучения; 3 – вывод в атмосферу; 4, 5 – электроды.

Подводя итог, на основе сравнительного анализа можно сделать следующие выводы. Масс-спектрометрический течеискатель:

Чаще всего используют метод с гелием как индикаторным газом. Прибор измеряет утечки газа на основе разности масс ионов. Масс-спектрометрические течеискатели, такие как ТИ 1-50И, обеспечивают высокую точность и позволяют выявлять микроскопические утечки.

Преимущества:

Высокая чувствительность: течеискатели могут обнаруживать утечки до уровня  $10^{-11}$  Вт, что делает их пригодными для систем с особо высокими требованиями к герметичности, например, в вакуумных системах.

Гибкость в газах: хотя гелий — самый часто используемый газ, некоторые модели позволяют работать с другими газами при соответствующих настройках.

Недостатки:

Высокая сложность: течеискатели масс-спектрометрического типа обычно сложны в использовании, требуя специализированного обслуживания и квалифицированного персонала.

Электронно-захватный детектор:

Электронно-захватный детектор работает на основе захвата электронов галогенсодержащими газами (например, элегазом, фреонами), что вызывает изменение потока тока и позволяет регистрировать малые концентрации таких газов.

Преимущества:

Высокая чувствительность к галогенсодержащим газам: ЭЗД позволяет обнаруживать очень низкие концентрации индикаторных газов до  $10^{-8}$  Вт, что делает его полезным для систем, использующих фреон, элегаз и другие галогенсодержащие вещества.

Недостатки:

Ограниченность по типу газа: электронно-захватный детектор работает только с галогенсодержащими газами и не подходит для других типов утечек, например, для гелия.

Ниже точность: хотя Электронно-захватный детектор очень чувствителен, его точность ниже, чем у масс-спектрометрического течеискателя.

Экономичность и объем оборудования на рынке: электронно-захватные детекторы высокой точности, способные регистрировать утечку до  $10^{-10}$  Вт стоят больше, чем масс-спектрометрические течеискатели. Данное оборудование находится в дефиците в связи с малым количеством производителей, что затрудняет возможность приобретения.

### Библиографические ссылки

13. Баев, Б. Г., Попов, В. А. Методы контроля герметичности изделий. — М.: Машиностроение, 2008. С. 124.

14. Запунный А.И. и др. Контроль герметичности конструкций, Киев: Техника, 1976. С. 152.

15. Лебедев, С.А. Электроннозахватные методы диагностики. - М.: Энергия, 2021.с. 78.

16. Соловьёв, А. И. Масс-спектрометрические методы контроля герметичности. Журнал Неразрушающий контроль и диагностика, 2021, № 4.с. 46-52

17. Тарасов, Ю. Г. Контроль утечек в вакуумных системах. Журнал Вакуумная техника и технологии, 2020, № 3. с. 126-34

18. ГОСТ 24054-80 Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования.

© Татычев В. А., Редько А. С., Журавлев В. Ю., 2024

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ

Л.Д. Школьников

Научный руководитель – В.Ю Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: leonid.shkolnikoff@yandex.ru

*Статья посвящена сравнительному изучению возможностей и ограничений рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и инфракрасной спектроскопии (ИКС) как методов неразрушающего контроля химического состава. Рассматриваются теоретические основы методов, их применимость к различным типам материалов, чувствительность, точность, а также практические аспекты использования в промышленности и научных исследованиях.*

*Ключевые слова: методы неразрушающего контроля, химический состав материалов, рентгенофлуоресцентный анализ, инфракрасная спектроскопия, анализ материалов, спектральный анализ, технологический контроль*

Неразрушающий контроль (НК) химического состава материалов играет ключевую роль в современной науке и промышленности, обеспечивая точное и безопасное исследование свойств веществ без их повреждения. Это особенно важно в таких отраслях, как металлургия, фармацевтика, контроль качества продукции, охрана окружающей среды и многие другие. Среди методов НК значительное внимание уделяется рентгенофлуоресцентному анализу (РФА) и инфракрасной спектроскопии (ИКС).

Одним из наиболее эффективных методов анализа, позволяющих за минимальный период времени получить наиболее полную и достоверную информацию об элементном составе сложных образцов независимо от их агрегатного состояния и происхождения, является рентгенофлуоресцентная спектрометрия (РФС) [1, 3].

Этот метод позволяет одновременно определять более 80 элементов от бора до урана и может быть использован для контроля содержания, как элементов матрицы, так и микропримесей элементов в различных по составу материалах. Неоспоримым достоинством метода РФС, выгодно выделяющим его от большинства современных методов исследования, является возможность получения данных о составе сложного материала без его разрушения, с сохранением полного комплекса его физико-химических свойств, что особенно важно при работе с дорогостоящими и новыми экспериментальными образцами.

Важным является возможность реализации в методе РФС безэталонного анализа, что исключает необходимость использования стандартных образцов, приготовление которых зачастую представляет сложную проблему аналитической химии особенно для микрограммовых количеств веществ.

Конструктивные особенности современных рентгенофлуоресцентных спектрометров дают возможность проводить анализ не только в стационарных лабораторных условиях, но и непосредственно в технологическом процессе, что исключает многие проблемы, связанные с отбором, подготовкой и хранением проб анализируемых материалов. Сочетание всех указанных выше достоинств метода РФС делает его незаменимым для анализа материалов, используемых в металлургии и медицине, веществ высокой степени

чистоты, применяемых в оптике и оптоэлектронике, материалов для микроэлектроники и современных инновационных технологий.

**РФА** основан на возбуждении характеристического рентгеновского излучения атомов в образце и позволяет определять элементный состав материала. Этот метод отличается высокой чувствительностью и скоростью анализа, что делает его незаменимым для изучения твердых, жидких и порошкообразных образцов.

При облучении материал рентгенами происходит эксцитация внутренних электронов атомов, что приводит к их выбиванию. В результате образуются рентгеновские флуоресцентные лучи, которые имеют характерные энергии, соответствующие элементам в образце. Измеряя интенсивность и энергии этих флуоресцентных линий, можно определить количественный и качественный состав материала [2, 4].

В зависимости от природы возникновения рентгеновских лучей различают *тормозное и характеристическое излучение*.

*Тормозное излучение* появляется при торможении заряженных частиц высокой энергии.

Электроды трубки (анод и катод) подключаются к источнику высокого напряжения – в несколько тысяч вольт. Под действием такого напряжения электроны, испущенные раскаленной нитью катода, ускоряются до большой энергии и попадают на анод. При прохождении ускоренного электрона через материал анода происходит его торможение в результате взаимодействия с электрическими полями электронов и ядер атомов анода. При каждом соударении электрон тормозится, при этом утраченная кинетическая энергия испускается в виде рентгеновского фотона.

*Характеристическое излучение* является результатом высокоэнергетических переходов электронов в электронных оболочках атомов.

При облучении анода электронами наряду со сплошным рентгеновским спектром возникает излучение, которое специфично для материала анода. Это излучение было названо характеристическим. Согласно Бору электроны атома находятся на К, L, M, N и т.д. оболочках. Если в оболочке содержится меньшее число электронов, то говорят, что она не заполнена или в оболочке имеются электронные вакансии – «дырки». Дырка может быть заполнена, если один из внешних электронов перейдет на оболочку с дыркой. При переходе, согласно теории атома Бора, испускается квант энергии. Характеристическое рентгеновское излучение по Бору-Косселю, как раз и обусловлено переходами электронов между внутренними оболочками атома.

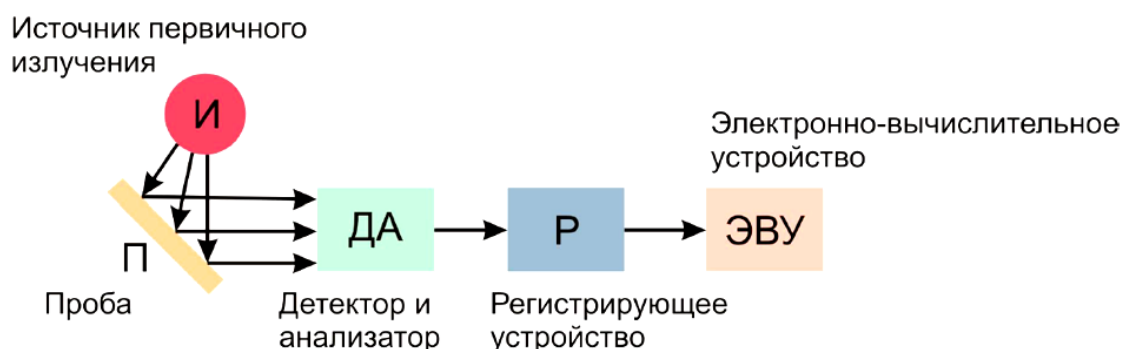


Рис.1 Структурная схема РФ-спектрометра

**Инфракрасная спектроскопия** (колебательная спектроскопия, средняя инфракрасная спектроскопия, ИК-спектроскопия, ИКС) — раздел спектроскопии, изучающий взаимодействие инфракрасного излучения с веществами.

При пропускании инфракрасного излучения через вещество происходит возбуждение колебательных движений молекул или их отдельных фрагментов. При этом наблюдается ослабление интенсивности излучения, прошедшего через образец. Однако по-

поглощение происходит не во всём спектре падающего излучения, а лишь при тех длинах волн, энергия которых соответствует энергиям возбуждения колебаний в изучаемых молекулах. Следовательно, длины волн (или частоты), при которых наблюдается максимальное поглощение ИК-излучения, могут свидетельствовать о наличии в молекулах образца тех или иных функциональных групп и других фрагментов, что широко используется в различных областях химии для установления структуры соединений.

**ИРА**, базируется на измерении поглощения инфракрасного излучения молекулами вещества. Он предоставляет информацию о молекулярной структуре и химических связях, что делает его особенно полезным для анализа органических соединений и полимеров.

Когда инфракрасные лучи проходят через материал, они взаимодействуют с молекулами, вызывая их вибрацию. Каждое химическое соединение имеет уникальный спектр поглощения, который соответствует определенным вибрационным переходам. Анализируя поглощенные длины волн, можно идентифицировать состав вещества. ИРА использует инфракрасное излучение для анализа химического состава.

Каждый тип связей имеет индивидуальную комбинацию атомных масс и прочности связи и, следовательно, собственную частоту колебаний и поглощает ИК - излучение характерной для него частоты (длины волны). С помощью прибора, который позволяет облучать вещество ИК-светом разной длины волны, можно определить длины волн, на которых происходит поглощение.

Схема лабораторной установки для инфракрасной спектроскопии включает основные элементы, которые обеспечивают генерацию, направленное распространение, взаимодействие ИК-излучения с образцом и регистрацию сигнала.

В качестве источников излучения в ИК-спектроскопии в основном используется штифт Нернста и силитовый стержень.

Штифт Нернста - это стержень сечением 1,5-2 мм и длиной 30 мм, состоящий из смеси окислов циркония, тория, церия и др. Этот источник дает интенсивное излучение в средней ИК- области (от 5 до 16 мк).

Другой источник - силитовый стержень - длиной 10 см изготавливается из карбида кремния. Дает интенсивное излучение в области больше 16 мк, а в близкой и средней области интенсивность излучения меньше, чем у штифта Нернста.

Несмотря на схожесть целей, РФА и ИКС имеют различные физические основы, преимущества и ограничения, что обуславливает их применение в различных условиях и задачах.

#### **Итоги:**

В ходе проведенного сравнительного анализа методов неразрушающего контроля химического состава материалов — рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и инфракрасной спектроскопии (ИКС) — были выявлены их основные преимущества, ограничения и области применения. РФА продемонстрировал высокую точность и чувствительность при определении элементного состава, особенно для тяжелых элементов, что делает его предпочтительным для анализа неорганических материалов и металлических сплавов. В то же время ИКС показал себя эффективным методом для определения функциональных групп и молекулярной структуры, особенно в органических и полимерных материалах.

Оба метода обладают высокой скоростью анализа и минимальными требованиями к подготовке образцов, что делает их универсальными инструментами в современной аналитической практике. Однако их применение во многом зависит от природы анализируемого материала и целей исследования. Важно отметить, что сочетание этих методов может обеспечить более полную характеристику материала благодаря их взаимодополняющим возможностям.

Таким образом, выбор метода неразрушающего контроля должен основываться на конкретных задачах анализа, требуемой точности и характеристиках исследуемого объекта. Проведенное исследование подтверждает, что как рентгенофлуоресцентный анализ, так и инфракрасная спектроскопия остаются востребованными инструментами в различных отраслях науки и промышленности.

#### **Библиографические ссылки**

1. Рентгенофлуоресцентный анализ твёрдых плёнок и покрытий / Ю. А. Игнатов, А. Н. Еритенко, А. Г. Ревенко, А. Л. Цветянский // Аналитика и контроль. – 2011. – Т. 15, № 2. – С. 126-140. – EDN NUCXSN.
2. Осколок, К. В. Возбуждение рентгеновской флуоресценции тонкопленочных образцов тормозным излучением: обобщение и аналитические возможности монохроматического приближения / К. В. Осколок, О. В. Моногарова // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. – 2008. – Т. 49, № 4. – С. 251-258. – EDN JUUEAB.
3. Павлинский, Г. В. Программа расчета интенсивностей аналитических линий рентгеновского спектра флуоресценции / Г. В. Павлинский, Ю. И. Величко, А. Г. Ревенко // Заводская лаборатория. – 1977. – Т. 43, № 4. – С. 433-436. – EDN ZVTIAB.
4. Афонин В.П., Гуничев Т.Н., Пискунова Л.Ф. Рентгенофлуоресцентный силикатный анализ. – Новосибирск: Наука, 1984

© Школьников Л.Д., 2024



## ИСПЫТАНИЕ ЛОПАТОК ТУРБИН НА ВИБРОПРОЧНОСТЬ И ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ

В. Ю. Панасенко

Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: [hokinvadim@gmail.com](mailto:hokinvadim@gmail.com)

*Вибрационный метод при испытании лопаток турбин, рассматривается с целью определения собственных частот и форм колебаний лопаток, а также оценки их прочности и устойчивости к вибрациям в условиях работы турбины*

*Ключевые слова: Вибрационный метод, лопатки турбин, частота и колебания лопаток.*

Вибрационное испытание является неразрушающим методом оценки целостности и рабочих характеристик лопаток турбин. Оно основано на принципе возбуждения лопатки на ее собственных резонансных частотах и измерения ее отклика на эти возбуждения [1, 4].

Вибрационный метод испытания - это неразрушающий метод оценки целостности и свойств материалов и конструкций путем применения механических вибраций [2, 3, 5].

Принцип вибрационного метода испытания основан на анализе реакции объекта на внешние вибрации. Объект закрепляется в испытательном стенде, и к нему прикладываются вибрации контролируемой частоты и амплитуды. Отклик объекта на вибрации измеряется и анализируется для определения его динамических характеристик, таких как частота собственных колебаний, коэффициент затухания и форма колебаний.

### • **Типы вибрационных испытаний**

Существует множество типов вибрационных испытаний, каждый из которых имеет свое назначение:

\* Синусоидальные вибрационные испытания: Используются для оценки резонансных частот и прочности конструкций при воздействии синусоидальных вибраций.

\* Случайные вибрационные испытания: Симулируют реальные условия эксплуатации, в которых объекты подвергаются случайным вибрациям.

\* Модальные испытания: Используются для определения форм и частот собственных колебаний конструкций.

\* Вибрационные испытания на усталость: Оценивают способность конструкций выдерживать повторяющиеся вибрационные нагрузки в течение длительного времени.

\* Акустические вибрационные испытания: Исследуют акустические характеристики материалов и конструкций.

1) **Синусоидальные вибрационные испытания** — это метод испытаний, который используется для оценки устойчивости и надежности различных изделий и компонентов при воздействии вибрационных нагрузок. Эти испытания позволяют выявить возможные дефекты и слабые места в конструкции, которые могут проявиться при эксплуатации.

**Основные аспекты синусоидальных вибрационных испытаний:**

1. **Принцип работы:** В процессе испытаний на образец воздействуют синусоидальные колебания с заданной частотой и амплитудой. Это позволяет имитировать условия, которые могут возникнуть в реальных эксплуатационных условиях.
2. **Параметры испытаний:**
  - **Частота:** Обычно варьируется в диапазоне от нескольких герц до нескольких килогерц.
  - **Амплитуда:** Определяется в зависимости от требований к испытаниям и характеристик испытываемого изделия.
  - **Продолжительность:** Время, в течение которого изделие подвергается вибрационным нагрузкам.
3. **Оборудование:** Для проведения синусоидальных вибрационных испытаний используется специальное оборудование, такое как вибростенды или вибрационные установки, которые могут точно контролировать параметры нагрузки.
4. **Цели испытаний:**
  - Проверка прочности и надежности изделий.
  - Выявление возможных конструктивных недостатков.
  - Оценка влияния вибраций на функциональность и долговечность оборудования.
5. **Применение:** Синусоидальные вибрационные испытания широко применяются в различных отраслях, включая авиацию, автомобилестроение, электронику и другие высокотехнологичные области.
6. **Анализ результатов:** После проведения испытаний результаты анализируются для определения, выдерживает ли изделие заданные вибрационные нагрузки, и выявления возможных повреждений или изменений в характеристиках.

2) **Случайные вибрационные испытания** — это метод испытаний, используемый для оценки устойчивости и надежности изделий и компонентов под воздействием случайных вибрационных нагрузок. Эти испытания позволяют смоделировать реальные условия эксплуатации, когда вибрации могут быть непредсказуемыми и изменяться по частоте и амплитуде.

**Основные аспекты случайных вибрационных испытаний:**

1. **Принцип работы:** В отличие от синусоидальных испытаний, где применяется фиксированная частота и амплитуда, в случайных вибрационных испытаниях используются случайные сигналы, которые могут имитировать реальные условия эксплуатации, такие как дорожные вибрации для автомобилей или вибрации от работы двигателей в авиации.
2. **Спектр вибраций:** Случайные вибрации описываются с помощью спектра, который определяет распределение энергии по частотам. Часто используется спектр мощности, который показывает, как энергия распределяется в частотной области.
3. **Параметры испытаний:**
  - **Уровень мощности:** Определяет общую интенсивность вибрации.
  - **Частотный диапазон:** Указывает, в каком диапазоне частот будут проводиться испытания.
  - **Длительность испытаний:** Время, в течение которого изделие подвергается воздействию случайных вибраций.
4. **Оборудование:** Для проведения случайных вибрационных испытаний используются специальные вибростенды и генераторы случайных сигналов, которые могут точно воспроизводить заданные спектры вибраций.
5. **Цели испытаний:**
  - Оценка прочности и надежности изделий в условиях случайных нагрузок.
  - Выявление возможных конструктивных недостатков, которые могут проявиться под воздействием случайных вибраций.

- Оценка долговечности и функциональности изделий в условиях реальной эксплуатации.
- 6. **Анализ результатов:** После проведения испытаний результаты анализируются для определения способности изделия выдерживать случайные вибрационные нагрузки. Это может включать в себя анализ частотных характеристик, визуальный осмотр на наличие повреждений и оценку изменений в функциональности.

3) **Модальные испытания** — это метод испытаний, используемый для определения динамических характеристик структур и механических систем. Эти испытания позволяют исследовать, как объект реагирует на вибрации и колебания, а также выявить его модальные параметры, такие как частоты собственных колебаний, формы колебаний и затухания.

**Основные аспекты модальных испытаний:**

1. **Принцип работы:** Модальные испытания проводятся путем возбуждения объекта с помощью внешних сил (например, удара или вибрации) и измерения его ответной реакции. Это позволяет определить, как объект будет вести себя при различных частотах.
2. **Модальные параметры:**
  - **Частоты собственных колебаний:** Частоты, на которых система естественным образом колеблется.
  - **Формы колебаний:** Геометрическое распределение деформаций в структуре при каждой из частот собственных колебаний.
  - **Затухание:** Характеристика, описывающая, как быстро уменьшается амплитуда колебаний со временем.
3. **Методы проведения:**
  - **Ударный метод:** Объект подвергается удару, и регистрируются его ответные колебания.
  - **Вибрационный метод:** Используются вибрационные установки для возбуждения объекта в заданном диапазоне частот.
  - **Лазерная интерферометрия:** Применяется для высокоточного измерения деформаций и вибраций на поверхности объекта.
4. **Оборудование:** Для модальных испытаний используются различные измерительные приборы, такие как акселерометры, микрофоны, камеры и лазерные системы, которые фиксируют динамические характеристики объекта.
5. **Цели испытаний:**
  - Определение динамических характеристик конструкции для проектирования и оптимизации.
  - Выявление потенциальных проблем, таких как резонанс, который может привести к разрушению.
  - Проверка соответствия конструкции заданным требованиям и стандартам.
6. **Анализ результатов:** Результаты модальных испытаний анализируются с помощью методов обработки сигналов и математического моделирования. Это позволяет создать точные модели динамического поведения конструкции и предсказать ее реакцию на внешние воздействия.

4) **Вибрационные испытания на усталость** — это метод испытаний, который используется для оценки прочности и долговечности материалов и конструкций под воздействием циклических вибрационных нагрузок. Эти испытания помогают определить, как долго изделие может выдерживать условия эксплуатации, прежде чем произойдет усталостное разрушение.

**Основные аспекты вибрационных испытаний на усталость:**

1. **Принцип работы:** В процессе испытаний объект подвергается циклическим вибрациям, которые могут имитировать реальные условия эксплуатации. Эти нагрузки могут быть синусоидальными, случайными или пульсирующими и применяются в течение определенного времени или числа циклов.
2. **Цели испытаний:**
  - Определение предела усталости материала или конструкции.
  - Оценка времени до разрушения при заданных условиях вибрации.
  - Выявление потенциальных слабых мест и конструктивных недостатков, которые могут привести к усталостному разрушению.
3. **Методы проведения:**
  - **Синусоидальные испытания:** Объект подвергается постоянным синусоидальным вибрациям с заданной частотой и амплитудой.
  - **Случайные вибрации:** Используются случайные сигналы для моделирования реальных условий эксплуатации, что позволяет более точно оценить поведение конструкции.
  - **Ударные испытания:** Включают резкие удары для проверки устойчивости объекта к внезапным нагрузкам.
4. **Оборудование:** Для проведения вибрационных испытаний на усталость используются вибростенды, генераторы сигналов, системы измерения деформаций и акселерометры для мониторинга реакции объекта.
5. **Анализ результатов:**
  - Результаты испытаний анализируются для определения числа циклов до разрушения и выявления механизма усталостного разрушения.
  - Используются методы обработки данных и статистического анализа для оценки долговечности и надежности конструкции.
6. **Применение:** Вибрационные испытания на усталость широко применяются в различных отраслях, таких как:
  - **Авиация:** Для оценки долговечности компонентов самолетов и вертолетов.
  - **Автомобилестроение:** Для проверки устойчивости автомобилей к дорожным вибрациям.
  - **Электроника:** Для тестирования надежности электроники и компонентов под воздействием вибраций.

5) **Акустические вибрационные испытания** — это метод, используемый для оценки динамических характеристик материалов и конструкций через анализ их реакции на акустические или вибрационные нагрузки. Эти испытания помогают выявить механизмы разрушения, определять прочность и долговечность изделий, а также проверять их соответствие требованиям.

**Основные аспекты акустических вибрационных испытаний:**

1. **Принцип работы:**
  - Испытания проводятся путем возбуждения объекта с помощью звуковых волн или механических вибраций. Это может быть сделано с использованием различных источников звука, таких как динамики или ударные устройства.
  - Реакция объекта на возбуждение фиксируется с помощью микрофонов, акселерометров или других датчиков.
2. **Цели испытаний:**
  - Определение модальных параметров, таких как частоты собственных колебаний и формы колебаний.
  - Выявление резонансных частот, при которых объект может испытывать максимальные деформации.

- Оценка акустических свойств материалов, таких как звукопоглощение и звукоизоляция.

### 3. Методы проведения:

- **Акустическая эмиссия:** Метод, основанный на регистрации звуковых волн, возникающих в процессе механических деформаций. Это позволяет выявить ранние признаки усталостного разрушения.
- **Лазерная акустика:** Использует лазеры для возбуждения и измерения колебаний, обеспечивая высокую точность и чувствительность.
- **Импульсный метод:** Объект подвергается короткому импульсу звука или вибрации, и анализируется его ответ.

### 4. Оборудование:

- Используются специализированные акустические датчики, микрофоны, виброметры, а также системы обработки сигналов для анализа данных.
- Компьютерные программы для обработки и визуализации результатов испытаний.

### 5. Анализ результатов:

- Результаты испытаний могут быть проанализированы с использованием методов обработки сигналов, таких как спектральный анализ и временные ряды.
- Это позволяет выявить характеристики колебаний и оценить влияние различных факторов на динамическое поведение конструкции.

### 6. Применение:

- **Строительство:** Оценка акустических характеристик зданий и конструкций для обеспечения звукоизоляции.
- **Авиация и автомобилестроение:** Анализ вибрационных характеристик компонентов для повышения надежности и долговечности.
- **Электроника:** Тестирование компонентов на устойчивость к вибрациям и акустическим воздействиям.

#### • *Преимущества вибрационного метода испытания*

\* Неразрушающий: Не требует повреждения или разрушения объекта.

\* Быстрый и эффективный: Позволяет быстро оценивать динамические характеристики.

\* Может быть автоматизирован: Может выполняться автоматически, что экономит время и ресурсы.

\* Подходит для различных материалов и конструкций: Может применяться к широкому спектру материалов, включая металлы, композиты и жидкости.

### *Процедура испытания*

1. Подготовка: Лопатка закрепляется в специальном приспособлении, обеспечивающем ее свободные колебания.

2. Возбуждение: К лопатке прикладывается переменная сила или момент, возбуждающий ее колебания. Обычно используется электродинамический вибратор или электромагнит.

3. Измерение отклика: Отклик лопатки измеряется с помощью датчиков вибрации, размещенных на ее поверхности или вблизи нее.

4. Анализ данных: Собранные данные анализируются для определения резонансных частот, форм колебаний и коэффициентов затухания лопатки.

### *Интерпретация результатов*

Результаты вибрационного испытания интерпретируются следующим образом:

\* Собственные резонансные частоты: Указывают на жесткость и массу лопатки. Снижение резонансной частоты может указывать на потерю жесткости, например, из-за трещин.

\* Формы колебаний: Описывают, как лопатка колеблется при каждой резонансной частоте. Изменения в формах колебаний могут указывать на наличие повреждений или ослабленных участков.

\* Коэффициенты затухания: Указывают на количество энергии, рассеиваемой лопаткой во время колебаний. Увеличение затухания может указывать на наличие трения или демпфирующих механизмов.

#### ***Преимущества вибрационного испытания***

\* Неразрушающий метод, который не повреждает лопатку.

\* Может обнаружить скрытые повреждения, которые не видны при визуальном осмотре.

\* Быстрый и эффективный метод, который можно использовать для массового тестирования.

\* Позволяет оценить динамические характеристики лопатки и прогнозировать ее поведение в реальных условиях эксплуатации.

#### ***Недостатки вибрационного испытания***

\* Требуется специализированное оборудование и квалифицированный персонал.

\* Может быть сложным для интерпретации результатов в некоторых случаях.

\* Может не обнаружить все типы повреждений, например, поверхностные трещины.

#### ***Применение***

##### ***Вибрационное испытание широко используется для:***

\* Контроля качества новых лопаток турбин

\* Обслуживания и ремонта лопаток турбин в эксплуатации

\* Исследования и разработки новых конструкций лопаток турбин

В состав виброустановки входят (рис. 1): вибростенд (вибровозбудитель) 4, преобразующий энергию любого вида в энергию механических колебаний (в вибрацию); генератор 2 испытательных (управляющих) сигналов, создающий управляющее воздействие на вибростенд, соответствующее данному характеру вибрации и режиму испытаний; усилитель мощности 3, предназначенный для получения требуемого значения вынуждающей силы.

В конструкцию вибростенда входит как неподвижная часть, и подвижная система, совершающая вибрационное движение. Устойчивое равновесие и ориентацию подвижной системы относительно неподвижной части обеспечивает система подвески. Испытуемое изделие устанавливается и закрепляется для передачи ему вибрации на конструктивной части подвижной системы, называемой вибростолом 5.

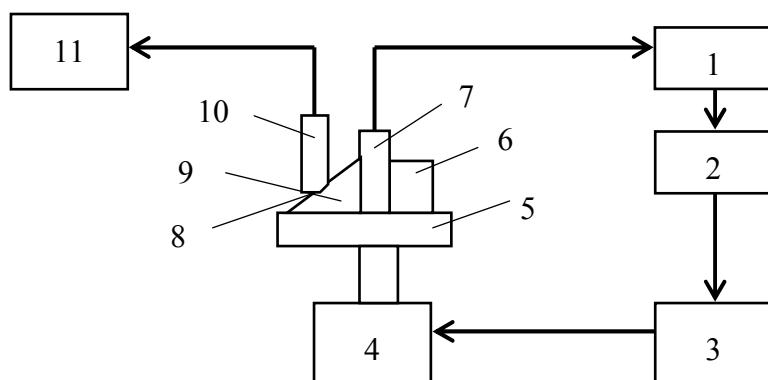


Рис. 1. Схема виброустановки

Различают две основные точки: контрольную и измерительную. 1. Контрольная точка 6 располагается в том месте, относительно которого должно проводиться измерение

значений параметров вибрации испытуемого изделия (на столе вибростенда, на приспособлении, на самом изделии), причем она должна находиться как можно ближе к одной из точек крепления и быть с ней жестко связанной. Сигнал с ВИП (виброизмерительный преобразователь) 7, расположенного в контрольной точке, используется в системе управления 1, обеспечивающей поддержание значений параметров вибрации на определенном уровне.

Измерительная точка 8 располагается в том месте испытуемого изделия 9, где значения параметров вибрации определяют исход испытаний. В точку 8 помещают ВИП 10, сигнал с которого подводится к средствам измерения, анализа и обработки полученных данных 11. Таким образом, результаты испытаний оцениваются значениями параметров вибрации, полученными в измерительной точке при условии обеспечения заданных значений в контрольной точке.

### Библиографические ссылки

1. Методика непрерывного контроля вибрационного состояния рабочих лопаток турбомашин / К. Н. Боришанский, Б. Е. Григорьев, С. Ю. Григорьев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2000. – № 5. – С. 46-51. – EDN XWRGSD.

2. Ножницкий, Ю. А. Экспериментальные исследования прочностной надежности перспективных газотурбинных двигателей / Ю. А. Ножницкий, Б. А. Балуюев, Ю. А. Федина // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т. 19, № 3(69). – С. 3-14. – EDN WAGOFH.

3. Развитие методов исследования колебаний лопаток рабочих колес турбомашин при стендовых испытаниях / С. Ю. Данилкин, В. В. Шкуров, Т. И. Мазикина [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2019. – Т. 23, № 2(84). – С. 17-25. – EDN VIDKOD.

4. Патент № 2673950 С1 Российская Федерация, МПК G01M 15/14. Способ определения форм колебаний вращающихся колес турбомашин : № 2018102100 : заявл. 19.01.2018 : опубл. 03.12.2018 / В. Г. Селезнев, И. Ю. Головченко ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова". – EDN PVORBR.

5. Экспериментально-расчетные исследования эффективности различных способов демпфирования колебаний деталей газотурбинных двигателей / Б. Ф. Шорр, Н. Н. Серебряков, А. Н. Стадников [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2015. – Т. 14, № 3-1. – С. 171-182. – DOI 10.18287/2412-7329-2015-14-3-171-182. – EDN UXWGGR.

© Панасенко В. Ю., 2024

## БЕЗНАСОСНЫЙ СПОСОБ ГИДРОИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ

И.Я. Шестаков, С.А. Ходенков, Е.Н. Тимофеев, В.И. Шестаков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

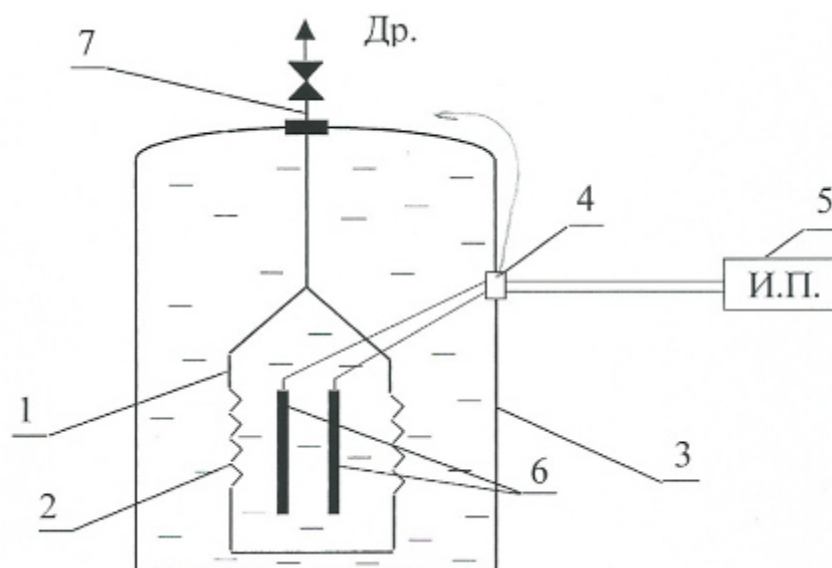
E-mail: [yakovlevish@mail.ru](mailto:yakovlevish@mail.ru)

*В работе представлена схема безнасосных гидроиспытаний с электролизом в замкнутом объеме, описаны принцип и условия ее работы. Показаны преимущества предложенной схемы по сравнению с традиционным способом проведения гидростатических испытаний.*

*Ключевые слова:* гидростатическое испытание, электролиз, герметичность резервуара, создание давления.

Развитие технологий в ракетно-космической отрасли неразрывно связано с постоянным совершенствованием методов контроля и испытаний. Эффективность и точность таких процессов имеют ключевое значение для обеспечения надёжности полетов и успеха миссий [1, 2].

Гидростатическое испытание. Резервуар заполняется водой или другой жидкостью до определённого уровня, а затем создаётся давление, которое должно быть выдержано в течение определённого периода времени. При этом проверяется герметичность резервуара и его способность выдерживать давление без утечек или деформаций. Для создания высокого давления (более 10 МПа) применяются мультипликаторы – дорогостоящее и громоздкое оборудование.



**Рис. 1. Безнасосная схема гидроиспытаний:**

**1 – герметичная емкость; 2 – мембрана; 3 – испытуемый объект; 4 – герметичный ввод; 5 – источник питания; 6 – электроды; 7 – труба стальная с клапаном электромагнитным для сброса давления**



При электролизе в замкнутом объеме теоретически можно получить давление 180 МПа [3, 4]. Для реализации этого способа необходимо постоянное напряжение в диапазоне 2-10 В. Сила тока зависит от величины испытываемого объема и требуемой скорости роста давления и составляет единицы или десятки ампер. В качестве рабочей жидкости желательно использовать водный раствор гидроокиси калия или натрия 20-25 % по массе. Если не допускается контакт щелочного водного раствора с металлом, то можно использовать герметичную емкость с мембраной или эластичный материал этой емкости (резина и др.). Схема испытаний представлена на рисунке 1.

Основным элементом схемы является герметичная емкость 1 с мембраной 2. Емкость 1 устанавливается внутри испытываемого объекта 3. Через токоввод 4 от источника тока 5 на электроды 6 подается постоянное напряжение. Перед испытанием емкость 1 заполняется водным раствором щелочи (KOH или NaOH). За счет электролиза на электродах выделяются газы  $H_2$  и  $O_2$ , которые создают давление в емкости 1 и в объекте 3. Скорость нарастания давления зависит от жесткости испытываемого объекта 3 и количества оставшихся воздушных полостей в этом объекте. При отсутствии воздушных полостей скорость нарастания давления легко изменить за счет величины подаваемого напряжения. Для сброса давления используется труба 7 с клапаном. Выброс газов из емкости 1 необходимо осуществлять за пределы помещения.

### Библиографические ссылки

1. Рожкова, Е. А. Методы контроля и испытаний, применяемые на предприятиях, изготавливающие изделия повышенной точности / Е. А. Рожкова, А. В. Кустов // Механика XXI века. – 2023. – № 22. – С. 105–113.
2. Испытание и обеспечение надежности : учебник / А. И. Коломенцев, М. В. Краев, В. П. Назаров [и др.] // Сиб. гос. Аэрокосмич. ун-т; Моск. авиац. ин-т. – Красноярск, 2006. – 336 с.
3. Глухих, И. Н. Установки с электролизёрами воды высокого давления / И. Н. Глухих, В. А. Лапота, Б. А. Соколов, А. Н. Щербakov // Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – № 11. – С. 73–79.
4. Электролиз воды : учебник / Л. М. Якименко, И. Д. Модылевская, З. А. Ткачек // М.: Химия. – 1970. – 264 с.

© Шестаков И. Я., Ходенков С. А., Тимофеев Е. Н., Шестаков В. И., 2025

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАРОК МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

И.Я. Шестаков, В.И. Шестаков, Е.Н. Тимофеев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: [yakovlevish@mail.ru](mailto:yakovlevish@mail.ru)

*В работе представлены схемы измерения электродных потенциалов с использованием электродов различного типа, позволяющих достаточно простым и дешевым способом определять марки металлов и сплавов, описаны принципы и условия их работы, используемое оборудование.*

*Ключевые слова:* электродный потенциал поверхности, электрохимический метод, электрод, милливольтметр.

При погружении любого металла в воду и водные растворы возникает электродный потенциал, который зависит от химических свойств металла и ряда других факторов (таблица 1).

Таблица 1

### Влияние различных факторов на изменение электродных потенциалов металлов

| Факторы влияния                                   | Величина изменения электродных потенциалов               |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Химическая природа металлов                       | Вольты                                                   |
| Состояние поверхности металла                     | Десятые доли вольта                                      |
| Адсорбция атомов и молекул на поверхности металла | Сотые и десятые доли вольта                              |
| Механические деформации и напряжения              | Сотые и десятые доли вольта<br>(Гутман Э.М. 0,10-0,15 В) |
| Химическая природа и концентрация раствора        | Десятые вольта и вольты                                  |
| Температура (каждые 10 град.)                     | Сотые вольта                                             |

В таблице 2 приведены электродные потенциалы металлов в 3 %-ном водном растворе NaCl [1,2].

Таблица 2

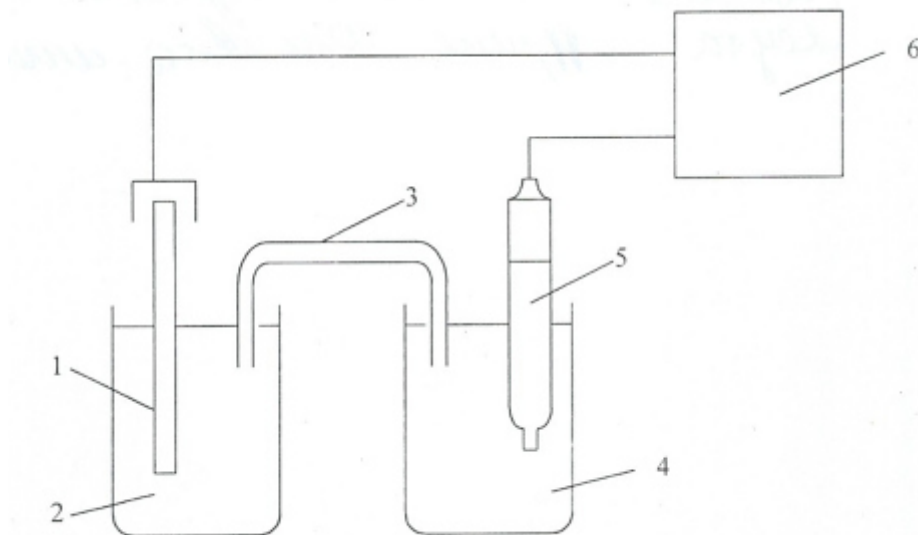
### Электродные потенциалы некоторых металлов

| Металл       | Zn    | Al    | Cd    | Fe   | Ni    | Cu     | Cr     |
|--------------|-------|-------|-------|------|-------|--------|--------|
| Потенциал, В | -0,83 | -0,63 | -0,52 | -0,5 | -0,02 | + 0.05 | + 0.23 |

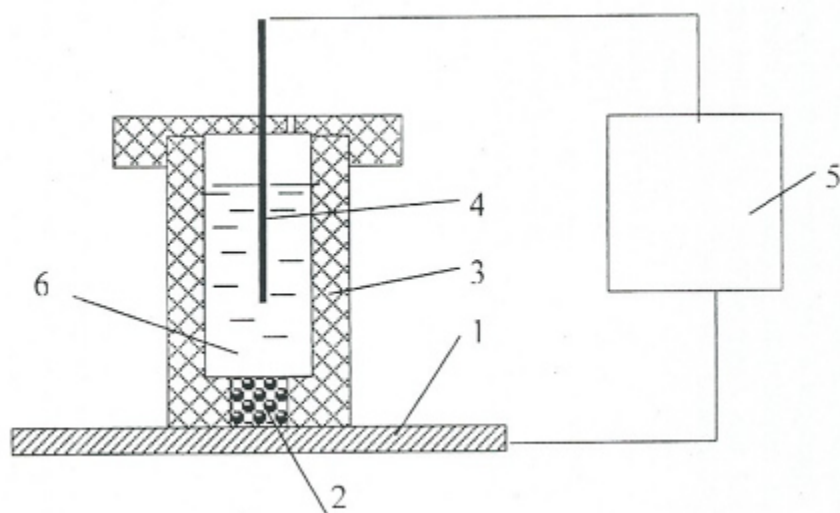
Из таблицы 2 видно, что диапазон изменения электродного потенциала составляет более 1 В. Электродный потенциал сталей одной группы, например, коррозионностойких 20Х13 и 15Х28 будет отличаться не менее чем на сотые доли вольта. Современные

электронные милливольтметры имеют точность  $\pm 0,001$  В. поэтому отличить марки сталей одной группы не представляет сложности. В связи с этим метод анализа металлов и сплавов, основанный на различии электродных потенциалов поверхностей, получает широкое применение [3-7].

Для реализации этого метода контроля потребуется серийно выпускаемый электронный вольтметр с точностью  $\pm 0,001$  В, диапазоном измерения  $\pm 2$  В, электрод сравнения типа ЭВЛ-1М3.1 (или ЭВЛ-1М4), ЭСр-00.04.01 или ЭВП-У1. В качестве электрода сравнения можно использовать химически неактивные металлы, такие как Pt или Au.



1 – образец металла; 2 – сосуд с водой или водным раствором;  
3 – электролитический ключ (трубка неметаллическая, заполненная пористым материалом); 4 – сосуд промежуточный с насыщенным раствором хлористого калия или другим веществом; 5 – электрод сравнения; 6 – милливольтметр с входным сопротивлением  $10^9$  Ом



**Рис. 2. Схема измерения электродных потенциалов с металлическим электродом сравнения:**

1 – анализируемый металл; 2 – пористая вставка; 3 – сосуд диэлектрический с крышкой; 4 – электрод сравнения; 5 – милливольтметр; 6 – вода или водный раствор

Известно, что в местах локализации механических деформаций и напряжений наблюдается микроэлектрическая гетерогенность, выражаемая в отклонении электродного потенциала в данном месте на 0,1...0,15 В. Для измерений этих отклонений потребуются капилляр Лугина-Хабера, который легко изготовить из стеклянной или пластмассовой трубки.

На рисунке 1 представлена схема измерения электродных потенциалов при использовании электродов сравнения первого рода. Если использовать твердый электрод сравнения (Pt, Au и др.), то схема намного упрощается (см. рисунок 2).

Наиболее важным моментом при измерении электродного потенциала является способ подготовки поверхности, т.к. наличие окисных и других пленок приводит к выравниванию электрохимических свойств поверхности металла одной группы. Для подготовки поверхности могут быть использованы известные способы очистки металлических изделий, например, используемые для гальванопокрытий.

### Библиографические ссылки

1. Жук, Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов : учебник / Н. П. Жук. – М.: Металлургия, 1976. – 276 с.

2. Лурье, Ю. Ю. Справочник по аналитической химии / Ю. Ю. Лурье. – М.: Химия, 1979. – 256 с.

3. Патент RU2279067C1 Российская Федерация, МПК G01N27/48(2006-01-01). Способ локального электрохимического экспресс-анализа металлических сплавов и устройство для его осуществления : № 2004130003/28 : заявл. 12.10.2004 : опубл. 27.06.2006 / Липкин М. С., Онышко Д. А., Шишка В. Г., Пожидаева С. А., Липкина Т. В. – 9 с.

4. Патент RU2080591C1 Российская Федерация, МПК G01N27/26, G01D1/18. Прибор для идентификации пробы сплавов драгоценных металлов : № 2080591 : заявл. 26.07.1995 : опубл. 27.03.1996 / Борисов Б. А., Вальднер В. О., Ерусалимчик И. Г., Калканов В. А., Шавард Н. А. – 7 с.

5. Патент RU2179311C1 Российская Федерация, МПК G01N27/26(2000-01-01), G01N27/416(2000-01-01). Способ идентификации металла или сплава и прибор для его осуществления : № 2000123058/28 : заявл. 06.09.2000 : опубл. 10.02.2002 / Ерусалимчик И. Г., Шавард Н. А. ; заяв. ООО «Вилдис». – 9 с.

6. Патент RU2279067C1 Российская Федерация, МПК G01N27/48(2006-01-01). Способ локального электрохимического экспресс-анализа металлических сплавов и устройство для его осуществления : № 2004130003/28 : заявл. 12.10.2004 : опубл. 27.06.2006 / Липкин М. С., Онышко Д. А., Шишка В. Г., Пожидаева С. А., Липкина Т. В. – 9 с.

7. Патент RU2499253C1 Российская Федерация, МПК G01N27/26. Способ и прибор идентификации металла или сплава : заявл. 05.06.2012 : опубл. 20.11.2013 / Солдатчиков В. С., Шавард А. А., Шавард Н. А., Ерусалимчик И. Г. ; заяв. ОАО «Конструкторское бюро специального приборостроения». – 9 с.

© Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Тимофеев Е. Н. 2025

Секция  
**«КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ»**

---

УДК 629.7.036.54

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ  
ДЕТАЛЕЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВАФЕЛЬНОГО ФОНА**

Н.А. Амельченко, Л.Е. Черкасов\*, Е.В. Раменская, А.А. Фадеев, Н.Ф. Янковская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: lenya837@yandex.ru

*Выявлены причины снижения качества и производительности при изготовлении корпусных деталей ракетно-космической техники с элементами поверхностей вафельного фона. Определены основные направления совершенствования технологии обработки вафельных оболочек на современном оборудовании с числовым программным управлением.*

*Ключевые слова: технология фрезерования, точность, ячейка, вафельная оболочка, режущий инструмент, остаточное полотно, управляющая программа*

В процессе изготовления изделий ракетно-космической техники (РКТ) с целью облегчения весовых параметров корпусных элементов, в частности обечаек, обтекателей, днищ и других деталей, применяют тонкостенные конструкции с элементами поверхностей вафельного фона [1]. К деталям, имеющих поверхности с вафельным фоном, как правило, относятся конструктивно-ортотропные оболочки с часто расположенными подкрепляющими наборами ребер, выполненными заодно со стенкой.

Анализом выявлено, что вафельная конструкция обечайки современных корпусных элементов ракет носителей разного функционального назначения, в том числе и корпуса космических аппаратов, представляет собой тонкостенное полотно, изготовленное из высокопрочных алюминиевых сплавов, с продольными, поперечными или диагональными ребрами, образующимися в процессе формообразования ячеек, выполненными как единое целое с полотном [2]. Авторы данной работы отмечают, что у вафельных оболочек возможны два вида разрушения: потеря устойчивости части стенки, заключенной между подкрепляющим набором, и потеря с одновременным разрушением подкрепляющего набора. Считается, что местная потеря устойчивости ребра, имеющая существенное значение для оболочек с приклепанными или приварными ребрами в ракетостроении не применяется.

На рисунке 1 приведены конструктивные виды вафельных оболочек с различным расположением ребер, выполненных заодно со стенкой, которые широко используются в настоящее время при изготовлении корпусных элементов изделий РКТ.

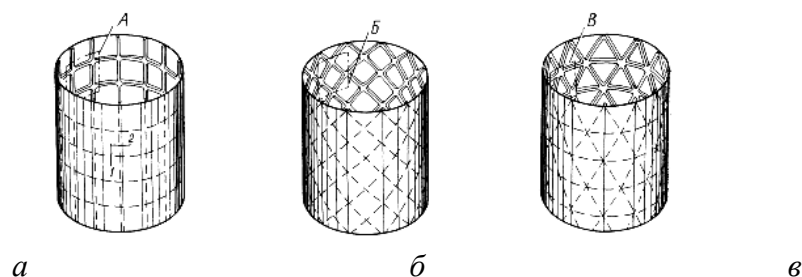


Рис. 1. Конструктивный вид вафельных оболочек с различным расположением ребер:

*a* - продольно-кольцевым; *б* - перекрестным; *в* - перекрестно-кольцевым

Практика показывает, что наиболее рациональным способом получения поверхностей с вафельным фоном и расположением ребер, выполненных заодно со стенкой, является метод фрезерования с применением режущего инструмента и специальных станков с ЧПУ, обеспечивающих изготовление цилиндрических, сферических, конических и других форм корпусных элементов летательных аппаратов.

Основной технологической задачей процесса обработки вафельных оболочек является обеспечение заданной точности геометрических параметров сетки пересекающихся ребер ячеек и, в первую очередь, толщины стенки остаточного полотна, от параметров которой зависит надежность конструкции, прочность и устойчивость отсеков изделий.

На рисунке 2 приведены основные конструктивные геометрические параметры ячеек, которые необходимо обеспечить при изготовлении вафельных оболочек.

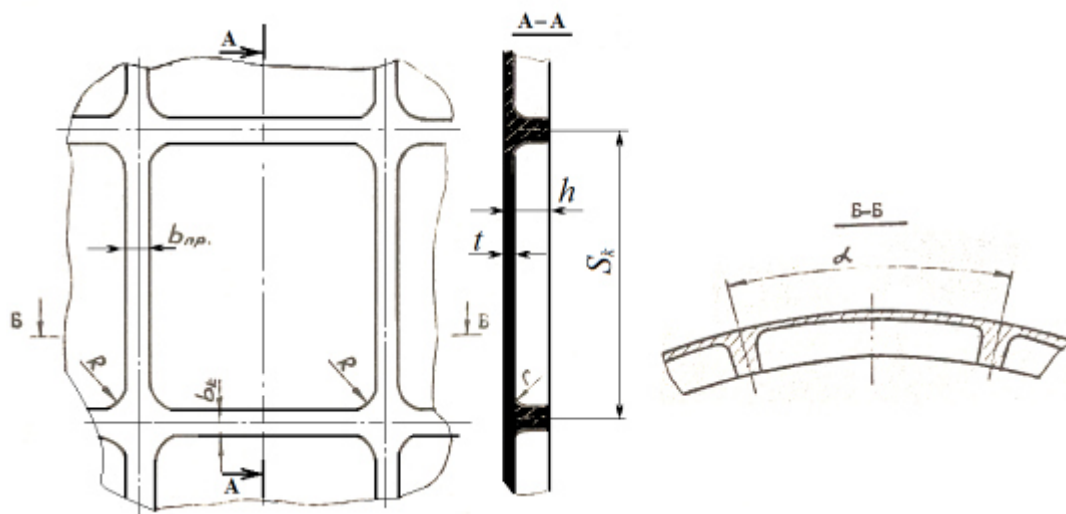


Рис. 2. Основные конструктивные параметры ячеек:

$t$  - толщина полотна;  $h$  - исходная толщина оболочки;

$b_k$  - ширина кольцевых ребер;  $b_{np}$  - ширина продольных ребер;

$S_k$  - шаг кольцевых ребер;  $\alpha$  - угловой шаг продольных ребер

$R, r$  - размеры, обеспечиваемые инструментом

Анализом выявлено, что остаточная толщина полотна  $t$  в ячейках является основным параметром, влияющим на прочностные характеристики и весовую массу корпусного элемента (примерно до 80%). Согласно требований технических условий по данным работы [3], при размерах ячейки  $100 \times 100$  мм и глубиной 17 мм, толщина ребра между карманами ячейки, по условиям чертежа, составляет  $b_k = b_{np} = 3 \pm 0,2$  мм, толщина остаточного полотна соответственно  $t = 2 \pm 0,2$  мм. При этом шероховатость поверхности регламентирована значениями  $Ra = 3,2$  мкм. Радиус скругления в углах составляет  $R = 8-10$  мм,

радиус скругления по дну  $r = 2$  мм обеспечивается конструкцией концевой фасонной фрезы.

Однако в процессе изготовления корпусных элементов с вафельным фоном очень сложно обеспечить стабильное получение толщины полотна в заданных пределах. В случае занижения толщины полотна менее  $2 \pm 0,2$  мм дорогостоящее изделие уходит в брак, либо возникает необходимость согласования отступлений с заказчиком и КБ о возможности дальнейшего использования изделия, что связано с риском возникновения аварийных ситуаций. Превышение допустимых пределов по толщине вызывает необходимость включения в технологический процесс вспомогательных слесарных операций, что влечет за собой увеличение трудоемкости обработки.

На основе анализа процесса обработки установлено, что основными причинами, влияющими на точность и трудоемкость изготовления конструкций с вафельным расположением ячеек, являются следующие технологические факторы:

- вид и качество применяемых заготовок, равномерность припуска по толщине;
- технологические приёмы, связанные с настройкой оборудования, качеством создания 3D-моделей деталей для разработки управляющих программ с применением САМ систем и их проверкой перед запуском в производство;
- выбор правильной схемы базирования заготовки на станке, точность и жесткость применяемой технологической оснастки;
- надежность, стойкость и качество заточки режущего инструмента;
- применяемые современные быстродействующие средства контроля вафельных оболочек и, в первую очередь, для оценки толщины стенки остаточного полотна.

Важное значение на повышение эффективности процесса и точности при обработке поверхностей с вафельным фоном имеет надежность и точность технологического оборудования и режимы резания. В работах [4, 5], с целью повышения эффективности процесса, оценивается возможность оптимизации режимов резания и применения высокоскоростной обработки при изготовлении вафельных оболочек. Однако конкретные данные и какие-либо рекомендации в работах не приводятся.

Одним из существенных направлений, связанных с повышением эффективности процесса и точности при обработке вафельных конструкций является совершенствование технологического процесса, оборудования, оснастки и систем программного управления.

На рис. 3 приведена схема станка с числовой программно-копировальной системой управления фрезерным оборудованием для серии СВО [6].

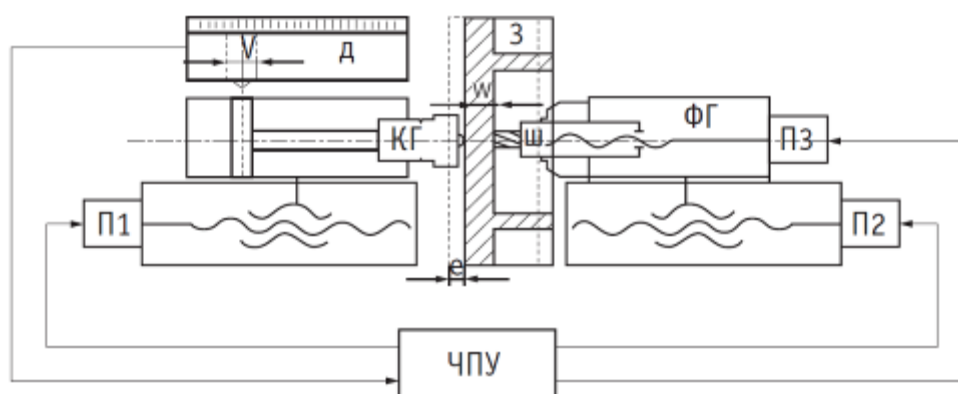


Рис. 3. Схема станка со стратегией электромеханического копирования  
КГ – копировальная головка (следящее устройство), ФГ – фрезерная головка;  
П1, П2 и П3 – привод перемещения следящего устройства,  
шпиндельного узла и шпинделя; Д – датчик; Ш – шпиндель; З – заготовка



Согласно представленной схеме (рис. 3) данная система близка к адаптивному управлению. В процессе обработки деталей адаптер следящего устройства копирует траекторию движения шпиндельной головки и через датчик обратной связи передает всю информацию в систему ЧПУ станка, которая реагирует на изменения в процессе и осуществляет поднастройку рабочих органов станка.

Повышение эффективности и точности изготовления поверхностей с элементами вафельного фона существенно зависит также от принятой стратегии обработки, учитываемую при разработке управляющих программ для многокоординатной обработки. Предварительные производственные наработки показывают, что изменение схемы врезания инструмента и траектории его движения могут послужить одним из направлений снижения трудоемкости обработки вафельных конструкций.

В соответствии с рисунком 4, типичный цикл фрезерования стандартной ячейки складывается из следующих переходов: врезание инструмента на глубину ячейки (1), выборка основной массы металла ячейки, обход по контуру ячейки (2) в виде чистового прохода, отвод инструмента (3). Далее – переход в следующую позицию, как показано на фрагменте (рис. 4, а). При такой схеме траектории движения фрезы происходит чередование смены попутного фрезерования на встречное, что сказывается на изменении условий резания и не исключаются вибрации инструмента, а также его более быстрый износ.

Возможен и другой вариант (рис. 4, б), когда процесс резания осуществляется при попутном фрезеровании. В этом случае повышается стойкость инструмента и улучшается качество обработанной поверхности, уменьшается мощность резания.

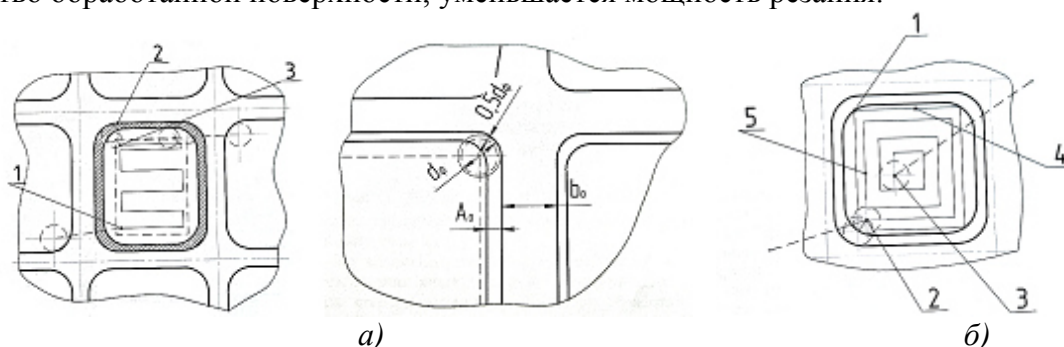


Рис. 4. Стратегии фрезерования ячеек при выборке

Врезание на глубину ячейки может выполняться, как правило, двумя способами:

- осевым перемещением фрезерной головки при неподвижной заготовке;
- комбинированным, при одновременном движении по двум координатам: осевыми перемещениями фрезы и одной из рабочих подач при круговой или линейной интерполяции по принципу маятникового фрезерования.

На основе применения САМ систем при разработке управляющих программ для многокоординатной обработки в процессе изготовления вафельных оболочек удалось выяснить возможность изменения построчной обработки на круговую спиральную.

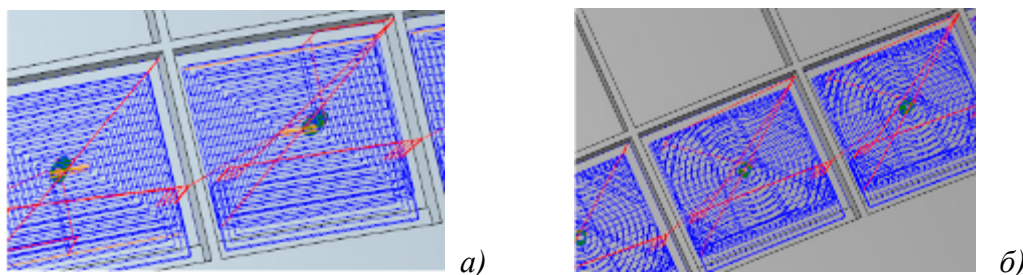


Рис. 5. Верификация траектории движения фрезы в ячейках при разработке управляющих программ с применением САМ систем:  
а – построчная; б – круговая по спирали



Предварительные эксперименты показывают, что выбор другой стратегии обработки обеспечивает повышение качества и точности обработки. При этом имеются неплохие перспективы снижения трудоемкости обработки при изготовлении вафельных оболочек разного функционального назначения.

Особую значимость при изготовлении вафельных конструкций занимает процесс автоматизации контрольных операций при оценке точности остаточного полотна.

Процесс обмера обечайки осуществляется при помощи лазерного трекера AT930. Это координатно-измерительный прибор, который используется для измерений и определения геометрических характеристик крупногабаритных объектов промышленного производства. Для работы с объектом измерения необходимо создание шаблонов карт измерений в САД-системе, развёртки сканов в штатном программном обеспечении лазерного трекера и создание соответствующих выносок с последующей загрузкой в САД-систему развернутых сканов и заполнение карт измерений.

Далее с помощью программного обеспечения лазерного трекера на экране монитора выводится развёртка каждого 30-градусного скана на плоскость, где отображены участки с нормальной толщиной (выделены зеленым цветом) и с превышением толщины остаточного полотна (светлые участки), требующие доработки.

На рисунке 6 показана развёртка участка вафельной оболочки.

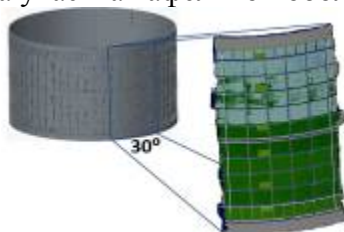


Рис. 6. Развёртка участка скана изделия

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлены основные причины, влияющие на снижение точности и эффективности процесса при изготовлении изделий с элементами поверхностей вафельного фона.

Применение оборудования с числовой программно-копировальной системой управления позволяет контролировать процесс обработки вафельных конструкций и повысить точность и качество обрабатываемых изделий.

Изменение стратегии обработки при разработке управляющих программ способствует повышению эффективности процесса и снижению трудоемкости обработки вафельных оболочек.

### Библиографические ссылки

1. ГОСТ 22350-91. Корпус ракеты на жидком топливе. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 16 с.
2. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1976. - 408 с.
3. Пась О.В., Серков Н.А. Разработка алгоритма управления точностью фрезерования остаточного полотна изделий с вафельным фоном на станках СВО. //Решетневские чтения: матер. XXV Межд. научн.-практ. конфер. (10–12 ноября 2021, г. Красноярск): в 2 ч. /под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. – Ч1. – С. 527–529.
4. Оптимизация режимов резания при фрезерования карманов обечайки с вафельной конструкцией. /А.М. Зайцев, С.Ю. Шачнев, С.В. Грубый. //Космическая техника и технология, 2020. – № 3(30). – С. 14 – 23.

5. Юрцев Е.С. Высокоскоростная обработка «вафельных» оболочек из алюминиевых сплавов. //Технология машиностроения, 2012. – № 9. – С. 5 – 8.

6. Пась О.В., Серков Н.А. Числовое программно-копировальное управление фрезерными станками серии СВО – важное направление развития систем ЧПУ // Станкоинструмент, 2019. – № 4. – С. 58 – 62.

© Амельченко Н.А., Черкасов Л.Е., Раменская Е.В.,  
Фадеев А.А, Янковская Н.Ф., 2025

## СОДЕРЖАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКТОР- СКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

А. А. Кишкин, Ю. Н. Шевченко, А. В. Делков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
e-mail: [gift\\_23j@mail.ru](mailto:gift_23j@mail.ru)

*В настоящей работе в соответствии с нормативными документами, регулирующими основные стадии разработки технических изделий рассмотрены основные этапы проектирования применительно к изделиям космической техники. При этом подчеркивается, что роль экспериментальных исследований в процессе проектирования космического аппарата определяется как существенно-значимая.*

*Ключевые слова: летные испытания, аванпроект, эскизный проект, конструкторская документация, серийное производство.*

## THE CONTENT AND MAIN STAGES OF THE DESIGN OF THE DESIGN DOC- UMENTATION OF THE THERMAL CONTROL SYSTEM

A. A. Kishkin, Yu. N. Shevchenko, A.V. Delkov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
e-mail: [gift\\_23j@mail.ru](mailto:gift_23j@mail.ru)

*In this paper, in accordance with the regulatory documents regulating the main stages of the development of technical products, the main stages of design in relation to space technology products are considered. At the same time, it is emphasized that the role of experimental research in the process of designing a spacecraft is defined as significantly significant.*

*Keywords: flight tests, advance design, preliminary design, design documentation, serial production.*

Параметры и облик систем терморегулирования определяются на этапе их проектирования. Задачами проектирования при этом являются выбор наиболее рационального технического решения из множества возможных и последующая доводка этого решения под оптимальные параметры. Одну из основных ролей при проектировании играют расчетные методы и математические модели систем терморегулирования, создающиеся под конкретные задачи. Рассмотрим ниже специфику проектирования системы терморегулирования (СТР) и применения математических моделей при проектировании.

Создание космических аппаратов и их отдельных систем – сложный процесс, требующий значительных временных и материальных затрат с привлечением людских, производственных и энергетических ресурсов. По этой причине большинство программ развития космической техники имеет поддержку на уровне государства [1, 2].

Проектирование СТР космического аппарата (КА) начинается с определения основных задач по обеспечению теплового режима (величина и структура тепловых потоков, необходимые режимы охлаждения) и граничных условий функционирования (ограниче-

ний по площади, массе, габаритам). При этом необходимо также определение требований к надежности конструкции.

На основании этой информации разрабатываются разнообразные схемные решения (технические предложения), для каждого из которых производится предварительная оценка характеристик, в результате которой отбираются перспективные варианты. В результате анализа технических предложений отбирается один вариант для дальнейшего проектирования и детальной проработки. При этом допускается вариантность технических решений по некоторым особо сложным вопросам.

В соответствии с ГОСТ 2.103-68 [3] основными стадиями разработки любых технических изделий являются: техническое предложение, эскизный проект, технический проект и рабочая конструкторская документация. Применительно к изделиям космической техники эти стадии преобразуются в следующую структуру [4]:

1. ТТЗ – тактико-техническое задание.
2. АП – аванпроект.
3. ЭП – эскизный проект.
4. КД – конструкторская документация.
5. НЭО – наземная экспериментальная отработка.
6. КНЭО – комплексная наземная экспериментальная отработка.
7. ЛИ – летные испытания.
8. ПС – подготовка к серийному производству.
9. АН – авторский надзор над серийным изготовлением.

В результате проектирования создается конструкторская документация на изготовление изделия, под которой понимают в зависимости от назначения совокупность документов, содержащих данные, необходимые для разработки, изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации и ремонта изделия. Цель проектирования - обеспечить производство КА с заданными свойствами при наименьшей трудоемкости изготовления.

При этом роль экспериментальных исследований в процессе проектирования КА остается значительной. Эксперименты проводят для проверки принятых конструктивных решений и оценки характеристик на различных стадиях проектирования. Качество проектирования во многом зависит от полноты экспериментальной отработки систем и ее агрегатов при стендовых и натурных испытаниях, от достоверности отработки экспериментальной информации.

Проектирование изделий контурных труб (КТ) отличается значительной долей исследований в формате НИР и опытно-конструкторские работы (ОКР), положение которых в структуре процесса согласно можно отразить в схеме на рис.1. НИР проводятся перед составлением аванпроекта, ОКР после него.

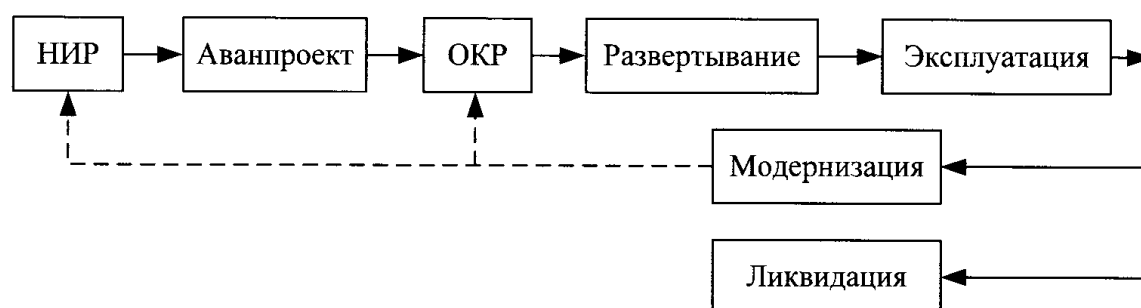


Рис. 1. Схема процесса проектирования

Для обеспечения высокого качества в проектировании, изготовлении и эксплуатации новых изделий, в том числе и космической техники, а также для минимизации затрат на

создание новой техники установлены единые правила выполнения работ в виде стандартов, которые устанавливают основные стадии и этапы создания новых изделий.

Научно-исследовательские работы (НИР) направлены на получение новых сведений об объекте исследования и проводятся с целью оценки технической возможности реализации КА или его части с заданными параметрами при заданных условиях окружения. Для космической техники эти работы носят большей частью прикладной характер. Обычно НИР содержат следующие стадии:

- определение требований к проектируемой системе и условий ее окружения,
- определение целей и задач проектируемой системы,
- разработка различных вариантов исполнения (схемных решений).

В результате НИР формируется тактико-техническое задание на аванпроект. На этапе аванпроекта производится анализ разработанных схемных решений с точки зрения технических возможностей их реализации, критериев эффективности, сравнения с аналогами. В результате формируется проект опытного образца, содержащий наиболее эффективное решение. По итогам аванпроекта формируется ТЗ на ОКР.

Опытно-конструкторские работы (ОКР) представляют собой комплекс работ по разработке конструкторской и технологической документации для опытного образца, параметры которого были обоснованы на предыдущих этапах, и включают в себя этапы разработки эскизного проекта (ЭП), технический проект (ТП), рабочую конструкторскую документацию опытного образца изделия.

Целью эскизного проекта (ЭП) является установление принципиальных (конструкторских, схемных и др.) решений, которые дают общее представление о принципе работы и построении изделия.

При этом оптимизация и выбор единственного варианта системы в целом проводится на основании экспериментальных исследований или данных, полученных по разработанной математической модели в соответствии со сформулированными критериями эффективности. На этом этапе широко используются методы системного анализа и математического моделирования. В качестве критериев эффективности для СТР обычно используются наборы из первичных и качественных оценок:

- 1) первичные оценки:
  - масса системы,
  - потребляемая системой энергия,
  - производительность системы,
- 2) качественные оценки:
  - простота развертывания или установки,
  - надежность,
  - стоимость разработки.

Помимо приведенной системы критериев широко применяются комплексные критерии, составленные из базовых. Основным комплексным критерием СТР является удельная производительность системы (в пересчете на кг массы – Вт/кг). Применяется также обратная величина – удельная масса СТР с размерностью кг/Вт.

Технический проект разрабатывают в случае, если это предусмотрено в ТЗ с целью выявления окончательных конструкторских и технологических решений, дающих полное представление о конструкции и технологии изделия, когда это целесообразно сделать до разработки рабочей документации.

Целью стадии разработки рабочей конструкторской документации является создание комплектов конструкторской (КД) и технологической документации, необходимых и достаточных для изготовления опытного образца или опытной партии изделия. Эта стадия является обязательной при создании любых изделий.

Далее производится изготовление опытных образцов и их экспериментальная наземная отработка. Цель экспериментальной отработки - верификация полученных на предыдущих этапах характеристик системы.

Испытание СТР на этой стадии обычно проводится с использованием тепловых макетов с моделированием тепловых нагрузок и условий эксплуатации.

При успешном прохождении наземных испытаний следующим этапом проводятся натурные испытания КА и его элементов на орбите (летные испытания). В случае успешного прохождения натурных испытаний принимается решение о вводе системы в эксплуатацию.

Этапы модернизации и вывода из эксплуатации являются завершающими этапами жизненного цикла изделия космической техники.

Аппарат математического моделирования в данной схеме используется на двух этапах – НИР и ОКР. Однако на каждом из них он выполняет различные функции. Если на этапе НИР необходимо оценить эффективность возможных схемных решений (предварительная оценка на основе анализа значительного числа решений), от которых в конечном итоге будет зависеть облик проектируемой системы, то на этапе ОКР идет доработка и оптимизация принятого схемного решения по режимно-конструктивным параметрам.

При проектировании СТР на этапе НИР будет решаться вопрос о типе используемой системы – жидкостный контур, контур с фазовым переходом, тепловые трубы и т.д., а также определяться облик системы – число элементов, способ их соединения, тип рабочего тела и т.д. Для математических моделей, используемых на этом этапе, не требуется детальной проработки и высокой точности. На этапе ОКР для выбранного типа СТР проводится оптимизация выбранной схемы, заключающаяся в анализе влияния режимных и конструктивных параметров на ее производительность.

В практике проектирования СТР обычно используется один из следующих подходов:

- изменение характеристик известного прототипа под существующие технические требования;
- использование готовых апробированных технических решений;
- разработка новых конструкций и технических решений (без аналогов).

Метод прототипирования в настоящее время является основным. При этом немаловажным элементом является накопленный опыт проектирования подобных систем. Доводка характеристик СТР под требуемые параметры осуществляется на этапах испытаний образцов.

В случае разработки новых конструкций без аналогов производится синтез СТР по ее целевым функциям. На практике синтез решения ведется итерационным методом путем последовательного изменения конструктивных и режимных параметров системы, до тех пор, пока не будут достигнуты ее целевые функции. Для осуществления итерационного процесса необходима математическая модель системы терморегулирования, адекватно реагирующая на изменение внешних параметров.

Необходимость применения развернутого анализа по математическим моделям в последнее время становится все более актуальной. В настоящее время большей частью на этом этапе проводится параметрическая, а не структурная оптимизация, что связано со сложностью разработки математических моделей для сложных разветвленных схем СТР.

Современный подход к проектированию космических аппаратов базируется на увеличении роли математического и компьютерного моделирования, что позволяет существенно сократить время проектирования и снизить затраты на проведение экспериментальных испытаний образцов КА (в т.ч. и за счет сокращения программы натурных испытаний системы). Снижение материально-временных затрат на разработку КА может быть осуществлено за счет оценки параметров возможных схемных решений с помощью математических моделей на ранних стадиях проектирования. С использованием про-

граммного обеспечения, возможно проводить поисковую оптимизацию при варьировании параметров КА.

Для ранних этапов проектирования (стадии НИР и эскизного проектирования) характерно наличие большого числа неопределенностей, и для принятия конструкторских решений необходима разработка соответствующих математических моделей физических процессов, которые должны быть максимально просты, и в то же время отвечать требованиям полноты предоставляемой информации.

Таким образом, разработка и создание расчетно-конструктивных методов проектирования КА является актуальной научно-технической задачей. Применение таких методов актуально на ранних этапах проектирования СТР, до формирования КД и ее конструктивного решения.

Для СТР КА целесообразно применение математических моделей, позволяющих на этапах проектирования смоделировать стационарные и динамические температурные режимы, оценить качество СТР, дать оценку изменения параметров системы при различных режимах работы. Такая модель необходима для отработки конструктивных и схемных решений по системе терморегулирования, включая возможность наличия нескольких контуров. Для решения данной задачи необходима разработка соответствующих методик и алгоритмов, позволяющих проводить многовариантные расчеты контуров систем терморегулирования и определять наиболее эффективные схемные решения при проектировании.

### **Библиографические ссылки**

- 1) Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения Учебное пособие. — Красноярск: СибГАУ, 2011. — 488 с., 24 с.ил.
- 2) Мельников И. В. Роль испытаний в оптимизации процесса проектирования изделий ракетно-космической техники / И. В. Мельников // Молодой ученый. — 2011. — №2. Т.1. — С. 38-41.
- 3) ГОСТ 2.103-68 ЕСКД. Стадии разработки.
- 4) Конструкция и проектирование изделий ракетно-космической техники. Часть 2. Основы проектирования ракет-носителей [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. И. Куренков; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (5,6 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

© Кишкин А. А., Шевченко Ю. Н., Делков А. В., 2024

## СПЕЦИФИКА ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ

О. В. Литовка, В. А. Левко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: levko@sibsau.ru

*Рассмотрены особенности обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов. Описан современный уровень такой обработки, характеризующийся недостаточной производительностью процесса. Установлены преимущества кремнийорганических полимеров как основы высоковязких рабочих сред. Намечены направления повышения производительности обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов.*

*Ключевые слова: обработка абразивным потоком, высоковязкая рабочая среда, труднообрабатываемые сплавы*

**Введение.** В настоящее время все большее применение находит обработка абразивным потоком (*abrasive flow machining (AFM)*). Основу среды обеспечивает вязкоупругий полимер, наполненный абразивными частицами. Вязкоупругий полимер является носителем, а абразивные частицы действуют как режущий инструмент, который удаляет материал с заготовки. Упругое восстановление основы среды в потоке при обработке создает значительные дополнительные усилия на абразивное зерно. При этом реализуется широкий спектр типов контактирования абразивного зерна и обрабатываемой поверхности [1].

На производительность и качество обработки влияют такие факторы как вязкость основы рабочей среды, вид и величина твердого наполнителя (абразивных или алмазных зерен), процентное содержание наполнителя в рабочей среде, а также давление сдвига рабочей среды [2]. Рабочую среду для *AFM* можно рассматривать как наполненную систему или концентрированную суспензию (гетерогенную дисперсную систему), содержащую твердую диспергированную фазу (твердые частицы), распределенную в полимерной дисперсионной среде. Величина частиц велика такова, что полностью исключает их броуновское движение. В таких системах формируются дисперсные структуры, а сам процесс структурообразования обусловлен энергетическим взаимодействием между частицами дисперсной фазы и дисперсионной средой [3].

Чем больше вязкость (жесткость) рабочей среды и давление сдвига, тем выше производительность обработки. Для обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов рекомендуются использовать высоковязкие и высоконаполненные рабочие среды, а также максимальные давления сдвига [4]. Однако до настоящего времени полностью решен вопрос производительности обработки таких деталей.

**Обзор обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов.** Рабочие среды (абразивные массы) на основе кремнийорганического каучука (с фторопластом 4-15%) с абразивом [5] стали прототипом рабочих сред для обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов. Так при использовании массы (рабочей среды) (состав: синтетический каучук СКТ 22...28%; фторопласт-4 2...3%; кремний органическая жидкость ПЭС-5 7...10%; молотая слюда СММ-125 1...3%; абразивное зерно 13A100 – остальное) при давлении масла в системе 12,5 МПа удалось



снизить шероховатость обработанной поверхности образцов крыльчаток из титанового сплава ВТЗ-1 с  $Ra$  20 мкм до  $Ra$  0,5...0,6 мкм за 120 циклов возвратно-поступательного перемещения данной рабочей среды через межлопаточные каналы [6].

В этот состав для исключения деформации тонкостенных элементов деталей при обработке дополнительно введена олеиновая кислота в количестве 5...7 мас.%. Такая добавка сохраняет однородность массы и равномерность съема металла, наилучшую консистенцию и текучесть, а также обеспечивает отсутствие выделения пластифицирующих добавок при хороших антиадгезионных свойствах. При давлении масла в системе 12,5 МПа удалось снизить шероховатость обработанной поверхности образцов крыльчаток из титанового сплава ВТЗ-1 с  $Ra$  2,5 мкм до  $Ra$  0,5...0,6 мкм за 80 циклов возвратно-поступательного перемещения [7].

Для обеспечения точности расхода компонентов топлива через каналы литых крыльчаток из аустенитно-мартенситной стали проведена обработка абразивным потоком в три этапа и обеспечена снижение шероховатости с  $Ra$  20 мкм до  $Ra$  0,32...0,62 мкм. Основа рабочей среды – это кремнийорганический каучук с фторопластом 4, а величина абразивного зерна (карбид кремния черный) уменьшалась на каждом этапе с  $F70$  до  $F120$  и  $F180$ . На первых двух этапах давление было 12 МПа, на третьем – 6 МПа. Общее количество циклов обработки составило от 150 до 200 [8].

Рабочей средой, состоящей из каучука синтетического диметилсилоксанового термостойкого СКТ (ГОСТ 14680–74, ТУ 38.103694–89) - 50 %, электрокорунда белого 25А зернистостью  $F70$  - 50 % и давлением в системе 12 МПа были обработаны криволинейные образцы из аустенитно-мартенситной стали. За 60 циклов обработки обеспечили улучшение шероховатости поверхности от  $Ra = 8,3...9,3$  мкм (литейная корка) до  $Ra = 2,4...2,8$  мкм, а также увеличение микротвёрдости образцов от 38,5-40,5  $HRC$  до 43,5-45,5  $HRC$  [9].

Зарубежные составы рабочих сред в качестве основы используют полибороксан [4, 10...15]. Есть их российские аналоги [16]. Однако такие составы имеют значительно меньшую вязкость и требуют большего количества циклов обработки. Аналогичный недостаток имеют рабочие среды на основе винилсилоконового каучука [17], стирол-бутадиенового каучука [18] и натурального каучука [19]. Еще меньше вязкость у рабочих сред на основе гуаровой камеди [20]. Так для уменьшения шероховатости образцов из нержавеющей стали 15-5РН рабочей средой на основе полибороксана с  $Ra$  8...10 мкм до  $Ra$  0,8...0,9 мкм потребовалось 150 циклов обработки [21].

Обработка абразивным потоком средой высокой вязкости (на основе каучука СКТ) заготовок из сплавов порошкового молибдена показала, что удалось уменьшить шероховатость поверхности с  $Ra$  1,6 мкм до  $Ra$  1,3 мкм двумя этапами обработки. На первом этапе использован нормальный электрокорунд зернистостью  $F40$ , на втором этапе – карбид кремния черный зернистостью  $F180$ . Общее количество циклов за два этапа составило 75 [22].

**Специфика обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов.** Силоксановые каучуки (кремнийорганические полимеры), являющиеся основой рабочих сред российского производства, характеризуются высокой прочностью связей Si-O (более 420 кДж/моль) и Si-C (около 415 кДж/моль), а также значительной гибкостью и малыми силами межмолекулярного взаимодействия (плотность энергии когезии 210 Дж/см<sup>3</sup>). Их отличает большая вязкость, по сравнению с зарубежными аналогами.

До приложения давления абразивные зерна в рабочей среде расположены случайным образом. Характер их распределения носит случайный характер и зависит от величины зерен и их процентного (массового) содержания в среде. При приложении определенной величины напряжения сдвига среда начинает течение сдвига [3]. При этом формируется

поток с определенной внутренней структурой, характеризующейся возникновением линий тока. В каждой линии тока абразивные зерна выстраиваются в определенной последовательности, образуя силовые цепочки [23].

Высоковязкие рабочие среды лучше удерживают абразивные зерна в полужакрепленном состоянии, что увеличивает производительность обработки абразивным потоком любых материалов, в том числе труднообрабатываемых. Скорость течения таких сред при одинаковых давлениях сдвига существенно ниже, чем сред со средней или низкой вязкостью. При их сдвиговом течении в потоке среды возникают большие по величине нормальные и касательные напряжения, обеспечивающие повышенные силы резания.

При обработке абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов наблюдается увеличение температуры как обрабатываемой детали, так и рабочей среды. Это повышение сказывается на вязкости рабочей среды и требует использования специальных охлаждающих устройств [2, 8]. В качестве смазывающих добавок в состав рабочей среды добавляют олеиновую кислоту [7] или ее аналоги [14]. Однако при превышении содержания этих добавок уровня свыше 7...15% от массового содержания происходит существенное снижение вязкости рабочей среды, наблюдается выделения пластифицирующих добавок. Возможны случаи проскальзывания рабочей среды в обрабатываемых каналах без контактных взаимодействий. Таким образом, для повышения производительности обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов требуется создание рабочей среды нового состава, который бы сохранял высокую вязкость при добавлении смазывающе-охлаждающих пластификаторов, а также имел такую структуру твердого наполнителя, при котором обработка велась в один этап.

**Заключение.** Рассмотрены особенности обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов. Описан современный уровень такой обработки, характеризующийся недостаточной производительностью процесса. Установлены преимущества кремнийорганических полимеров как основы высоковязких рабочих сред. Намечены направления повышения производительности обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов.

### Библиографические ссылки

1. Левко, В. А. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопровильных деталей / В. А. Левко, Е. Б. Пшенко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2006. – № 4(11). – С. 64-68. – EDN INMCBX.
2. Petare A.C., Jain N. K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97. Issue 1-4. P. 741–782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>
3. Литовка, О. В. Влияние формы абразивного зерна на обработку абразивным потоком / О. В. Литовка, В. А. Левко // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 27–28 февраля 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 77-82. – EDN GUBJVO.
4. Rhoades, L.J. (1990). Abrasive Flow Machining for Automatic Surface Finishing and Capacitance Technology for In-Process Surface and Dimensional Metrology. B: Meguid, S.A. (eds) Surface Engineering. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-0773-7\\_46](https://doi.org/10.1007/978-94-009-0773-7_46)
5. Авторское свидетельство № 1673420 А1 СССР, МПК В24Д 3/34. Масса для абразивной обработки : № 4680530 : заявл. 18.04.1989 : опубл. 30.08.1991 / Г. И. Фомин, В. П.

Лозицкий, Н. М. Мазур, Б. И. Иоктон ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я Р-6564. – EDN VBGMGW.

6. Авторское свидетельство № 1161359 А1 СССР, МПК В24С 1/08. Способ обработки деталей абразивной массой : № 3652014 : заявл. 11.07.1983 : опубл. 15.06.1985 / С. К. Сысоев, М. А. Лубнин ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я Г-4778. – EDN AFEVTU.

7. Авторское свидетельство № 1785884 А1 СССР, МПК В24Д 3/34. Масса для абразивной обработки : № 4839611 : заявл. 15.06.1990 : опубл. 07.01.1993 / Г. И. Фомин, Н. М. Мазур, А. А. Назимов, В. Д. Коробейников ; заявитель ОМСКИЙ ФИЛИАЛ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ТЕХНОЛОГИИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ, ОМСКОЕ МОТОРОСТРОИТЕЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО. – EDN RCWADY.

8. Обеспечение точности расхода компонентов топлива через каналы деталей, обработанных экструзионным хонингованием / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко [и др.] // Технология машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 48-52. – EDN KNNNLT.

9. Обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей среды образцов литых заготовок из аустенитно-мартенситной стали / В. А. Левко, Н. С. Теряев, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 122-132. – DOI 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132. – EDN UCYFHO.

10. Pat. 3634973 U.S. Apparatus for abrading by extrusion and abrading medium / R.W. McCarty. 27.08.1969; 18.01.1972. – Т. 894. – № 3.

11. Pat. 3909217 U.S. Abrasive composition containing a gel and a boron-dialkyl silicon-oxygen polymer / K.E. Perry. 13.12.1973; 30.09.1975.

12. Pat. 4087943 U.S. Method of abrading or having a restricted passage surface / K.E. Perry. 27.09.1973; 09.05.1978.

13. Pat. 5203883 U.S. Honing media / W.B. Perry. 12.08.1991; 20.04.1993.

14. Pat. 6273787 U.S. Abrasive polishing method, apparatus and composition / J.R. Gilmore, L.J. Rhoades. 18.08.1999; 14.08.2001.

15. Pat. 6500050 U.S. High precision abrasive flow machining apparatus and method / W.L. Walch, J.M. Greenslet, Jr. E.J. Rusnica, R.S. Abt, L.J. Voss. 16.08.2001; 31.12.2002.

16. Патент № 2138385 С1 Российская Федерация, МПК В24В 19/00, В24В 31/116. Устройство для направленной абразивной струйной обработки : № 96112169/02 : заявл. 24.10.1994 : опубл. 27.09.1999 / Л. Д. Роудз, Т. А. Кохат, Н. П. Ноукович, Д. У. Янда ; заявитель Экструд Хоун Копэрейшн. – EDN UYMCPV.

17. Wang AC, Weng SH (2007) Developing the polymer abrasive gels in AFM process. J Mater Process Technol 192:486–490. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.082>

18. Kar KK, Ravikumar NL, Tailor PB, Ramkumar J, Sathiyamoorthy D (2009) Performance evaluation and rheological characterization of newly developed butyl rubber based media for abrasive flow machining process. J Mater Process Technol 209(4):2212–2221. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.012>

19. Rajesha S, Venkatesh G, Sharma AK (2010) Performance study of a natural polymer based media for abrasive flow machining. Indian J Eng Mater Sci 17:407–413

20. Basha S.M., Sankar M.R., Venkaiah N. Experimental investigation on the surface topographical improvement of selective laser melted SS316L using abrasive flow finishing. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 131, 2024, pp. 844-860, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.09.074>.

21. Sangil Han, Ferdinando Salvatore, Joël Rech. Residual stress profiles induced by abrasive flow machining (AFM) in 15-5PH stainless steel internal channel surfaces. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 267, 2019, pp. 348-358, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.024>.

23. Xiu T.X., Wei W., Liu K., Wang Z.Y., Wei D.Z. Characteristics of force chains in frictional interface during abrasive flow machining based on discrete element method // *Advances in Manufacturing*. 2018. Vol. 6. Issue 4. P. 355–375. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40436-018-0236-7>

© Литовка О.В., Левко В. А. 2025

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРАКТИК ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПОСТОБРАБОТКОЙ

В. И. Матвиенко  
Научный руководитель - В. А. Левко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: [matvienkovi@iss-reshetnev.ru](mailto:matvienkovi@iss-reshetnev.ru)

*Рассмотрено применение совмещенных цифровых двойников технологии селективного лазерного сплавления и технологии постобработки полученной детали для повышения эффективности производства, сокращения сроков и затрат на разработку технологических процессов, а также обеспечения высокого качества изготовления деталей.*

*Ключевые слова: цифровой двойник, селективное лазерное сплавление, постобработка*

### **Введение.**

Цифровые двойники используют для обеспечения соответствия изделия всем заявленным показателям качества, для минимизации затрат, в том числе финансовых, временных, ресурсных, следует применять передовые наукоемкие технологии [1]. Селективное лазерное сплавление (СЛС) является одной из ключевых аддитивных технологий, широко применяемых в современном производстве. Известен положительный опыт применения аддитивной технологии селективного лазерного сплавления в конструкции малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки [2].

Правильный выбор показателей по всем основным направлениям повышения надежности технологии селективного лазерного сплавления позволит обеспечить требуемые значения точности и шероховатости поверхностей деталей и минимизировать временные и стоимостные затраты на подготовку производства с применением данной технологии [3].

Однако до настоящего времени данная технология имеет ряд ограничений, обусловленных спецификой создания цифровых двойников технологий СЛС и постобработки. Создание цифрового двойника технологии СЛС позволяет виртуально моделировать и оптимизировать процессы аддитивного производства [4].

**Основные этапы создания цифрового двойника технологии селективного лазерного сплавления.** Основные этапы создания цифрового двойника технологии СЛС следующие.

1. Разработка 3D-модели изделия включает в себя создание 3D-модели детали с учетом особенностей аддитивного производства и оптимизацию геометрии модели для минимизации дефектов и повышения качества изготовления.

2. Подготовка 3D-модели для аддитивного производства подразумевает преобразование 3D-модели в иной формат, поддерживаемый аддитивным оборудованием и размещение 3D-модели на виртуальной платформе с учетом ограничений по размерам рабочей камеры.

3. Моделирование процесса селективного лазерного сплавления. В технологии СЛС необходимы поддержки для детали по нескольким причинам.

Предотвращение деформаций. Во время СЛС порошка тепловые напряжения могут вызывать деформацию и коробление деталей, поэтому поддержки обеспечивают дополнительную опору для элементов детали, предотвращая их деформацию.

Обеспечение геометрической точности. Поддержки удерживают детали в правильном положении, не позволяя им смещаться или деформироваться в процессе печати. Это особенно важно для деталей со сложной геометрией, нависающими элементами или тонкими стенками.

Отвод тепла. Поддержки способствуют эффективному теплоотводу от нижних слоев детали, предотвращая их перегрев и деформацию, что помогает сохранить точность геометрических параметров.

Обеспечение адгезии к платформе. Поддержки надежно крепят деталь к платформе построения, предотвращая ее отслаивание или отрыв, что важно для деталей с большой площадью основания.

Удаление поддержек после печати. Поддержки должны быть легко удаляемыми после завершения печати, не повреждая саму деталь. Для этого используются специальные конструкции поддержек и материалы, облегчающие их последующее удаление.

После печати детали поддержка срезается от рабочего стола, а затем и от самой детали.

4. Анализ и оптимизация технологических параметров. На этом этапе проводят оценку влияния различных факторов (мощность, скорость, толщина слоя и др.) на качество изготавливаемого изделия, а также подбор оптимальных технологических режимов для достижения требуемых характеристик детали.

5. Интеграция цифрового двойника в систему управления производством включает в себя связывание цифрового двойника с данными о реальном производственном процессе, а также дает возможность удаленного мониторинга и управления оборудованием.

Создание достоверного цифрового двойника технологии СЛС позволяет виртуально протестировать и оптимизировать процессы аддитивного производства, сократить время вывода новой продукции на рынок, повысить качество и эффективность изготовления деталей.

**Основные этапы создания цифрового двойника технологии постобработки.** Цифровой двойник постобработки – это виртуальная модель, отображающая процессы окончательной обработки деталей. Создание такого цифрового двойника позволяет оптимизировать и автоматизировать финишные операции, повысить качество и эффективность производства. Основные этапы создания цифрового двойника постобработки

1. Моделирование постобработки направлено на определение необходимых операций, таких как механическая обработка, термообработка, финишная обработка. Далее осуществляется разработка последовательности технологических операций постобработки.

2. Симуляция технологического процесса – это моделирование каждой технологической операции с учетом параметров процесса, свойств материала, геометрии детали и т.д. По ее результатам проводится оптимизационный анализ технологического процесса постобработки.

3. Интеграция с CAD/CAM-системами дает возможность внесения изменений в технологический процесс и оперативной оценки их влияния.

4. Мониторинг и контроль производства включает в себя сбор данных о ходе реального производственного процесса, сравнение фактических показателей с данными цифрового двойника и корректировку технологического процесса на основе полученной обратной связи.

5. Оптимизация и улучшение направлены на анализ данных, полученных в ходе производства, для выявления возможностей оптимизации, внесение изменений в цифровые двойники и технологические процессы.

Важным аспектом использования цифровых двойников является возможность обеспечения интеграции данных технологий с производственным оборудованием, как на физическом уровне, так и на уровне управляющих программ, сгенерированных на основе цифровых моделей, на станки с ЧПУ. Кроме того, такой подход дает возможность осуществлять мониторинг и контроль производственных процессов в режиме реального времени, реализуя обратную связь и оптимизацию. При этом возможен сбор данных о фактических параметрах производственных процессов, сравнение фактических данных с цифровыми моделями и внесение корректировок в цифровые двойники и технологические процессы на основе полученной обратной связи.

Такая интегрированная система, основанная на цифровых двойниках конструкции детали, технологий СЛС и постобработки, позволяет повысить эффективность технологии изготовления деталей, качество и воспроизводимость технологических процессов, а также обеспечить непрерывное совершенствование производства.

Цифровые двойники позволяют осуществить автоматизацию контроля геометрических размеров изготавливаемых деталей [5], а также использовать специальные технологии финишной обработки для обеспечения шероховатости внутренних труднодоступных поверхностей, например, волноводов [6,7].

### **Заключение.**

Применение совмещенных цифровых двойников технологии селективного лазерного сплавления и технологии постобработки детали позволяет повысить эффективность производства, сократить время и затраты на разработку технологических процессов, а также обеспечить высокое качество изготовления деталей.

### **Библиографические ссылки**

1. Мартынец, Е. Р. Цифровые двойники изделий как инструмент обеспечения качества на стадии разработки / Е. Р. Мартынец, А. В. Корниенко, В. А. Левенцов // Управление инновациями в условиях цифровой трансформации : сборник научных трудов III Всероссийской студенческой учебно-научной конференции, Санкт-Петербург, 12–13 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 286-290. – EDN EPSUTH.
2. Применение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления в конструкции малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки / Ю. С. Елисеев, Д. Г. Федорченко, С. П. Голанов [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 174-183. – DOI 10.18287/2541-7533-2019-18-1-174-183. – EDN HVIGOT.
3. Матвиенко В. И., Литовка О. В., Левко В. А. Основные направления повышения надежности технологии селективного лазерного сплавления при обеспечении точности и шероховатости поверхностей деталей. Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика [Электронный ресурс] : сб. материалов VI Всерос. науч.-практ. конф. (28–29 февраля 2024 г., Красноярск). С. 75-79.
4. Малов, И. Е. Тенденции развития технологии селективного лазерного спекания / И. Е. Малов // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 3(33). – С. 20-25..
5. Карбонцева, М. В. Автоматизация контроля геометрических характеристик червячных и конических зубчатых колес при помощи координатно-измерительных машин / М. В. Карбонцева, Н. В. Брижинская, В. А. Левко // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2024. – Т. 25, № 2. – С. 248-255. – DOI 10.31772/2712-8970-2024-25-2-248-255. – EDN UMJSLI.
6. Обработка абразивным потоком внутренних поверхностей криволинейных волноводов прямоугольного сечения, полученных аддитивным способом / П. А. Иванов, В. А.

Левко, М. М. Михнев, Е. В. Патраев // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, № 7. – С. 600-605. – DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-7-600-605. – EDN SRDKMG.

7. Abrasive Flow Machining of the Internal Surfaces of 3D-Printed Curved Rectangular Waveguides / P. A. Ivanov, V. A. Levko, M. M. Mikhnev, E. V. Patraev // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 9. – P. 1106-1111. – DOI 10.3103/s1068798x23090113. – EDN VARJPO.

© Матвиенко В. И. 2025



## ОБРАБОТКА АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ НЕТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТИПА ОТВЕРСТИЕ МАЛОГО РАЗМЕРА

Петецкая А. Е.

Научный руководитель - В. А. Левко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: [angelina02021999@gmail.com](mailto:angelina02021999@gmail.com)

*Приведены результаты исследований по обработке абразивным потоком поверхностей типа отверстие малого размера. Дана оценка зависимостей шероховатости и микротвердость таких поверхностей в образцах из стали 12Х18Н10Т. Полученные результаты показывают применимость обработки абразивным потоком отверстий малых размеров.*

*Ключевые слова: обработка абразивным потоком, отверстие малого размера, шероховатость, микротвёрдость*

### Введение.

Малые отверстия относятся к нетехнологичным поверхностям. Так, при оценке качества выполнения отверстия малого диаметра основными критериями являются точность, форма, наличие и размер конусности по глубине канала, шероховатость поверхности, наличие микротрещин, граты [1].

Для формообразования таких поверхностей широко применяют различные способы: резание (сверление сверлами малого диаметра), лазерным и электронным лучом, электроэрозионной обработкой, электрохимической и ультразвуковой обработкой, струйно-абразивной обработкой и другие, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [2]. Одним из недостатков является невысокое качество поверхности таких каналов.

Особенно это актуально для отверстий малых диаметров, сформированных в деталях методом селективного лазерного сплавления, например, в смесительных головках. Сформированные этим методом отверстия характеризуется низкой точностью (14 квали-тет) и высокой шероховатостью ( $Ra$  более 12,5 мкм) [3]. Из-за малых размеров отверстий финишная обработка их поверхностей традиционными методами затруднена. Для их обработки необходимо применять нетрадиционные новые) методы финишной обработки [4].

Сравнительный анализ перспективы применения разных методов для финишной обработки отверстий малого диаметра показал преимущества технологии обработки абразивным потоком (*abrasive flow machining (AFM)*) по обеспечению равномерности обработки и шероховатости поверхности [5].

При *AFM* высоковязкий материал (рабочая среда), равномерно наполненный абразивными частицами, возвратно-поступательно перемещается поршнями рабочих цилиндров через обрабатываемую деталь. При таком течении среда копирует форму обрабатываемого канала, создавая сжимающее давление на обрабатываемую поверхность и осуществляя абразивный контакт [6]. Начиная с 80-х годов прошлого века метод *AFM* стал применяться для удаления дефектного слоя в отверстиях охлаждения лопаток и дисков, обработанных лазером или электроэрозионной обработкой; снятия заусенцев в отверстиях

форсунок для распыления топлива и полирования литых поверхностей лопаток, колёс компрессора и рабочих колёс [7].

В настоящее время данная технология все чаще применяется для уменьшения шероховатости и повышения микротвердости закрытых каналов деталей из аустенитно-мартенситных сталей [8], в том числе полученных методом селективного лазерного сплавления [9]. Обработкой абразивным потоком внутренних каналов образцов из мартенситностареющей стали 300, полученных селективным лазерным сплавлением, удалось повысить усталостную прочность на 26%. Однако при уменьшении диаметра обрабатываемых отверстий до 3 мм и менее, возникли проблемы с течением среды в этих отверстиях [10].

Эти проблемы связаны с высокой вязкостью рабочей среды традиционного состава. Известно, что для обработки таких отверстий в небольших по размеру деталях широко применяют метод *micro AFM*, в котором в качестве основы рабочей среды применяют низкомолекулярные неньютоновские среды [11]. Однако применение этой технологии относительно деталей из труднообрабатываемых сплавов ведет к снижению производительности обработки, т. к. низкомолекулярные среды слабо проявляют упругие свойства [12].

**Обработка абразивным потоком нетехнологичных поверхностей типа отверстие малого размера.** В результате предыдущих исследований процесса абразивно-экструзионной обработки малых отверстий экспериментально определен такой состав рабочей среды, при котором сохраняется возможность ее сдвигового течения в отверстии с малым поперечным сечением и максимальное по величине напряженно-деформированное состояние, позволяющее добиваться максимальной производительности обработки малых каналов в образцах из алюминиевого сплава АМг6. Этот состав среды (весовой): каучук СКТ – 40 %, алмазная паста – 60 %, дисперсность белого электрокорунда Ва = 40...63 мкм. Использована паста АСН 60/40 ВОМ Г – Ка = 28 %. Сдвигающее давление  $P_{вх} = 12$  МПа. Время обработки – 60 сек. Обработка проведена на установке УЭШ-25 [12].

Образцы (рис. 1) с отверстиями малых размеров 1 выполнены из листового отожженного проката стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-2014) фрезерованием за один проход, реперная точка 2 предназначена для контроля величины съема металла по результатам обработки абразивным потоком.

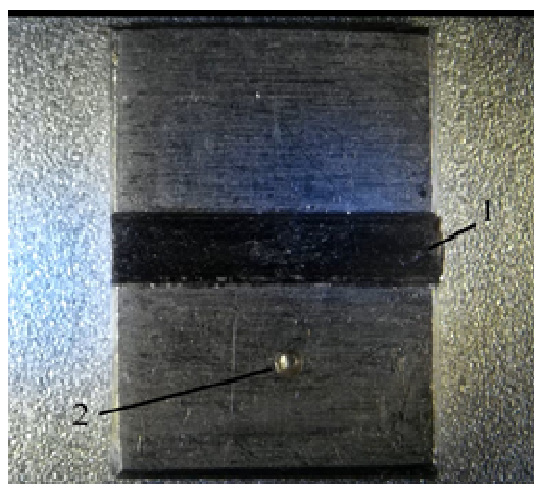


Рис 1. Образцы с отверстиями малых размеров: 1 – отверстие; 2 – реперная точка

Количественная оценка изменения шероховатости поверхностного слоя проведена на основе протоколов профилограмм (рис. 2), полученных на профилометре MarSurf M300.

Сравнительная характеристика шероховатости поверхностного слоя отверстия представлена в табл. 1.

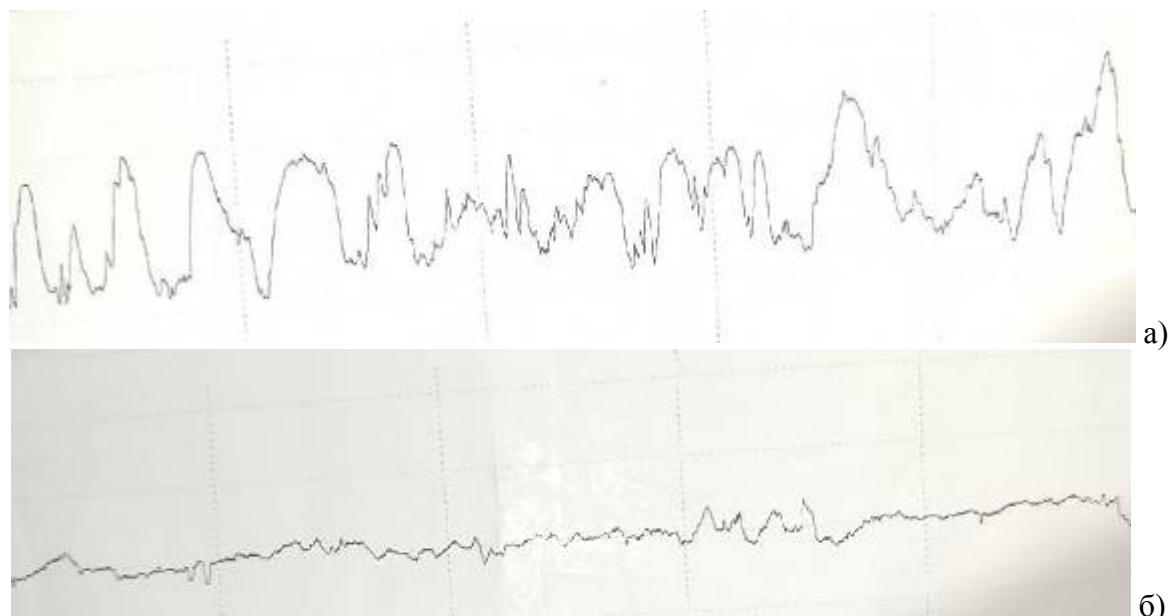


Рис. 2. Профилограмма поверхности канала  
а) после фрезерования; б) после обработки абразивным потоком

Сравнение двух полученных профилограмм показывает, что в результате обработки абразивным потоком существенно уменьшились как высотные параметры шероховатости (средние -  $Ra$ ,  $Rp$ ), так и глубинные параметры шероховатости ( $Rk$ ).

Увеличение материальных составляющих  $Mr1$  и  $Mr2$  с 7% до 10% и с 72% до 87% соответственно показывает, что в ходе обработки присутствовали такие виды контакта как микрорезание и пластическая деформация. Этот факт подтверждается возрастанием микротвёрдости поверхности канала после обработки абразивным потоком на 12...15% (для рассматриваемых образцов с 189...191 НВ до 213...220 НВ).

Таблица 1

**Сравнительная характеристика шероховатости поверхностного слоя малого канала после фрезерования и после обработки абразивным потоком по протоколам профилограмм**

| Наименование параметров шероховатости                                                                                                      | Численное значение параметров |                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
|                                                                                                                                            | после фрезерования            | после <i>AFM</i> |
| Средняя арифметическая шероховатость, $Ra$ , мкм                                                                                           | 0,464                         | 0,047            |
| Средняя высота выступов профиля, $Rp$ , мкм                                                                                                | 0,883                         | 0,133            |
| Глубина шероховатости сердцевины, $Rk$ , мкм                                                                                               | 1,187                         | 0,154            |
| Материальная составляющая, определяется для линии разреза, которая отделяет выступающие пики от основного профиля шероховатости; $Mr1$ , % | 7                             | 10               |
| Материальная составляющая, определяется для линии разреза, которая отделяет глубокие впадины от основного профиля шероховатости; $Mr2$ , % | 72                            | 87               |

Качественная оценка изменения состояния поверхностного слоя отверстий малых размеров образцов из сплава 12X18H10T была проведена на основании изображений, полученных на оптическом микроскопе (рис. 3). Для структуры поверхности отверстий малых размеров после фрезерования (рис. 3а) характерен комплекс параллельных царапин и впадин следа фрезы, которые подтверждаются протоколом профилограммы поверхности (рис.2а).

После обработки абразивным потоком направление шероховатости поверхности не изменилось (рис. 3б), но глубина царапин существенно уменьшилась. Микронеровности следа от фрезы полностью удалены. Это подтверждено протоколом профилограммы (рис. 2б), а также уменьшением показателей  $R_{max}$  с 2,484 до 0,757мкм,  $R_p$  с 0,883 до 0,133 мкм и  $R_k$  с 1,187 до 0,154 мкм.

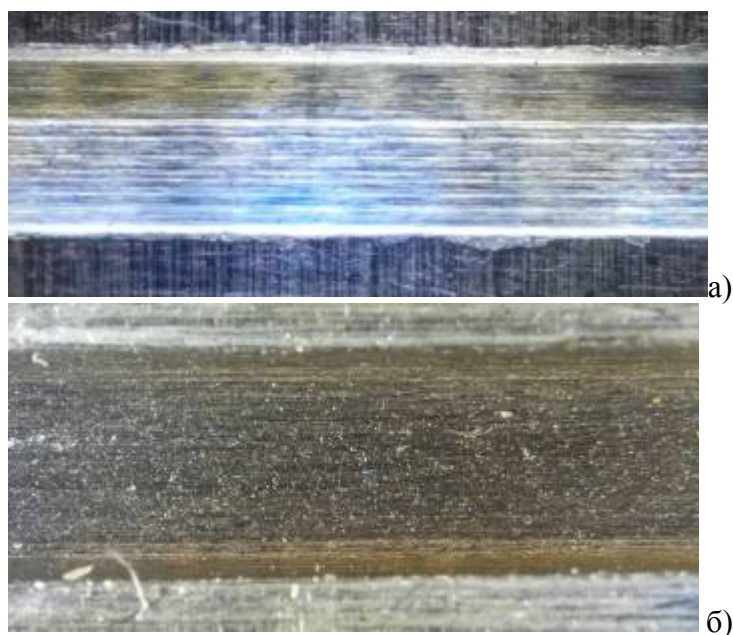


Рис. 3. Структура поверхности отверстия малого размера: а) после фрезерования; б) после 60 секунд обработки абразивным потоком

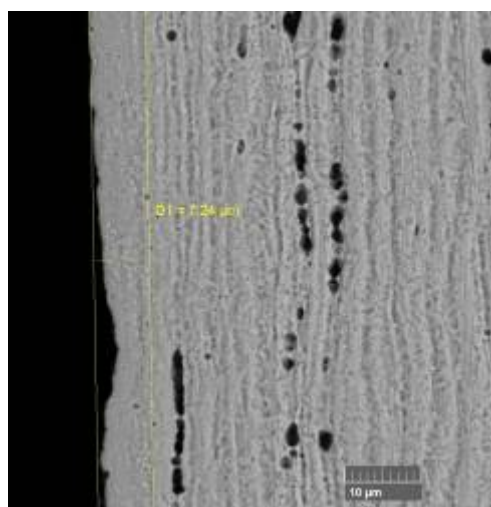


Рис. 4. Структура поверхностного слоя канала после обработки абразивным потоком (увеличение 4.33 kx)

Увеличение с 72% до 87% материальной составляющей для линии разреза, отделяющей глубокие впадины от основного профиля шероховатости, позволяет сделать вывод о том, что дефектные слои от предшествующих операций проката и фрезерования полностью удалены. Увеличение материальной составляющей для линии разреза, отделяющей выступающие пики от основного профиля шероховатости, с 7% до 10% также свидетельствует о выравнивании структуры микронеровностей поверхностного слоя.

После обработки абразивным потоком была получена равномерная структура поверхностного слоя. При этом величина шероховатости была уменьшена с  $Ra = 0,49 \dots 0,62$  мкм до  $Ra = 0,047 \dots 0,06$  мкм. Микротвёрдость поверхности в результате AFM увеличилась от величины  $h = 188 \dots 192$  НВ до  $h = 213 \dots 220$  НВ.

Структура поверхностного слоя канала после обработки абразивным потоком, полученная при помощи электронной микроскопии (SEM MAG) (рис. 4), показывает наличие упрочненного слоя с толщиной  $\approx 7,24$  мкм. Топография обработанной поверхности также демонстрирует увеличение материальных составляющих  $Mr1$  и  $Mr2$ .

Микрошлиф образца (рис. 5), демонстрирующий структуру его материала, также подтверждает увеличение микротвёрдости поверхностного слоя. Так основной материал имеет слоистую структуру зоны 1, характерную для стали 12X18H10T. В поверхностном слое зоны 2 толщины слоев уменьшаются, что свидетельствует об их деформации. Область 3 соответствует радиусу скругления боковой стенки канала.



Рис. 5. Структура материала образца, разрезанного вдоль осевой линии канала (микрошлиф): (увеличение 3.81 кх)

Таким образом в результате AFM рабочей средой установленного состава за один этап удалось обеспечить существенное уменьшение шероховатости поверхностного слоя отверстия малого размера и увеличить его микротвёрдость.

#### **Заключение.**

В результате обработки абразивным потоком удалось уменьшить величину шероховатости поверхностного слоя отверстий малых размеров с  $Ra = 0,49 \dots 0,62$  мкм до  $Ra = 0,047 \dots 0,06$  мкм, а также увеличить микротвёрдость поверхности от величины  $h = 188 \dots 192$  НВ до  $h = 213 \dots 220$  НВ. Величина упрочненного слоя  $\approx 7,24$  мкм. Анализ профилограмм поверхности показывает, что в результате обработки абразивным потоком существенно уменьшились как высотные параметры шероховатости (средние -  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rp$ ; максимальные -  $Rmax$ ), так и глубинные параметры шероховатости ( $Rk$ ).

Полученные результаты показывают хорошую обрабатываемость абразивным потоком отверстий малых размеров в образцах из стали 12X18H10T.

#### **Библиографические ссылки**

1. Широкожухова, А. А. Комбинированные методы обработки при изготовлении отверстий малого диаметра / А. А. Широкожухова, С. С. Юхневич // Перспективы разви-



тия двигателестроения : материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, Самара, 21–23 июня 2023 года / Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. Том 1. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 339-341. – EDN BSJATB.

2. Бойцов, А. Г. Современные технологии обработки отверстий малого диаметра. РИТМ машиностроения. 2020. № 5. С. 22.

3. Отработка применения аддитивных технологий при изготовлении ракетного двигателя малой тяги / Ю. Ю. Степанищев, В. В. Зуев, Д. А. Коровин [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 11–15 апреля 2022 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – С. 208-210. – EDN FQFLPL.

4. Устюгов-Грицай, А. В. Повышение надежности изготовления нетехнологичных поверхностей типа отверстие малого диаметра / А. В. Устюгов-Грицай, А. Е. Петецкая // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 27–28 февраля 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 60-63. – EDN JGOZRZ.

5. Петецкая, А. Е. Сравнительный анализ методов финишной обработки нетехнологичных поверхностей типа отверстие малого диаметра / А. Е. Петецкая, А. В. Устюгов-Грицай // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 10–14 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 232-234. – EDN LTGUZW.

6. McCarty R.W. Method of honing by extruding. Patent US, no. 3521412, 1970. (Publ. 21.07.1970)

7. Rhoades L.J. Abrasive flow machining for automatic surface finishing and capacitance technology for in-process surface and dimensional metrology // In: Surface Engineering. Dordrecht: Springer, 1990. P. 456-467. DOI: 10.1007/978-94-009-0773-7\_46

8. Обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей среды образцов литых заготовок из аустенитно-мартенситной стали / В. А. Левко, Н. С. Теряев, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 122-132. – DOI 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132. – EDN UCYFHO.

9. Adiaconitei, A.; Vintila, I.S.; Mihalache, R.; Paraschiv, A.; Frigioescu, T.F.; Popa, I.F.; Pambaguian, L. Manufacturing of Closed Impeller for Mechanically Pump Fluid Loop Systems Using Selective Laser Melting Additive Manufacturing Technology. Materials 2021, 14, 5908. <https://doi.org/10.3390/ma14205908>

10. Sangil Han, Ferdinando Salvatore, Joël Rech, Julien Bajolet, Joël Courbon. Effect of abrasive flow machining (AFM) finish of selective laser melting (SLM) internal channels on fatigue performance. Journal of Manufacturing Processes. Volume 59. 2020, Pages 248-257. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.065>.

11. Greenslet J.M., Rhoades L. J. Method and apparatus for measuring flow rate through and polishing a workpiece orifice. Patent US, no 6953387, 2004. (Publ. 11.10.2005)

12. Левко, В. А. Исследование процесса абразивно-экструзионной обработки малых отверстий / В. А. Левко, А. А. Левко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 4(37). – С. 169-173. – EDN OXPSXB.

© Петецкая А. Е. 2025

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕДНЫХ ВОЛНОВОДОВ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ 3D ПЕЧАТИ И ГАЛЬВАНОПЛАСТИКИ

А. С. Причина

Научный руководитель - В. А. Левко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: rex01111111111111111111@gmail.com

*Рассмотрены проблемы при формообразовании волноводов из меди и ее сплавов. Проведен анализ современного уровня и проблемы 3D печати медью и ее сплавами. Описаны существующие комбинированные методы 3D печати и гальванопластики. Сформулированы преимущества данной технологии при изготовлении медных волноводов.*

*Ключевые слова:* 3D печать, гальванопластика, волновод, медный сплав

**Введение.** Основным элементом волноводной линии передачи являются волновод. Волноводы представляют собой трубы прямоугольного, круглого, эллиптического поперечного сечения, имеющей проводящую внутреннюю поверхность, и присоединенных (интерфейсных) фланцев с помощью способа пайки или сварки. Различают 45 сочетаний размеров (высота и ширина) внутреннего сечения труб [1].

Изготавливаются волноводы из алюминиевых, медных, латунных или никелевых сплавов с гальвано-химическим покрытием внутреннего канала серебром, золотом и электропроводным окисным покрытием [2].

В связи с быстрым развитием аддитивных технологий появилась возможность формообразования волноводов любой конфигурации и длины, а также с любой формой поперечного сечения. В этом направлении находит более широкое применение методы электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии [3], 3D печати в целом [4], и селективного лазерного сплавления, в частности [5].

При рассмотрении методов изготовления волноводов способ электролитического осаждения металла на предварительно изготовленные модели находит постоянное применение, особенно при покрытии рабочей поверхности волновода драгоценными металлами (золото и серебро), что позволяет иметь низкое удельное сопротивление у токонесущей поверхности, низкие потери на отражение и защитную пленку от окисления основного материала. Покрытие моделей медью дает неоднозначное решение [6].

**Современный уровень и проблемы 3D печати медью и ее сплавами.** 3D-печать медью и медными сплавами имеет свою специфику. Так медь имеет температуру плавления около 1085°C. Она окисляется при высоких температурах, что обуславливает необходимость применения вытеснения из зоны печати кислорода инертным газом, например, аргоном. Высокая отражательная способность меди вызывает существенное отражение лазерного луча, что значительно влияет на процесс нагрева, плавления или спекания медного порошка, а большая вязкость медного расплава требует мощных и точных систем для контроля процесса печати. Медь имеет невысокие адгезионные показатели, что затрудняет процесс соединения медных деталей с подложкой, а также вызывает различные деформации и отслоения в процессе печати.

Для обеспечения необходимого качества получаемых деталей требуется использование специально подготовленных порошков с оптимальными размерами и формами частиц, а также специальных систем печати. Использование стандартных лазерных 3D-



принтеров для формирования деталей из меди и ее сплавов существенно ограничено. В частности, применяются принтеры с несколькими лазерами и подогреваемой платформой. Однако для 3D печати деталей из меди и ее сплавов все большее применение находят специальные технологии и оборудование.

Так использование промышленного зеленого лазера позволяет печатать 3D-материалы, такие как медь, медные сплавы и драгоценные металлы, которые трудно обрабатывать инфракрасными волнами. Две технологии порошкового слоя для металлической 3D-печати, DMLS (прямое лазерное спекание металлов) и EBM (электронно-лучевое плавление), работают путем нанесения тонкого слоя медного порошка на платформу внутри принтера. Порошок нагревается, в то время как лазеры или электронные лучи прорисовывают первый слой детали. Когда частицы в слое сплавляются, платформа немного опускается в камеру сборки, а сверху насыпается свежий порошок, и процесс повторяется [7].

Большее применение находят струйные 3D-принтеры с медным связующим, при котором медный порошок, скрепленный жидким связующим веществом, спекается в печи. Струйное нанесение связующего – это процесс без нагрева, при котором связующий слой распыляется между каждым слоем металла; связующее вещество затем удаляется в процессе спекания [8].

Практически любой принтер для метода наплавленного осаждения (FDM) может печатать почти целиком металлические детали с помощью полимерного филамента, наполненного медным порошком. 3D печать ведется на принтере с закаленным соплом и нагреваемым до температуры 225 °C. Однако полученные таким образом детали требуют дополнительной постобработки, чтобы расплавить полимерное связующее и оставить только металл. Эта технология направлена на декоративные цели [9].

Направленное энергетическое осаждение (DED) – это система, разработанная компанией Optomes из Нью-Мексико для создания, улучшения и ремонта металлических деталей, в том числе из меди. Подобно технологии селективного лазерного сплавления SLS, в этой системе мощные лазеры послойно наращивают 3D-структуры, создавая детали с высокой плотностью и прочностью [10].

Холодное напыление – это технология аддитивного производства, при которой металлический порошок впрыскивается в сверхзвуковой поток газа под давлением. Вместо того чтобы плавить металл, холодное напыление скрепляет его в процессе, называемом пластической деформацией. Уникальность процесса WarpSpee3D компании Spee3D заключается в использовании сверхзвукового 3D-осаждения для производства деталей из ряда металлических порошковых материалов, включая медь и алюминий [11].

Фотополимеризация основана на использовании фотополимерной смолы, послойно отверждаемой в процессе печати в специальном резервуаре 3D-принтера. Одним из трех методов фотополимеризации является метод цифровой обработки светом (Digital Light Processing (DLP)). Металлическая DLP 3D-печать похожа на смоляную 3D-печать тем, что в ней используется ультрафиолетовый свет, проецируемый на светочувствительную суспензию для послойного затвердевания. Вместо смолы в металлических DLP-принтерах используется жидкий полимер, наполненный металлическим порошком и небольшим количеством связующего вещества. Требуется обязательная многоступенчатая постобработка [12].

Обзор современного уровня и проблем 3D печати медью и ее сплавами показал, что формообразование волноводов этим методом сопряжено с большими затратами, требует применения специальных технологий и оборудования с большим объемом постобработки.

#### **Комбинированный метод 3D печати и гальванопластики.**

Гальваническое покрытие в аддитивном производстве, также известном как 3D-печать, предполагает нанесение слоя металла на поверхности деталей, напечатанных на

3D-принтере. Этот метод в основном используется для повышения электропроводности, износостойкости или эстетической привлекательности напечатанных объектов. Интеграция гальванического покрытия в процессы аддитивного производства открывает новые возможности для создания более функциональных и сложных компонентов в различных отраслях, таких как электроника, аэрокосмическая промышленность и автомобилестроение. Процесс интеграции гальванического покрытия в 3D-печать обычно включает в себя создание базового объекта с помощью стандартных технологий 3D-печати, таких как послойное наплавление (FDM), селективное лазерное спекание (SLS) или стереолитография (SLA). После печати объект подвергается подготовке поверхности, которая может включать в себя очистку, выравнивание и нанесение проводящего слоя, если базовый материал не является проводником. Затем подготовленная деталь подвергается гальваническому покрытию желаемым металлом, таким как медь, никель или золото [13].

Дальнейшим развитием стало устройство для трехмерной (3D) печати, использующее селективное электрохимическое осаждение для выборочного нанесения металлического материала на подложку с использованием сопла для струйной подачи электролита под заданным давлением (рис. 1). Медное изделие печатается в 3D режиме при выборочном нанесении материала на подложку, а электролит непрерывно подается под заданным давлением. Это существенно повышает скорость 3D печати и позволяет не только наносить покрытие, но и формировать объемного типа медные изделия сравнительно большой формы [14].

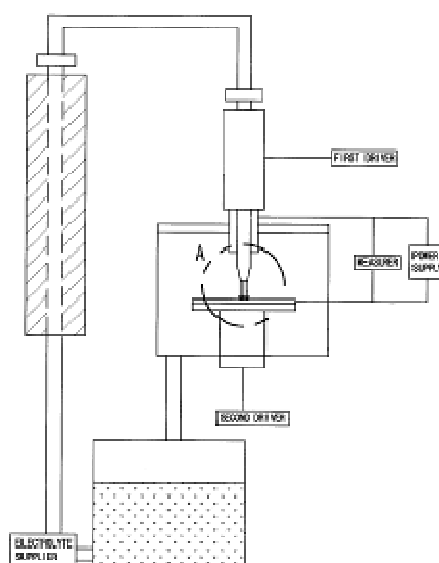


Рис. 1. Устройство 3D печати с использованием селективного электрохимического осаждения [14]

Однако размеры таких изделий малы и не превышают 1 мм. Так, с использованием аналогичной технологии удалось получить медную трубку с тонкой стенкой и диаметром 0,4 мм (рис. 2) [15].

Волноводы из меди и ее сплавов имеют гораздо большие размеры и требуют существенной доработки устройств 3D печати с использованием селективного электрохимического осаждения.

Гальванопластическое изготовление волноводных деталей сложной формы из меди известно давно. Для этого применялись разрушаемые алюминиевые формы (оправки), которые после наращивания слоев необходимой толщины удалялись травлением в рас-

творе щелочи или в соляной кислоте [16]. Однако данная технология требует весьма точного изготовления оправок для каждого изготавливаемого волновода.

Формообразование медных волноводов комбинированным методом 3D печати и гальванопластики не требует изготовления специальных оправок. Устройства 3D печати с использованием селективного электрохимического осаждения существенно проще по своей конструкции, чем специальные 3D принтеры селективного лазерного сплавления, фотополимеризации методом DLP и направленного энергетического осаждения DED.

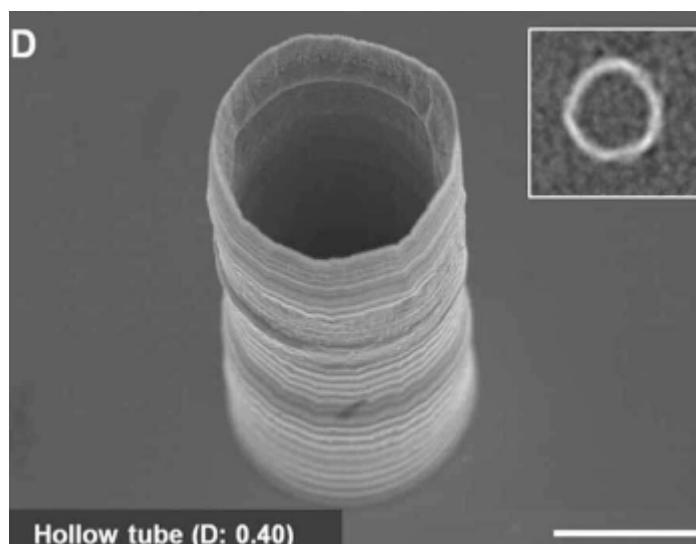


Рис. 2. Полая медная трубка диаметром 0,4 мм, полученная на устройстве 3D печати методом 3D печати с использованием метода гальваники [15]

При соответствующей доработке комбинированный метод 3D печати и гальванопластики можно использовать для формообразования волноводов из меди и ее сплавов.

**Заключение.** Медные волноводы обладают определенным преимуществом, по сравнению с волноводами из других металлов. Однако свойства меди и ее сплавов накладывают существенные ограничения на применение современных технологий при формообразовании волноводов. Так 3D печать медью и ее сплавами отличается очень высокой стоимостью, а комбинированные методы 3D печати и гальванопластики пока не позволяют получать детали требуемых размеров. Однако совершенствование данной технологии позволит изготавливать волноводы из меди и ее сплавов на относительно недорогом оборудовании и с применением более простых технологий. При этом постобработка полученных деталей может быть сведена к минимуму.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ 20900-2014. Трубы волноводные медные и латунные прямоугольные. Технические условия.
2. Ишенина Н.Н., Конева Л.М., Михнёв М.М. Опыт внедрения технологии гибки волноводных трактов антенно-фидерных систем современных космических аппаратов в АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева». Экономика и управление: проблемы, решения. 2017. Т. 4. № 5-2. С. 127-133.
3. Особенности получения и организации структуры крупногабаритных функционально-градиентных биметаллических элементов на основе нержавеющей стали и меди методом электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии / А. В. Чумаевский, К. С. Осипович, В. М. Семенчук [и др.] // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2024. – № 1(47). – С. 47-57. – DOI 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-47-57. – EDN XBTONQ.

4. Применение 3D-печати для изготовления элементов радиоэлектронной аппаратуры космического назначения / А. Е. Тюлин, Г. А. Ерохин, А. В. Павлов [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2022. – Т. 9, № 3. – С. 76-90. – DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.3.76.90. – EDN MJSEYK.
5. Abrasive Flow Machining of the Internal Surfaces of 3D-Printed Curved Rectangular Waveguides / P. A. Ivanov, V. A. Levko, M. M. Mikhnev, E. V. Patraev // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 9. – P. 1106-1111. – DOI 10.3103/s1068798x23090113. – EDN VARJPO.
6. Крайнов, В. В. Эффективность дорнования в медных (волноводных) деталях / В. В. Крайнов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2014. – № 5(107). – С. 225-229. – EDN TOEYWB.
7. Trumpf : additive production systems : официальный сайт. – URL: [https://www.trumpf.com/en\\_GB/products/machines-systems/additive-production-systems/](https://www.trumpf.com/en_GB/products/machines-systems/additive-production-systems/)
8. 3D Printing Industry : digital metal triples speed of DM P2500 3D-printer : официальный сайт. – URL: <https://3dprintingindustry.com/news/digital-metal-triples-speed-of-dm-p2500-3d-printer-with-software-upgrade-170611/>
9. 3D Printing Industry : 3D printed metal parts from a microwave? Virtual Foundry unveils new method : официальный сайт. – URL: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-metal-parts-from-a-microwave-virtual-foundry-unveils-new-method-216199/>
10. Optomec : LENS Directed Energy Deposition (DED) 3D Printed Metal Technology: официальный сайт. – URL: <https://optomec.com/3d-printed-metals/lens-technology/>
11. Spee3D : WarpSpee3D : официальный сайт. – URL: <https://www.spee3d.com/product/warpspee3d/>
12. Holo : PureForm additive manufacturing technology : официальный сайт. – URL: <https://holoam.com/technology>
13. Proplate : The future of electroplating in 3D-printed electronics : официальный сайт. – URL: <https://www.proplate.com/the-future-of-electroplating-in-3d-printed-electronics/>
14. Patent US 2018178461 A1. 3D PRINTING APPARATUS USING SELECTIVE ELECTROCHEMICAL DEPOSITION. KIM SUNGBIN, YOO BONGYOUNG.
15. Patent KR 102015009969 1A. 3D PRINTING APPARATUS AND 3D PRINTING METHOD USING ELECTROPLATING METHOD/
16. Авторское свидетельство № 144694 A1 СССР, МПК C25D 1/02. Способ гальванопластического изготовления деталей волноводов сложной формы : № 722229 : заявл. 15.03.1961 : опубл. 01.01.1962 / Л. Г. Белая, В. А. Дьяконов, Л. А. Куликова [и др.]. – EDN XCJUBW.

© Причина А. С. 2025

## ОСОБЕННОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОТОКОМ ШАРИКОВ

Л.П. Сысоева, В.А. Левко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: [levko@sibsau.ru](mailto:levko@sibsau.ru)

*Рассмотрены особенности технологии упрочнения поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов потоком шариков как разновидности процесса обработки абразивным потоком. Особое внимание уделено структуре поверхностного слоя после обработки и степени его упрочнения.*

*Ключевые слова: обработка абразивным потоком, упрочнение, шероховатость, отделочно-упрочняющая обработка*

**Введение.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием производится с целью поверхностного упрочнения детали, уменьшения исходной шероховатости поверхности и увеличения ее несущей способности [1]. Для этого вида обработки характерно минимальное изменение размеров обрабатываемой поверхности за счет исключения процесса микрорезания. В настоящее время для упрочнения поверхностного слоя деталей с одновременным уменьшением удаляемого припуска в процессе обработки предложено заменить абразивный наполнитель рабочей среды на стальные шарики [2, 3].

Так в результате обработки образцов из сплава АМгб удалось обеспечить шероховатость поверхности  $Ra = 0,2$  мкм и увеличить микротвердость поверхности на 15% [2]. В результате обработки потоком шариков образцов из стали DIN 1.2080 после электроэрозионной вырезки проволокой за 180 циклов обработки удалось уменьшить шероховатость поверхности от  $Ra = 1,848$  до  $Ra = 0,498$  мкм и полностью удалить дефектный слой [3].

Целью данного исследования было исследование особенности упрочнения поверхностей плоских образцов из сплава АМгб потоком шариков как разновидности обработки абразивным потоком.

**Особенности упрочнения поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов потоком шариков.** При обработке абразивным потоком в процессе течения сдвига вязкоупругой рабочей среды в ней возникает градиент скорости потока, воздействующий на шарики (рис. 1а). Градиент скорости потока обуславливает возникновение нормальных и касательных напряжений в среде, вызывающих радиальные  $F_n$  и осевые усилия  $F_k$ . При этом шарики радиусом  $R$  потоком среды перемещаются со скоростью  $V$  относительно неподвижной обрабатываемой поверхности, совершая при этом вращение с некоторой угловой скоростью  $\omega$  и вступая в массовые контактные взаимодействия с микронеровностями этой поверхности (рис. 1б). При повороте шарика относительно мгновенного или постоянного центра в контакт вступают новые участки поверхности. Величина относительных скоростей разных точек шарика определяется градиентом  $V$ , а контакт шарика и поверхности представляет собой площадку конечных размеров  $K$ .

В точке  $A$  возникает реакция поверхности  $F_n^*$  на нагрузку, величина которой и определяет вид контактного взаимодействия. Так как шероховатость шарика намного меньше шероховатости поверхности, то шарик можно считать гладким (угол контакта тупой

во всех случаях). Каждый шарик, контактирующий с поверхностью, является отдельным деформирующим элементом.

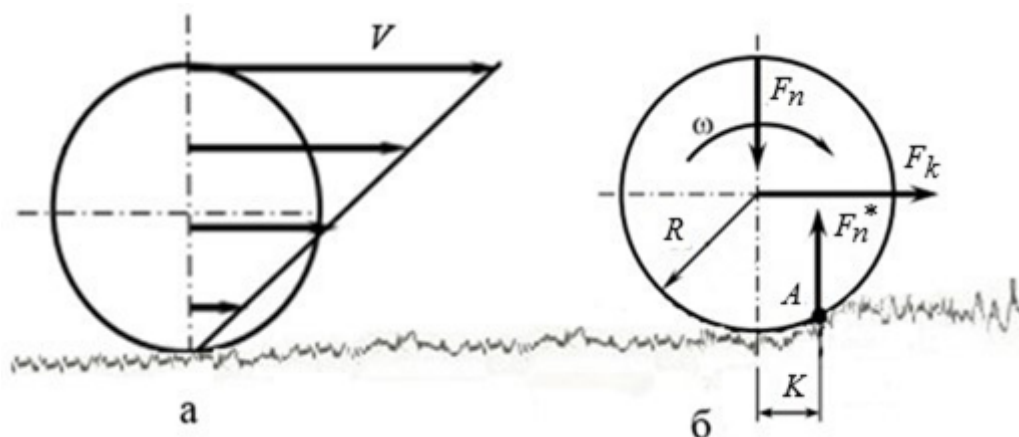


Рис. 1. Схема: а – градиента скорости потока относительно шарика, контактирующего с шероховатой поверхностью; б – реакций, возникающих при контакте шарика с микронеровностями поверхности

Для исследований отделочно-упрочняющей обработки поверхности образцов из сплава АМг6 была использована рабочая среда с полимерной основой из синтетического кремнийорганического каучука СКТ (33% массового содержания) и шариков из стали ШХ-15 диаметром 1 мм (67% массового содержания). Твердость поверхности шариков  $H$  в 12...15 раз выше, чем твердость поверхности алюминиевых образцов.

Обработка проведена на установке для двусторонней обработки УЭШ-25 на четырех режимах с давлением сдвига  $P$ : 6 МПа, 8 МПа, 10 МПа и 12 МПа. На каждом режиме обрабатывалось шесть образцов. Измерение выходных факторов ( $Ra$ ,  $h_{пл}$  и  $H$ ) осуществлялось после 10 и 20 циклов обработки.

Структура поверхности плоских образцов из сплава АМг6 после 20 циклов обработки с давлением сдвига  $P$  6 МПа, 8 МПа, 10 МПа и 12 МПа контролировалась на оптическом микроскопе (рис. 2).

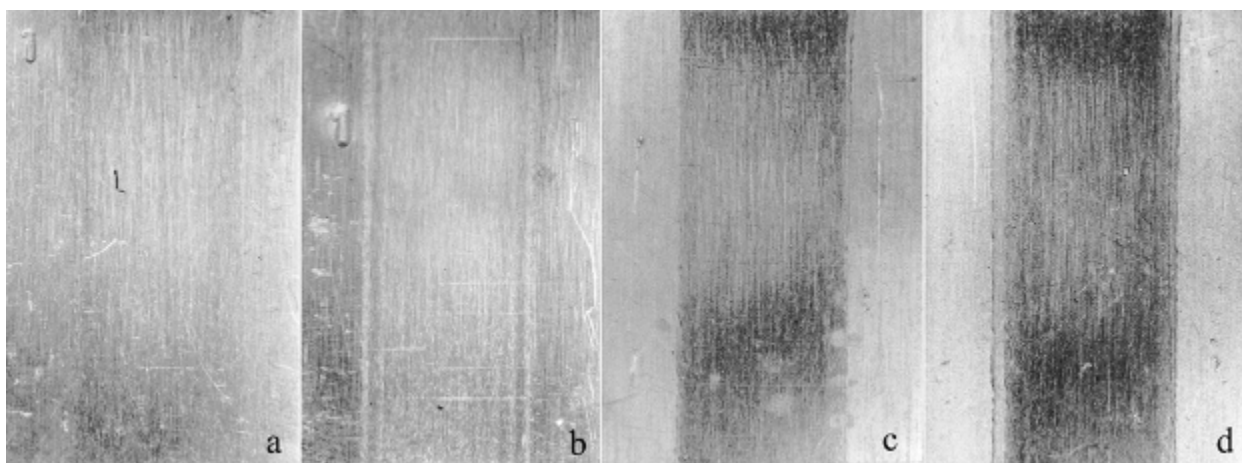


Рис. 2. Поверхность плоских образцов из сплава АМг6 после 20 циклов обработки с давлением сдвига  $P$ : а – 6 МПа; б – 8 МПа; с – 10 МПа; д – 12 МПа

Исходная структура поверхности образца изменилась, в том числе в цветовой гамме. Произвольное направление шероховатости изменилась на направление, параллельное потоку рабочей среды (совпадает с траекторией движения шариков). Структура поверх-

ности представлена в виде следов контакта (бороздок), характерных для накатывания шариком. Ширина бороздок на поверхности уменьшалась с возрастанием величины давления сдвига от  $P = 6$  МПа (0,1...0,15 мм),  $P = 8$  МПа (0,07...0,09 мм) и  $P = 10$  и 12 МПа (0,05...0,07 мм).

Величина продольной шероховатости  $Ra$  за 20 циклов уменьшилась с 3,1...3,3 мкм до 0,19...0,22 мкм. Микротвердость поверхности  $HV$  также увеличилась от 65 до 127...130 МПа. Глубина упрочненного слоя  $h_{пл}$  в зависимости от величины  $P$  и количества циклов обработки составила от 4...6 мкм до 14...17 мкм.

Микроструктура шлифа образца из сплава АМг6, обработанного 20 циклами с величиной давления  $P = 10$  МПа при увеличении  $\times 450$  (рис. 3) демонстрирует, что в структуре приповерхностного слоя (зона *a*) наблюдается существенное повышение плотности дислокаций по сравнению со структурой основного материала (зона *b*), что свидетельствует о том, что исследуемый процесс приводит к формированию в приповерхностном слое образцов субмикрокристаллической структуры с повышенным уровнем микроискажений. При приближении к обрабатываемой поверхности плотность дислокаций увеличивается и формируется ячеистая структура. В зоне, лежащей сразу же под обрабатываемой поверхностью, степень пластической деформации имеет такую величину, что соседние фрагменты сливаются, образуя мелкозернистую структуру.

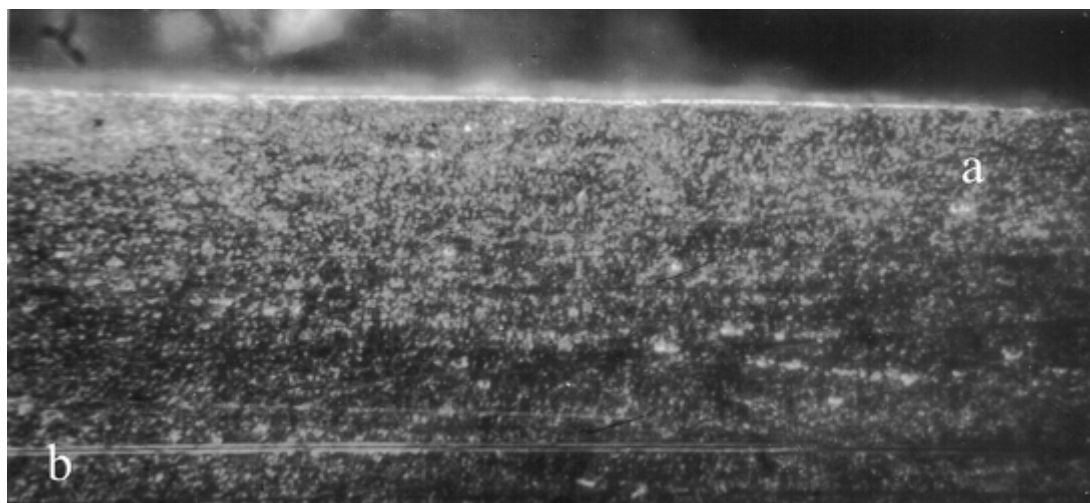


Рис. 3. Микроструктура шлифа образца из сплава АМг6 (увеличение  $\times 450$ ): а – упрочненный слой; б – основная структура материала

Таким образом необходимо выделить следующие особенности упрочнения поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов потоком шариков. В точке *A* контакта шарика возникает реакция поверхности  $F_n^*$  на нагрузку, величина которой и определяет вид контактного взаимодействия. Массовый контакт шариков с обрабатываемой поверхностью обеспечивает поток вязкоупругой среды, в котором возникают как касательные, так и упругие напряжения. Эти напряжения создают усилия, достаточные для обеспечения таких контактных взаимодействий каждого шарика с обрабатываемой поверхностью как пластическая деформация. Так как шарики гладкие, то в ходе их контакта с поверхностью процесса микрорезания не возникает. При больших значениях давления сдвига  $P$  возможен механизм пластического оттеснения.

Нами предложены зависимости [4], позволяющие рассчитать необходимое упрочнение и улучшение шероховатости поверхностного слоя обрабатываемой детали с учетом свойств ее материала ( $E, \mu, \sigma_T$ ), исходной шероховатости поверхности  $Ra_{исх}$ , площади поперечного сечения обрабатываемого канала  $S_{поп}$ , технологических параметров обработки

( $T$ ,  $n_{ц}$ ), а также за счет уточнения как состава рабочей среды ( $R_{\text{шар}}$ ,  $E_{\text{ср}}$ ,  $Q$ ), так и величины давления рабочей среды.

**Заключение.** Особенности упрочнения поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов потоком шариков позволяют обеспечить упрочнение в труднодоступных местах в 2...3 раза и существенно уменьшить шероховатость. При этом исключен такой механизм контактных взаимодействий как микрорезание. Правильный выбор состава рабочей среды и величины давления сдвига обеспечивают требуемую производительность процесса и исключают пластическое отеснения материала и возникновение дополнительных поверхностных дефектов.

### Библиографические ссылки

1. Гуров, Р. В. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием / Р. В. Гуров, А. Н. Щербаков // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – № 4(118). – С. 3-9. – DOI 10.30987/2223-4608-2021-4-3-9. – EDN VGMKTE.
2. Авторское свидетельство № 1379063 А1 СССР, МПК В24В 39/02. Способ чистовой обработки сквозных отверстий деталей : № 3962544 : заявл. 03.10.1985 : опубл. 07.03.1988 / С. К. Сысоев ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я В-8597. – EDN IWTYGU.
3. SAHIN, B., GOV, I., KALAK, M. et al. Surface quality enhancement of cold work tool steel by GOV (flow peening) process versus abrasive flow machining. *Sādhanā* 49, 24 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02350-6>
4. Отделочно-упрочняющая обработка потоком стальных шариков деталей из термически неупрочняемых сплавов / В. А. Левко, Л. П. Сысоева, А. С. Сысоев [и др.] // Решетневские чтения : Материалы XXVIII Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 18–22 ноября 2024 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2024. – С. 562-564. – EDN ELHUYQ.

© Сысоева Л. П., Левко В. А. 2025



## ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

А.Ю. Тимошева\*, Д.И. Орешкин, А.В. Гирн, Д.О. Савельев, Д.В. Раводина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: [timosheva03@mail.ru](mailto:timosheva03@mail.ru)

*Работа посвящена контролю работоспособности электролитов для микродугового оксидирования алюминиевых сплавов. Определены физико-химические свойства силикатно-щелочного и силикатно-фосфатно-щелочного электролитов при разном объеме выработки. Выявлены различия характера изменений свойств электролитов.*

*Ключевые слова: микродуговое оксидирование, выработка электролита, удельная электропроводность*

**Введение.** Одним из перспективных методов создания модифицированных слоев на поверхности алюминиевых сплавов является метод микродугового оксидирования (МДО). Данный способ позволяет получать оксидные покрытия с уникальными защитными, прочностными, диэлектрическими и декоративными свойствами.

Одной из причин, сдерживающих широкое применение данного метода, является отсутствие данных о влиянии выработки электролита на свойства получаемых покрытий. Предполагается, что физико-химические свойства электролита имеют тенденцию к ухудшению по мере выработки.

Механизм образования дефектов на покрытии, связанных со снижением электропроводности электролита, можно описать следующим образом: снижение концентрации анионов в электролите означает, что в объем плазмы попадает меньшее количество ионов, снижается ток разряда и интенсивность химических реакций. Таким образом, образующиеся в результате воздействия микродугового разряда каналы могут оказаться незаполненными и следующий разряд, попадающий в эту область, расплавляет металл, который вытекает на поверхность покрытия и образует различные дефекты [1].

Однако, в настоящее время не существует точного критерия оценки выработки электролита.

На практике, об изменениях в составе и работоспособности электролитов судят по параметрам деталей, обработанных в электролите на одном и том же режиме спустя некоторое количество обработок: толщина покрытия, пористость, образование дефектов на поверхности и др. Также о выработке можно говорить, исследуя электролит органолептически, т.е. оценив цвет, прозрачность, наличие осадка и др. К точным методам проверки работоспособности электролита относят химический анализ состава электролита и концентрации веществ. Также существует оценочный способ – измерение удельного количества электричества  $Q$ , прошедшего через электролит [2].

Целью данной работы является изучение физико-химических параметров электролитов, находящихся на разной стадии выработки, и оценка их работоспособности.

**Методика проведения эксперимента.** Для эксперимента выбраны 2 электролита: силикатно-щелочной (СЩ) и силикатно-фосфатно-щелочной (СФЩ). Их составы указаны в таблице 1. Выбор электролитов обусловлен их широким применением, дешевизной, экологичностью и способностью образовывать с алюминием и другими вентильными

металлами твердые и химически инертные соединения. СЩ электролит относится к группе сильных электролитов, а СФЩ – к группе слабых электролитов.

| Таблица 1. Составы электролитов для исследования выработки |                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Силикатно-щелочной (СЩ)                                    | KOH (4 г/л) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (10 г/л)                                          |
| Силикатно-фосфатно-щелочной (СФЩ)                          | NaOH (2 г/л) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (9 г/л) + H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (3 г/л) |

Проводилась обработка алюминиевых пластин марки А5 с площадью поверхности 0,5 дм<sup>2</sup>. Процесс МДО осуществлялся с использованием тиристорного источника тока ИАТ-Т. Плотность тока в среднем составляла 20 А/дм<sup>2</sup>, использовались следующие соотношения анодной и катодной части тока: 1, 0,8 и 1,1. Время оксидирования варьировалось от 5 до 60 минут. За величину, отражающую степень выработки, была принята единица А\*ч/л. В ходе работы с электролитами было взято по 7 проб раствора, через каждые 2 А\*ч/л. После каждой отобранной пробы проводилась контрольная обработка образца, выполненная на одинаковом режиме: для СЩ – (+5,7А -4,3А, 10 мин), для СФЩ – (+5А -5А, 15 мин).

Первичный физико-химический анализ проб электролитов подразумевал измерение удельной электропроводности посредством лабораторного кондуктометра ЕС400F, уровня pH с использованием pH-метра Testo 206, а также коэффициента преломления, определяемого на рефрактометре ИРФ-454.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты всех измерений представлены в таблицах 2 и 3, а также на рис. 1 и 2.

Таблица 2. Изменение характеристик СЩ электролита по мере выработки

| № пробы | Выработка,<br>А*ч/л | Электропровод-<br>ность, мСм/см | рН    | Коэф. прелом-<br>ления |
|---------|---------------------|---------------------------------|-------|------------------------|
| 1       | 0                   | 11,53                           | 12,22 | 1,3340                 |
| 2       | 2,17                | 11,60                           | 12,05 | 1,3342                 |
| 3       | 4,06                | 11,23                           | 11,89 | 1,3348                 |
| 4       | 6,17                | 10,51                           | 11,77 | 1,3348                 |
| 5       | 8,03                | 10,11                           | 11,75 | 1,3350                 |
| 6       | 10,11               | 10,00                           | 11,76 | 1,3350                 |
| 7       | 12,02               | 9,96                            | 11,75 | 1,3350                 |

Таблица 3. Изменение характеристик СФЩ электролита по мере выработки

| № пробы | Выработка,<br>А*ч/л | Электропро-<br>водность,<br>мСм/см | рН    | Коэф. прелом-<br>ления |
|---------|---------------------|------------------------------------|-------|------------------------|
| 1       | 0                   | 5                                  | 10,48 | 1,3342                 |
| 2       | 2,23                | 5,6                                | 10,68 | 1,3345                 |
| 3       | 4,06                | 5,87                               | 10,47 | 1,3345                 |
| 4       | 6,04                | 6,02                               | 10,38 | 1,3348                 |
| 5       | 8,08                | 6,24                               | 10,44 | 1,3350                 |
| 6       | 10,08               | 6,38                               | 10,41 | 1,3350                 |
| 7       | 12,08               | 6,48                               | 10,43 | 1,3350                 |

Изменение электропроводности электролитов обусловлено диссоциацией веществ в ходе процесса МДО. На эту величину главным образом оказывают влияние природа электролита, а также концентрация веществ [3]. Коэффициент преломления в растворах практически не изменялся.

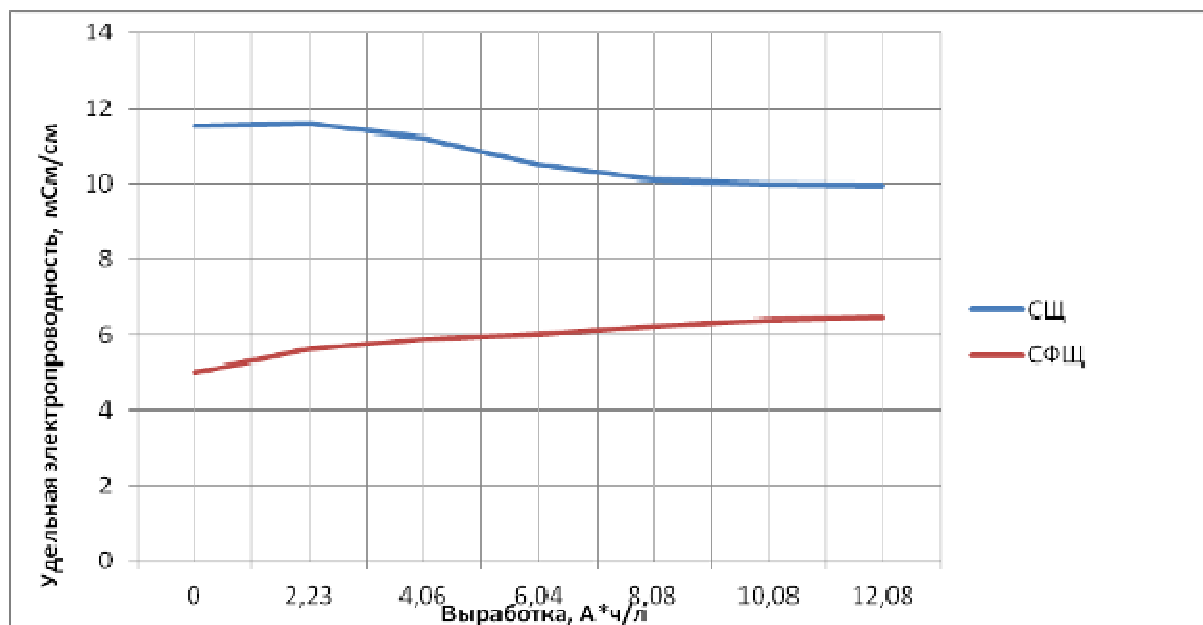


Рис. 1. Изменение электропроводности СЩ и СФЩ электролитов по мере выработки

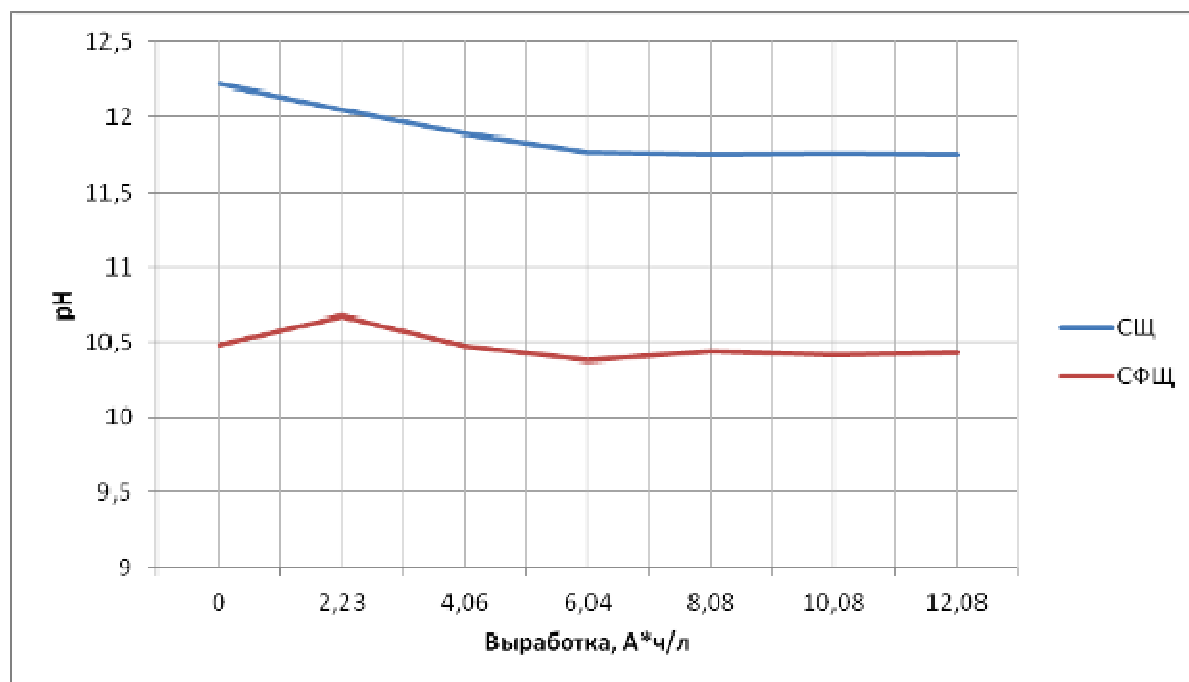


Рис. 2. Изменение pH СЩ и СФЩ электролитов по мере выработки

СЩ электролит, содержащий КОН, относится к группе сильных электролитов. Из графика на рис. 1 видно, что по мере выработки электропроводность в целом имеет тенденцию к снижению, однако до 2 А\*ч/л эта величина возрастает до определенного максимума. Это связано с тем, что при большой концентрации веществ, характерной для свежего электролита, между ионами возникает сильное взаимодействие. Снижение концентрации приводит к увеличению скорости движения ионов в электролите, отчего

электропроводность повышается. При дальнейшей выработке скорость движения ионов перестает зависеть от концентрации, и электропроводность начинает снижаться пропорционально числу ионов [4]. Согласно полученным данным при больших значениях выработки электропроводность начинает снижаться незначительно, что может свидетельствовать о том, что количество ионов, участвующих в процессе, достигло минимума, при котором необходима корректировка состава электролита. Кроме того, наблюдается снижение уровня pH в электролите на 3,6%, как показано на рис. 2.

СФЩ электролит является слабым, и, исходя из рис. 1, можно заметить, что зависимость электропроводности от выработки выражена слабее. Стоит также заметить, что кривая стремится к максимуму. В данном случае эффект объясняется тем, что при уменьшении концентрации увеличивается степень диссоциации, т.е. количество активных ионов в растворе увеличивается быстрее, чем снижается концентрация. После прохождения пиковой точки электропроводность также будет снижаться из-за уменьшения активности ионов [4]. В целом, электропроводность СФЩ электролита в 2 раза ниже, чем у СЩ, а процесс МДО протекает при очень высоком анодном напряжении – 700В. Однако за 12 А\*ч/л выработки электропроводность повышалась и так и не достигла своего максимума. Это может означать, что срок эксплуатации такого электролита гораздо выше, чем у СЩ. Уровень pH в СФЩ электролите изменялся незначительно.

При внешнем осмотре проб электролита было отмечено, что с увеличением выработки раствора наблюдается помутнение и снижение прозрачности. Данный эффект становится заметен при выработке в 8 А\*ч/л.

На рис. 3 представлены поверхности полученных покрытий.

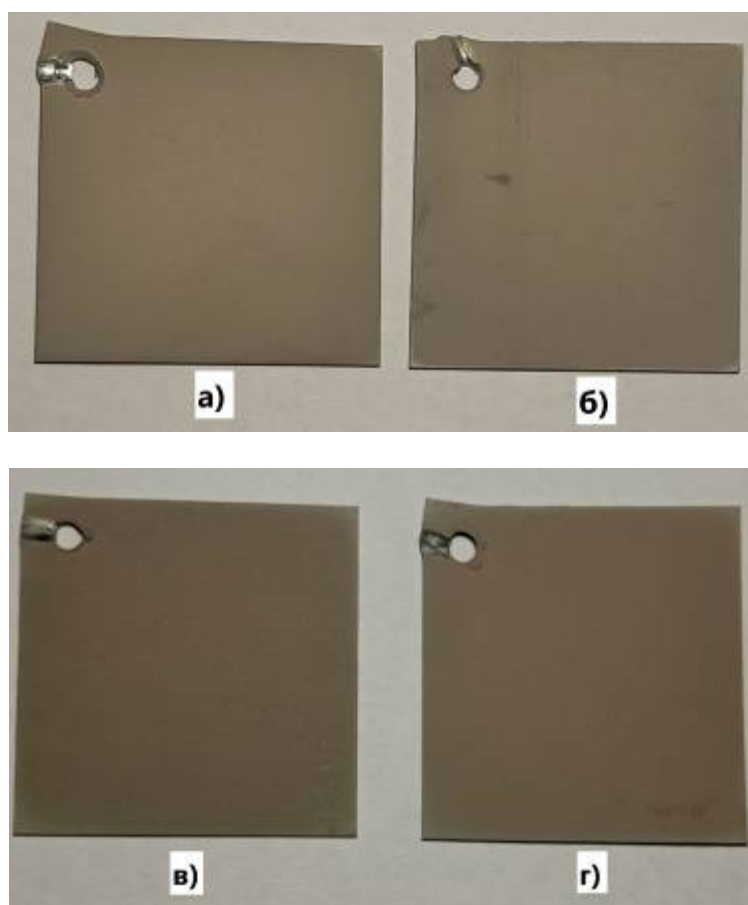


Рис. 3. Внешний вид полученных покрытий  
а) СЩ (0 А\*ч/л) , б) СЩ (12 А\*ч/л), в) СФЩ (0 А\*ч/л), г) СФЩ (12 А\*ч/л)

При анализе полученных покрытий были отмечены незначительные изменения. По мере выработки покрытие, полученное в СЩ электролите, становится менее однородным по цвету, а для покрытия, полученного в СФЩ электролите, наблюдается обратный эффект. Для более детального изучения покрытий были сделаны фотографии микроструктуры на комплексе цифровой микроскопии NEOPHOT 32. Результаты отражены на рис. 4.

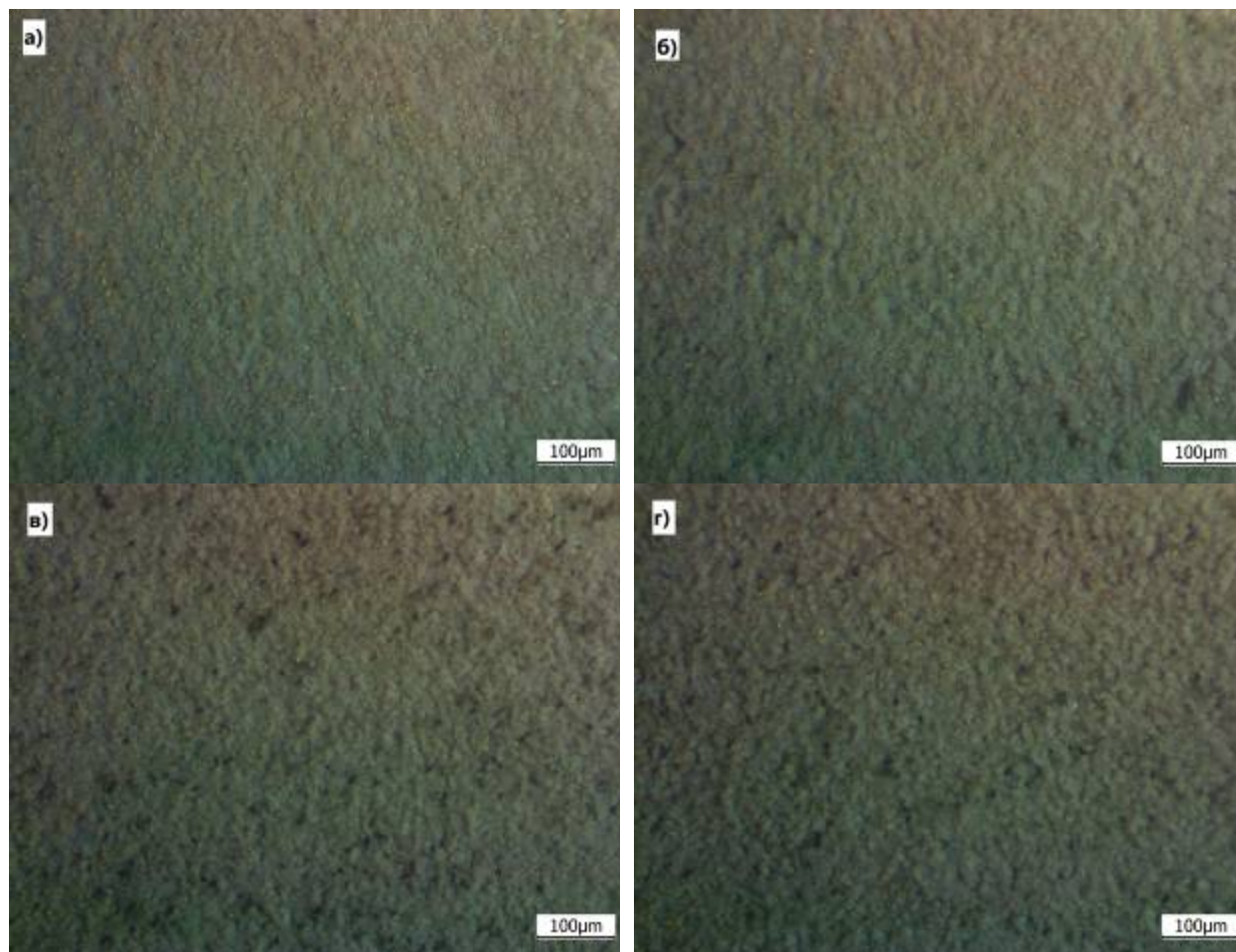


Рис. 4. Микроструктуры полученных покрытий  
а) СЩ (0 А\*ч/л) , б) СЩ (12 А\*ч/л), в) СФЩ (0 А\*ч/л), г) СФЩ (12 А\*ч/л)

Результаты микроскопии подтверждают, что поверхность покрытия, полученного в СЩ электролите, будет ухудшаться по мере выработки раствора: увеличивается количество и размер пор, верхний слой покрытия становится более рыхлым, предположительно представляет собой муллит. Для поверхности покрытий, полученных в СФЩ электролите, наоборот наблюдается улучшение микроструктуры, верхний слой покрытия получается более равномерным.

**Заключение.** Изучен процесс выработки электролита и проведена оценка влияния выработки на морфологию поверхности получаемых покрытий. Установлено, что выработка по-разному сказывается на покрытиях, получаемых в различных электролитах. Свойства СЩ электролита по мере выработки несколько снижаются, однако при 12 А\*ч/л наработки электролит сохраняет работоспособность. СФЩ электролит, наоборот, показывает лучшие результаты, что может быть связано с постепенным насыщением раствора. Величина выработки, при которой необходима корректировка химического

состава, не достигнута, необходимо дальнейшее изучение работоспособности электролитов. Результатом исследований станет рекомендация корректировки состава электролитов для стабилизации их физико-химических свойств в процессе МДО.

### **Библиографические ссылки**

1. Кучмин И.Б., Нечаев Г.Г., Соловьева Н.Д. О характере изменений физико-химических свойств двухкомпонентного силикатно-щелочного электролита для микро-дугового оксидирования в ходе серийного производства : Вестник СГТУ. Химия и химические технологии. № 4 (73), 2013. С. 57-62
2. Плазменно электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. и др. // В 2х томах. Том II Москва: Техносфера, 2011. — 512 с
3. Электропроводность растворов электролитов / Жирякова М.В., Тифлова Л.А., Васильев С.Ю. и др : учеб. пособие. М. 2016
4. Левченков С.И. Физическая и коллоидная химия – Ростов-на-Дону, 2004. – 33 с.
5. Севостьянов Н.В. Активация процесса микродугового оксидирования в силикатно-щелочном электролите // СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ В ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИИ / материалы III Междунар. науч.-тех. конф., Ивановская обл. 3 - 7 октября 2011 г. – Плес, 2011. С. 137.

© Тимошева А.Ю., Орешкин Д.И., Гирн А.В., Савельев Д.О., Раводина Д.В., 2025

## ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ ПОДВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ МИКРОТУРБИНЫ

Ю. Н. Шевченко, А. В. Делков, А. А. Кишкин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
e-mail: [gift\\_23j@mail.ru](mailto:gift_23j@mail.ru)

*В работе рассмотрена конструктивная база данных из 19 спиральных и 13 кольцевых тангенциальных подводящих устройств микротурбины низкой быстроходности. Рассмотрены конструктивные элементы позволяющие проводить станочное профилирование образцов, в качестве влияющих параметров на энергетику выбраны два конструктивных и один режимный параметр, позволяющий сформировать базу данных по коэффициенту потерь от трех переменных.*

*Ключевые слова: тангенциальные подводящие устройства, конструктивные и режимные параметры, коэффициент потерь, полное и статическое давления.*

## UPDATING REQUIREMENTS TO THERMOREGULATION SYSTEMS

Yu. N. Shevchenko, A. V. Delkov, A. A. Kishkin,

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
e-mail: [gift\\_23j@mail.ru](mailto:gift_23j@mail.ru)

*The paper considers a design database of 19 spiral and 13 ring tangential feeders of a low-speed microturbine. Design elements allowing for machine profiling of samples are considered; two design parameters and one mode parameter are selected as influencing parameters on energy, allowing for the formation of a database on the loss coefficient from three variables.*

*Key words: tangential feed devices, design and operating parameters, loss coefficient, total and static pressure.*

Для формирования базы данных по коэффициенту потерь проводилась экспериментальная продувка образцов подводящих устройств с измерением и регистрацией полного, статического давлений и температуры на входе (сечение 0) в тангенциальное подводящее устройство и в четырех точках по периферии радиуса входа в рабочее колесо [1].

Экспериментальная продувка канальных подводящих устройства производилась в специальном приспособлении, имитирующем энергетическую установку и позволяющую производить измерения по шести измерительным постам, согласно схеме рис.1.

Измерительный пост на входе  $p_{вх}$   $T_{вх}$ ; измерительный пост в канале подводящего устройства  $p_0$   $T_0$ ; и четырех измерительных постах на радиусе рабочего колеса  $p_1 T_1$ ,  $p_2 T_2$ ,  $p_3 T_3$ ,  $p_4 T_4$ . На посту  $p_2 T_2$  измерения не производились, пост резервный. На каждом посту измерялось полное давление ( $p^*$ ) приемником полного давления, и статическое давление



( $p_{ст}$ ) приемником статического давления, равновесная измеренная температура ( $t$ ) – термомпарой [2].

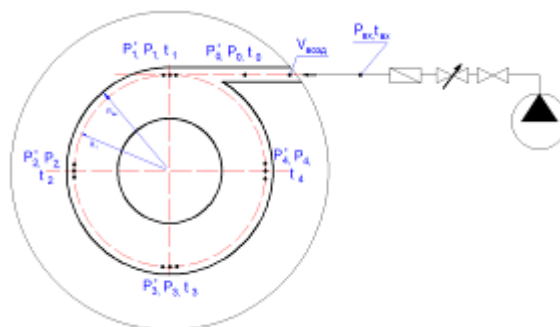


Рис. 1. Схема расположения датчиков в испытательной системе

Экспериментальная установка с размещенными приемниками полного и статического давления показана на рис. 2. Общий вид экспериментальной установки и системы измерения показан на рис. 3.



Рис. 2. Экспериментальная установка с приемниками полного и статического давления



а) Блок датчиков ИКД – 6





б) блок индикации и экспериментальная установка

Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки и системы измерения:

а) Блок датчиков ИКД – 6; б) блок индикации и экспериментальная установка

Конструктивная схема канального подводящего устройства и спирального подводящего устройства представлены соответственно на рис. 4. (для кольцевого подводящего устройства) и рис. 5. (для спирального подводящего устройства) [3].

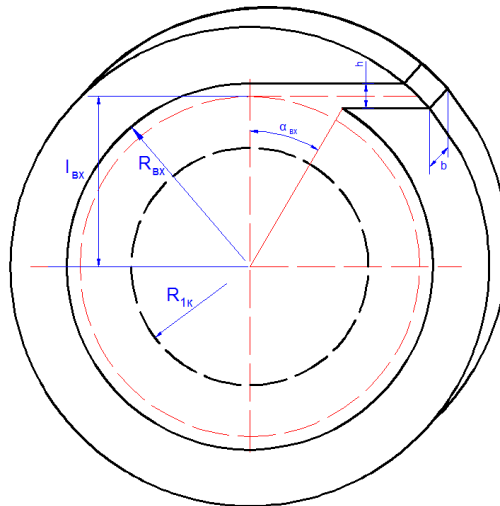


Рис. 4. Схема канального кольцевого подводящего устройства

Для геометрических параметров, обозначенных на рисунках, используются следующие определения и расчетные соотношения:

-  $l_{вх}$  – плечо момента количества движения, где  $l_{вх} = R_{вх} - h / 2$ ;

-  $d_{э.экв}$  – диаметр горла эквивалентный, где  $d_{э.экв} = \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot h}{\pi}}$ ;

-  $\varepsilon$  - степень парциальности, где  $\varepsilon = \frac{\alpha_{вх}}{2\pi}$ ,  $\alpha_{вх} = \arccos \frac{R_{вх} - h}{R_{вх}}$ ;

$Re_0$  - число Рейнольдса по скорости  $C_0$ , где  $Re_0 = \frac{C_0 \cdot d_{э.экв}}{\nu}$ ;

$Re_{\omega}$  - число Рейнольдса по окружной скорости, где  $Re_{\omega} = \frac{C_0 l_{вх}}{\nu} = \frac{\omega \cdot l_{вх}^2}{\nu}$ ;

$l_{вх} / R_{1k}$  – относительное плечо момента количества движения, где

$R_{1k}=24$  мм, - радиус входа в рабочее колесо микротурбины.

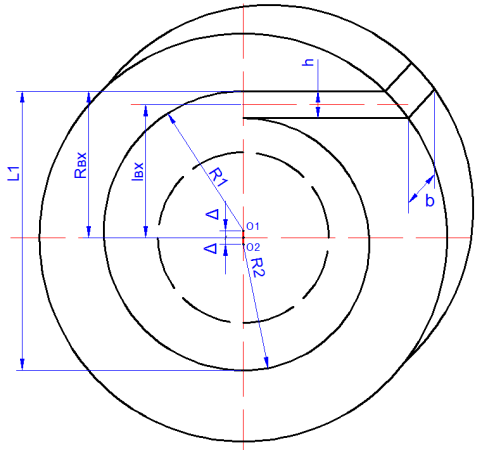


Рис. 5. Схема канального спирального подводящего устройства

Спиральное подводящее устройство формируется совмещением двух радиусов профилирования  $R_1$  и  $R_2$  со смещением центров профилирования на величину  $\Delta$  (рис. 5).

Обмеряемые параметры спирального подводящего устройства микротурбин [4]:

$b = 3,5$  мм - ширина канала;

$D$  - внешний максимальный диаметр;

$\delta$  - расстояние от  $D$  до верхней (ближней от  $D$ ) поверхности канала  $h$ ;

$L_1$  - максимальное расстояние по линии диаметра  $D$ ;

$h$  - ширина входного канала.

$R_1$  - больший радиус профилирования;

$R_2$  - меньший радиус профилирования;

$\Delta$  - смещение центров профилирования;

$\varepsilon$  - степень парциальности;

$l_{bx}$  - плечо входного канала по средней линии;

$h/R_{1k}$  - относительная ширина входного канала;

$l_{bx}/R_{1k}$  - относительное плечо входа;

$$d_{2.экв} = \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot h}{\pi}}.$$

Выражения для обмера спирального подводящего устройства по результатам обмера:

$$L_1 = R_1 + R_2 + 2\Delta,$$

$$\Delta = 0,5h + \delta + 0,5L_1 \cdot 0,5D,$$

$$R_1 = D - 2\delta - 0,5h - 0,5L_1,$$

$$R_2 = 0,5(L_1 - h),$$

$$l_{bx} = 0,5D - \delta - 0,5h,$$

$$\alpha_{bx} = \arccos \frac{l_{bx} - 0,5h}{l_{bx} + 0,5h},$$

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{\text{вх}}}{2\pi}.$$

Выражения для обсчета кольцевого поводящего устройства:

$$R_1 = \frac{L_1}{2},$$

$$l_{\text{вх}} = 0,5L_1 - 0,5h;$$

$$\text{или } l_{\text{вх}} = R_1 - \frac{h}{2}.$$

Приняты следующие обозначения для сборников С – спиральный, первая цифра в обозначении: высота h в мм. Вторая цифра в обозначении:  $l_{\text{вх}}$  плечо момента количества движения в мм (округлено). Например: С6-39 – спиральный h=6 мм,  $l_{\text{вх}} \approx 39$ мм; К6-32 – кольцевой h=6 мм,  $l_{\text{вх}} \approx 32$ мм [5].

Согласно обозначениям рис. 4 и рис. 5 количественные значения параметров 19 спиральных и 13 кольцевых подводящих устройств представлены в табл. 1. и табл. 2, соответственно, общий вид материальной части тангенциальных подводящих устройств представлены на рис. 6.

Таблица 1

**Конструктивные параметры спиральных подводящих устройств**

| № п/п | Обозначение подводящего устройства | D (мм) | h (мм) | δ (мм) | L <sub>1</sub> (мм) | Δ (мм) | R <sub>1</sub> (мм) | R <sub>2</sub> (мм) | l <sub>вх</sub> (мм) | d <sub>гэкв.</sub> (мм) | ε     | α <sub>вх</sub> (рад) | l <sub>вх</sub> /R <sub>1k</sub> | h/R <sub>1k</sub> |
|-------|------------------------------------|--------|--------|--------|---------------------|--------|---------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|-------|-----------------------|----------------------------------|-------------------|
| 1     | С6-39                              | 90     | 6      | 3,1    | 80,4                | 1,3    | 40,6                | 37,2                | 38,9                 | 5,2                     | 0,086 | 0,542                 | 1,62                             | 0,25              |
| 2     | С6-36                              | 90     | 6      | 6,2    | 74,4                | 1,4    | 37,4                | 34,2                | 35,8                 | 5,2                     | 0,089 | 0,564                 | 1,49                             | 0,25              |
| 3     | С6-33                              | 90     | 6      | 9,1    | 68,3                | 1,3    | 34,7                | 31,2                | 32,9                 | 5,2                     | 0,093 | 0,586                 | 1,37                             | 0,25              |
| 4     | С6-31                              | 90     | 6      | 11,2   | 64,2                | 1,3    | 32,5                | 29,1                | 30,8                 | 5,2                     | 0,096 | 0,605                 | 1,28                             | 0,25              |
| 5     | С5-39                              | 90     | 5      | 4      | 78,8                | 0,9    | 40,1                | 36,9                | 38,5                 | 4,7                     | 0,079 | 0,5                   | 1,604                            | 0,208             |
| 6     | С5-36                              | 90     | 5      | 7      | 72,8                | 0,9    | 37,1                | 33,9                | 35,5                 | 4,7                     | 0,082 | 0,519                 | 1,48                             | 0,208             |
| 7     | С5-32                              | 90     | 5      | 11     | 65                  | 1      | 33                  | 30                  | 31,5                 | 4,7                     | 0,087 | 0,549                 | 1,31                             | 0,208             |
| 8     | С5-30                              | 90     | 5      | 13     | 60,8                | 0,9    | 31,1                | 27,9                | 29,5                 | 4,7                     | 0,09  | 0,567                 | 1,23                             | 0,208             |
| 9     | С4-38                              | 90     | 4      | 5,2    | 77,4                | 0,9    | 38,9                | 36,7                | 37,8                 | 4,2                     | 0,071 | 0,452                 | 1,58                             | 0,167             |
| 10    | С4-35                              | 90     | 4      | 8      | 71,4                | 0,7    | 36,3                | 33,7                | 35                   | 4,2                     | 0,074 | 0,469                 | 1,46                             | 0,167             |
| 11    | С4-31                              | 90     | 4      | 12     | 63,4                | 0,7    | 32,3                | 29,7                | 31                   | 4,2                     | 0,079 | 0,497                 | 1,29                             | 0,167             |
| 12    | С4-29                              | 90     | 4      | 14     | 59,2                | 0,6    | 30,4                | 27,6                | 29                   | 4,2                     | 0,081 | 0,514                 | 1,23                             | 0,167             |
| 13    | С3-37                              | 90     | 3      | 6      | 76                  | 0,6    | 38,4                | 36,4                | 37,4                 | 3,8                     | 0,064 | 0,408                 | 1,56                             | 0,13              |
| 14    | С3-34                              | 90     | 3      | 9      | 70                  | 0,6    | 35,4                | 33,4                | 34,4                 | 3,8                     | 0,067 | 0,425                 | 1,43                             | 0,13              |
| 15    | С3-30                              | 90     | 3      | 13,4   | 61,8                | 0,9    | 30,7                | 29,3                | 30                   | 3,8                     | 0,072 | 0,454                 | 1,25                             | 0,13              |
| 16    | С3-28                              | 90     | 3      | 15     | 58                  | 0,6    | 29,4                | 27,4                | 28,4                 | 3,8                     | 0,074 | 0,467                 | 1,18                             | 0,13              |
| 17    | С2-37                              | 90     | 2      | 7,2    | 74,4                | 0,5    | 37,3                | 36,1                | 36,7                 | 3,1                     | 0,054 | 0,343                 | 1,53                             | 0,092             |
| 18    | С2-34                              | 90     | 2      | 10     | 68,4                | 0,3    | 34,7                | 33,1                | 33,9                 | 3,1                     | 0,056 | 0,356                 | 1,41                             | 0,092             |
| 19    | С2-28                              | 90     | 2      | 16     | 56,6                | 0,3    | 28,7                | 27,3                | 28                   | 3                       | 0,062 | 0,391                 | 1,16                             | 0,083             |

Таблица 2

**Конструктивные параметры кольцевых подводящих устройств**

| № п/п | Обозначение подводящего устройства | D (мм) | h (мм) | δ (мм) | L <sub>1</sub> (мм) | Δ (мм) | R <sub>1</sub> (мм) | R <sub>2</sub> (мм) | l <sub>вх</sub> (мм) | d <sub>гэкв.</sub> (мм) | ε     | α <sub>вх</sub> (рад) | l <sub>вх</sub> /R <sub>1k</sub> | h/R <sub>1k</sub> |
|-------|------------------------------------|--------|--------|--------|---------------------|--------|---------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|-------|-----------------------|----------------------------------|-------------------|
| 1     | К6-32                              | 90     | 6      | -      | 70                  | -      | 35                  | -                   | 32                   | 5,2                     | 0,094 | 0,594                 | 1,33                             | 0,25              |
| 2     | К6-24                              | 90     | 6      | -      | 53                  | -      | 26,5                | -                   | 23,5                 | 5,2                     | 1,109 | 0,686                 | 0,97                             | 0,25              |
| 3     | К5-26                              | 90     | 5      | -      | 56                  | -      | 28                  | -                   | 25,5                 | 4,7                     | 0,087 | 0,551                 | 1,06                             | 0,208             |
| 4     | К5-24                              | 90     | 5      | -      | 52                  | -      | 26                  | -                   | 23,5                 | 4,7                     | 0,1   | 0,631                 | 0,97                             | 0,208             |

|    |       |    |     |   |    |   |    |   |      |     |       |       |      |       |
|----|-------|----|-----|---|----|---|----|---|------|-----|-------|-------|------|-------|
| 5  | K4-33 | 90 | 4,2 | - | 70 | - | 35 | - | 32,9 | 4,3 | 0,078 | 0,495 | 1,37 | 0,175 |
| 6  | K4-32 | 90 | 4   | - | 64 | - | 32 | - | 30   | 4,2 | 0,08  | 0,505 | 1,25 | 0,167 |
| 7  | K4-26 | 90 | 4   | - | 56 | - | 28 | - | 26   | 4,2 | 0,086 | 0,541 | 1,08 | 0,167 |
| 8  | K3-33 | 90 | 3,2 | - | 70 | - | 35 | - | 33,4 | 3,8 | 0,68  | 0,431 | 1,39 | 0,13  |
| 9  | K3-27 | 90 | 3   | - | 56 | - | 28 | - | 26,5 | 3,7 | 0,074 | 0,467 | 1,1  | 0,125 |
| 10 | K3-25 | 90 | 3   | - | 52 | - | 26 | - | 24,5 | 3,7 | 0,077 | 0,485 | 1,02 | 0,125 |
| 11 | K2-34 | 90 | 2,2 | - | 70 | - | 35 | - | 33,9 | 3,1 | 0,067 | 0,423 | 1,41 | 0,092 |
| 12 | K2-27 | 90 | 2   | - | 56 | - | 28 | - | 27   | 3   | 0,06  | 0,38  | 1,12 | 0,083 |
| 13 | K2-25 | 90 | 2   | - | 52 | - | 26 | - | 25   | 3   | 0,062 | 0,395 | 1,04 | 0,083 |



Рис. 6. Подводящие устройства кольцевого и спирального типа

Диапазон изменения геометрических параметров в безразмерном (относительном) виде

(22 конструктивных сборки):

$Re_0=10000\dots60000=1..6\cdot10^4$ , - число Рейнольдса по скорости  $C_0$ ;

$l_{вх}/R_{1к}=0,97\dots1,62$ , - относительное плечо входа;

$h/R_{1к}=0,083\dots0,25$ , - относительная ширина входного канала,

$b = 3,5$  мм - ширина канала;

$R_{1к}=24$  мм, - радиус входа в рабочее колесо микротурбины.

В качестве влияющих параметров на энергетику выбраны два конструктивных и один режимный параметр, позволяющий сформировать базу данных по коэффициенту потерь от трех переменных.

### Библиографические ссылки

1. Кишкин А. А., Делков А. В., Шевченко Ю. Н., Абдуллаев М. У., Методика обработки экспериментальных испытаний тангенциального подвода дозвуковой центростремительной турбины // В сборнике: материалов Всероссийской научно-практической конференции Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика, 24–26 февраля 2021 г., Красноярск. С. 102-106.

2. Проектирование системы пассивного охлаждения бортового комплекса космического аппарата / О. В. Шилкин, А. А. Кишкин, А. А. Зуев, А. В. Делков, Н. А. Лавров // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106.

3. Обзор существующих вариантов двухфазных систем терморегулирования космических аппаратов / Ю. Н. Шевченко, О. В. Шилкин, А. А. Кишкин, А. В. Делков, М. У. Абдуллаев // Материалы XXVII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (08–10 ноября 2023, г. Красноярск): в 2 ч. под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2023. – Ч. 1. С. 248-251.

4. Кишкин А. А. Органический цикл Ренкина в автономной теплоэнергетической системе : монография / А. А. Кишкин, О. В. Шилкин, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко и др. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2019. – 234 с.
5. Ю. Н. Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Кишкин А. А., Капуцак К. И., Келлер А. И. Прототипирование микротурбогенератора и постановка задачи исследования // в сборнике: материалов Всероссийской научно-практической конференции «Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика», г. Красноярск., 2023. С. 17-21.

© Шевченко Ю. Н., Делков А. В., Кишкин А. А., 2024

## СРАВНЕНИЯ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ФОРМ ИЗДЕЛИЙ

Черкасов А.С.

Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий»,  
31

E-mail: aleks.tcherkasoff2016@yandex.ru

*Темой данной работы является контроль форм изделий после обработки. Рассмотрены такие методы как: метод визуального контроля, инструментальный контроль, контроль с помощью КИМа. Проведен сравнительный анализ методов.*

*Ключевые слова: контрольно измерительная машина, визуальный контроль, механическая обработка, инструментальный контроль.*

Методы контроля форм изделия после обработки необходимы для обеспечения качества и точности изготовленных деталей. Вот основные причины, почему этот контроль важен: поддержание допусков, обеспечение функциональности, установление стабильности процессов, предотвращение брака, соблюдение стандартов.

Визуальный контроль

**Визуальный контроль** является одним из самых распространенных методов контроля качества изделий после механической обработки. Он позволяет оперативно обнаруживать дефекты, ошибки или несоответствия требованиям проекта. Поэтому этот этап проверки является критическим для исключения брака и повышения качества продукции.

Один из самых простых и распространенных методов контроля форм изделия – визуальный контроль. Он основан на оценке внешнего вида изделия без использования специальных приборов. Визуальный контроль позволяет оперативно обнаружить дефекты, такие как царапины, трещины, вмятины и другие поверхностные дефекты. Однако этот метод не всегда позволяет выявить скрытые дефекты, такие как внутренние трещины или пустоты.

Визуальный контроль форм изделия — это один из методов контроля качества, который основан на осмотре внешнего вида изделия для выявления возможных дефектов, несоответствий и прочих аномалий. Этот метод может быть использован как на этапе производства, так и перед отгрузкой готовой продукции.

Описание метода

Визуальный контроль предполагает использование человеческого глаза для оценки качества и соответствия изделия установленным стандартам и требованиям. Контроль может включать проверку:

- Формы и геометрии изделия.
- Цвета и текстуры поверхности.
- Наличия физических дефектов (царапин, вмятин и т.д.).
- Правильности нанесения маркировки и логотипов.
- Соответствия техническим требованиям (например, размеры и пропорции).

Способы визуального контроля

1. Непосредственный осмотр: Наиболее простой способ, при котором инспектор визуально оценивает изделие на наличие дефектов, недостатков или несоответствий.

2. Световой контроль: Использование различных источников света (например, УФ-лампы) для выявления дефектов на поверхности изделия, которые могут быть не видны при обычном свете.

3. Сравнительный анализ: Сравнение исследуемого изделия с эталонным образцом для выявления несоответствий.

### **Инструментальный метод**

Инструментальный метод контроля изделия – это метод измерения параметров и характеристик изделий с использованием специальных инструментов и оборудования. Этот метод широко применяется в различных отраслях, таких как машиностроение, автоматика, электроника и других, где требуется высокая точность и надежность в измерениях.

Описание метода:

Инструментальный контроль позволяет:

1. Измерять размеры и геометрические параметры изделий (длина, ширина, высота, диаметр и прочие размеры).

2. Оценивать качество поверхностей изделий (шершавость, ровность, перпендикулярность и т.д.).

3. Проверять физико-механические свойства, такие как твердость, прочность и другие характеристики.

4. Выполнять электрические измерения для оценки электрических параметров изделий.

Инструменты, используемые при контроле:

1. Штангенциркуль – используется для измерения линейных размеров и глубины. Позволяет измерять с высокой точностью.

Принцип работы

- Разместите щёки штангенциркуля на измеряемом объекте.

- Для измерения внешнего размера используйте внешние губки, для внутренних — внутренние губки.

- Читайте измерение на шкале и на шкале верньера.

2. Микрометр – инструмент для измерения малых размеров с высокой точностью. Применяется для измерения толщины, диаметра и других маленьких размеров.

Принцип работы

-Раскройте микрометр, разместите объект между губками.

-Закройте губки до легкого контакта с объектом, не прикладывайте излишнего усилия.

- Снимите показание с основной шкалы и шкалы боковой (крутящейся).

3. Угольник и линейка – используются для проверки прямолинейности и размеров изделий.

4. Калипры – используются для проверки размеров отверстий или наружных размеров (например, калипры для проверки резьбы).

Принцип работы

- Используйте соответствующий тип калибра (например, шаблонный) для определения соответствия размеру.

- Проверьте, проходит ли объект через калипры, находящиеся в пределах заданных размеров.

5. Оптические приборы (микроскопы, проекторы) – позволяют проводить контроль геометрии и конструкции изделий на высоких увеличениях.

Принцип работы

- Установите образец под оптическим прибором.

- Настройте фокус и делайте наблюдения через окуляры, сравнивая с эталоном или размерами

6. Приборы для измерения шероховатости – предназначены для контроля качества поверхностей.

Общие рекомендации:

- Перед первым использованием проверьте калибровку каждого инструмента.

- Соблюдайте осторожность и аккуратность при измерениях, чтобы избежать повреждения как инструмента, так и изделия.

- При необходимости записывайте результаты измерений для дальнейшего анализа.

Инструментальный метод контроля является важным аспектом системы качества и обеспечивает соответствие продукции установленным стандартам и требованиям.

### **Контрольно измерительная машина (КИМ)**

Контрольно-измерительная машина (КИМ) — это высокоточное устройство, используемое для измерения размеров и геометрических параметров деталей и сборочных единиц. КИМ может использоваться в различных областях, включая машиностроение, микроэлектронику и авиационную технику, для контроля качества продукции и обеспечения соответствия стандартам.

Принцип работы КИМ:

1. Позиционирование: Измеряемый объект размещается на рабочей поверхности КИМ. Устройство может использовать механические или автоматизированные системы для точного позиционирования детали.

2. Измерение: КИМ использует различные сенсоры и измерительные инструменты, такие как:

- Координатные измерительные машины (КИМ). Определяют координаты точек на поверхности детали с помощью механической или оптической системы.

- Лазерные и оптические измерители. Используются для создания трехмерной модели объекта и сравнения ее с эталонными параметрами.

- Алмазы и щупы. Используются для непосредственного измерения размеров и форм.

3. Обработка данных. Полученные данные обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения, которое сравнивает измеренные параметры с заданными стандартами.

4. Вывод результатов. На основе анализа данных КИМ формирует отчет о соответствии изделия установленным требованиям.

Преимущества

1. Высокая точность. КИМ способны выполнять измерения с высокой степенью точности, что критично для производства высококачественной продукции.

2. Автоматизация процесса. Современные КИМ могут быть интегрированы в автоматизированные линии производства, что минимизирует человеческий фактор и ошибки.

3. Многофункциональность. Способность измерять различные параметры и детали позволяет использовать КИМ в различных отраслях.

4. Скорость измерения. Автоматизация и высокоточные инструменты позволяют значительно ускорить процесс проверки качества.

Недостатки:

1. Высокая стоимость. КИМ являются дорогими устройствами, и их приобретение требует значительных инвестиций.

2. Необходимость квалифицированного персонала. Для работы с КИМ требуется обученный персонал, что увеличивает затраты на обучение и содержание специалистов.



3. Ограниченная мобильность. КИМ обычно стационарные устройства, что может создавать неудобства в случае необходимости перемещения или измерения крупных объектов.

4. Потребность в обслуживании. Для поддержания высокой точности и работоспособности необходимо регулярное техническое обслуживание и калибровка оборудования.

В целом, КИМ — это мощный инструмент для обеспечения качества и точности в производственных процессах, но их использование требует внимательного подхода и учета всех факторов.

### **Заключение**

Визуальный контроль, КИМ, инструментальный контроль форм изделия являются важными методами оценки качества продукции. У каждого из этих методов есть свои преимущества и недостатки.

Визуальный контроль

Плюсы

1. Скорость: Визуальный контроль может быть выполнен быстро и не требует значительных затрат времени.

2. Простота: Не требует специального оборудования, достаточно визуального восприятия и навыков оператора.

3. Первичное выявление дефектов: Помогает быстро обнаружить явные дефекты, такие как трещины, вмятины и повреждения поверхности.

4. Низкие затраты: Не требует значительных финансовых вложений на оборудование.

Минусы:

1. Субъективность: Результаты могут зависеть от опыта и квалификации инспектора, что может привести к ошибкам.

2. Ограниченная точность: Не всегда возможно оценить размеры и геометрию изделия с должной точностью.

3. Неполнота проверки: Не всегда можно выявить скрытые дефекты или проблемы, которые не видно невооруженным глазом.

Инструментальный контроль

Плюсы:

1. Высокая точность: Позволяет проводить измерения с высокой степенью точности, что особенно важно для сложных изделий.

2. Объективность: Результаты контролируются с помощью измерительных приборов, что минимизирует человеческий фактор.

3. Расширенные возможности: Позволяет выявлять критические параметры, которые невозможно оценить визуально (например, толщина материала, угол наклона и т.д.).

4. Документирование: Результаты контролей можно легко записать и архивировать для последующего анализа.

Минусы:

1. Сложность: Требуется специальное оборудование и навыков для его использования. Необходимо регулярно проводить калибровку приборов.

2. Время: Может занять больше времени по сравнению с визуальным контролем, особенно при большом количестве изделий.

3. Высокая стоимость: Инструменты и оборудование могут быть дорогими, а также требуется их обслуживание.

Контроль методом КИМа

Плюсы:

1. Комплексный подход: сочетает в себе измерительные и калибровочные мероприятия, что позволяет получать более точные результаты.

2.Объективность: основан на стандартах и методах, что снижает влияние человеческого фактора.

3.Возможность детального анализа: может использоваться для измерения различных параметров, что позволяет глубже исследовать качество.

Минусы:

1.Более сложный и затратный, чем визуальный контроль: требует специального оборудования и высококвалифицированного персонала.

2.Время, необходимое на выполнение контроля, может быть значительно больше.

3.Необходимость регулярной калибровки оборудования для поддержания точности измерений.

Выбор метода контроля зависит от специфики производственного процесса, требований к качеству и доступных ресурсов. Визуальный контроль подходит для быстрой и недорогой проверки, КИМ позволяет получать количественные и объективные данные, а инструментальный контроль предоставляет максимальную точность и автоматизацию, но требует значительных вложений и квалифицированного персонала. Использование комбинации этих методов может обеспечить более полное покрытие контроля качества.

### **Библиографические ссылки**

1. ГОСТ 4.446-86. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ.

2.ГОСТ Р ИСО 10360-5-2017 ПРИЕМОЧНЫЕ И ПЕРЕПРОВЕРОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН

3.Эшонкулова М. Н. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ С ПОМОЩЬЮ КОНТРОЛЬНЫХ КАЛИБРОВ // Экономика и социум. 2024. №5-1 (120). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-tochnosti-i-kachestva-izgotovleniya-detaley-v-mashinostroenii-s-pomoschyu-kontrolnyh-kalibrov> (дата обращения: 09.12.2024).

© Черкасов А.С., 2024

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ С ВАФЕЛЬНЫМ ФОНОМ

Л. Е. Черкасов, Боженкова А. Ю.  
Научный руководитель - В. А. Левко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: [lenya837@yandex.ru](mailto:lenya837@yandex.ru)

*Рассмотрены технология обработки вафельных оболочек, конструктивное оформление ячеек и схема движение инструмента. Проведен анализ статистических показателей точности изготовления вафельных оболочек. Сформулированы основные направления совершенствования технологии обработки корпусных элементов деталей с вафельным фоном.*

*Ключевые слова:* вафельные оболочки, фрезерование, рабочая среда, контроль

**Введение.** Корпусные детали с вафельным фоном – вафельные оболочки (ВО) являются основными несущими элементами корпусов специальных изделий. К ВО относятся цилиндрические, конические, оживальные оболочки, сферические и сфероконические днища [1]. Основным способом обработки ячеек ВО является механическое фрезерование на специальных станках с ЧПУ, обеспечивающих получение заданных в соответствии с конструкторской документацией размеров сетки ребер. Основным элементом ВО является ячейка (рис. 1).

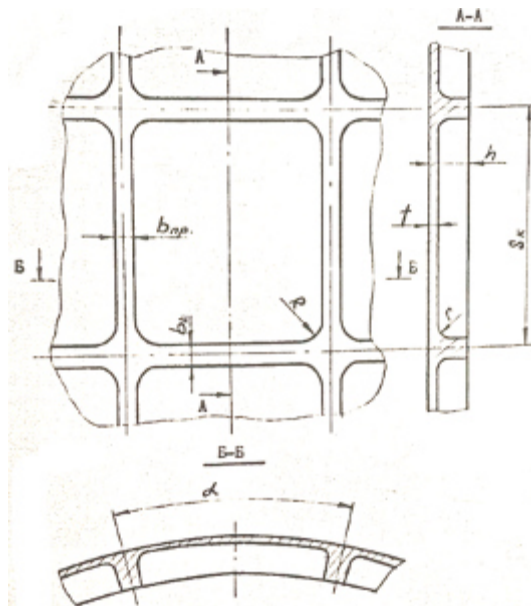


Рис. 1. Параметры ячеек:  $t$  – толщина полотна;  $b_k$  – ширина кольцевых ребер;  $b_{пр}$  – ширина продольных ребер;  $h$  – исходная толщина полотна;  $R, r$  – размеры инструментальные;  $S_k$  – шаг кольцевых ребер;  $\alpha$  – шаг продольных ребер

Наиболее подходящим материалом для корпусных деталей с вафельным фоном является деформируемый алюминиевый сплав АМгб.

Внедрение вафельных конструкций сопровождалось интенсивными поисками приемлемых способов их производства. Для формирования вафельного фона отрабатывались такие технологии как механическое фрезерование ячеек, химическое фрезерование, раз-

мерная электрохимическая обработка. Однако наибольшее применение получил способ фрезерования ячеек вафель со слежением на специальных станках с программным управлением (ПУ) [2].

**Технология обработки вафельных оболочек, конструктивное оформление ячеек и схема движение инструмента.** Технология производства ВО, имея в своей основе механическое фрезерование ячеек на станках с ПУ, включает три группы процессов: заготовительные операции, собственно обработка ячеек вафель, заключительные операции. Характер первых операций определяется видом применяемых заготовок. Операции механической обработки ячеек могут различаться в зависимости от габаритов ВО, моделей применяемого оборудования и технологических приёмов: настройки станков, построения программ и т.п. В заключительные операции входят механическая обработка вспомогательных элементов для ВО, доведение масс ВО до значений, регламентированных КД, контрольные операции, обмеры, взвешивание.

Для конструкции большинства ВО характерно наличие превалирующего числа одинаковых, стандартных ячеек, обрабатываемых по командам от повторяющихся подпрограмм. Обработка нестандартных по форме ячеек и других возмущений вафельного фона проводится по командам основной программы.

Типичный цикл фрезерования стандартной ячейки складывается из следующих переходов: врезание инструмента на глубину ячейки (1), выборка основной массы металла ячейки, обход по контуру ячейки (2), отвод инструмента (3), деление — переход в следующую позицию. Врезание на глубину ячейки может выполняться двумя способами: осевым перемещением фрезерной головки при неподвижной заготовке; комбинированным, одновременно двумя движениями — осевыми перемещениями фрезы и одной из рабочих подач, круговой или линейной. Выборку основной массы металла ячейки можно осуществлять по различным схемам: фрезерование «строчками», начиная обработку в одном из углов ячейки и фрезерованием по схеме «возрастающих квадратов» (или «раскруткой») от середины ячейки к её периферии. Обе схемы могут быть прерывистыми, с остановками при изменении направления подач или непрерывными, а также без таких остановок и с плавным изменением направления. При фрезеровании по строчкам происходит чередование характера подач (встречной и попутной), а по траектории «раскрутка» можно по желанию установить одну неизменную подачу, встречную или попутную [2].

Однако на данный момент в рассматриваемой технологии существует ряд проблем. Для достижения высоких массовых и прочностных характеристик изделия предъявляются повышенные требования по точности обработки остаточного полотна и ребер карманов вафельных оболочек. Данные требования наряду с особенностями конструкций, имеющих вафельный фон и выраженных малой жесткостью при больших габаритных размерах заготовок, обуславливают применение специализированных методов и алгоритмов обработки, направленных на компенсацию ошибок формы заготовки, деформаций и других факторов, из-за наличия неровностей на внешних поверхностях заготовок в виде зачисток их шаберами, которые приводят к отклонениям фактической толщины остаточного полотна от заданной. Нередко на дне ячеек ВО наблюдается характерная ступенчатость нескольких видов. Ступени образуются при нарушении требований к регулировкам и проверкам точности станков, а также при неверной их настройке.

Повышение точности механической обработки ячеек позволит в ряде случаев отказаться частично или полностью от применения в производстве вафельного фона вспомогательных операций, таких как повторного травления и шабрения ячеек.

**Статистические показатели точности изготовления ВО.** Факторы и процессы, влияющие на точность изготовления продольных и поперечных рёбер и остаточного полотна можно объединить в математическую модель, которая базируется на статистиче-

ском анализе точности с последующей математической обработкой показателей анализа [3].

Применительно к производству ВО статистический анализ точности позволяет решать следующие задачи: объективно оценивать точность, как основного процесса механического фрезерования ячеек, так и вспомогательного – до травления; оценивать степень влияния на точность обработки основных технологических факторов: качества заготовок, способа настройки станков, состояния оборудования, способа и средств контроля; оценивать стабильность технологического процесса в ходе изготовления партии корпусных элементов; обосновывать, при необходимости, назначаемые в КД поля допусков на размеры параметров ячеек или величины расчётных припусков при косвенном ограничении размеров массами ВО; давать сравнительную оценку точности изготовления ВО на различных предприятиях или в различных цехах при отличающихся технологических условиях и обосновывать целесообразность изменений технологий.

Конструктивная точность характеризуется величиной допустимых отклонений от заданных размеров и идеальной геометрической конфигурации деталей. Так нижние пределы заданных размеров  $t$ ,  $b$ ,  $h$  (рис. 1), должны обеспечивать необходимое эксплуатационное качество, прочность и устойчивость оболочек. Важной целью жёсткого ограничения верхних отклонений этих размеров является, стремление достичь массового совершенства ВО, т.е. максимально улучшить основную характеристику изделий [4].

Технологическая точность – это степень соответствия фактических отклонений в размерах или конфигурации рассматриваемых деталей отклонениям, допустимым КД. Она может оцениваться статистическими методами с помощью единовременных или текущих выборок.

Исходными данными для статистического анализа точности механической обработки ячеек ВО могут служить карты обмеров, проводимых контролёрами до заключительной операции травления ВО. При этом необходимо иметь в виду, что контроль фиксирует только минимальные значения толщины полотна в ячейках  $t_{\min}$  и минимальную ширину рёбер. Специальные обмеры экспериментальных ВО, проводятся обычно по толщине полотна в 9 – 16 точках каждой ячейки и в трёх сечениях каждого ребра. Закон распределения принимается нормальным (закон Гаусса). О стабильности анализируемого технологического процесса механической обработки можно судить по графику рассеяния «припусков» в партии или серии ВО. Таким графиком подтверждается полная зависимость рассеяния фактических «припусков», рассматриваемых ВО (не частных «припусков», а «припусков» для ВО в целом) от точности и достоверности настройки станков на толщину полотна или от тщательности расчётов управляющих программ и качества фрез (от их биения) [5].

Для ширины рёбер, так же, как и для толщины полотна, характерны аналогичные отступления от требований КД: местные (локальные) обнижения ширины  $b_{\min}$  за пределы номинальных значений  $b_0$ ; превышение фактической ширины  $b_{\max}$  верхних пределов. Ширина рёбер ВО обеспечивается программой обработки, увязанной с определённым диаметром фрезы. Поэтому величины «припусков» по ширине рёбер зависят от следующих факторов: биение концевых фрез вследствие загрязнений или забоин на посадочных поверхностях (конус); различие фактических диаметров фрез, использованных при обработке ВО; влияние кинематических погрешностей в приводах перемещений по программируемым координатам.

Независимо от числа фрезерных головок на ширину кольцевых рёбер оказывают влияние перепады температур оборудования и обрабатываемой ВО при перерывах в работе (выходные дни, третья смена и др.). На ширину продольных рёбер цилиндрических и конических ВО влияют некруглость и биение заготовок при фрезеровании ячеек, так как эти рёбра имеют трапецеидальное сечение.

В ячейках, имеющих узкие и высокие рёбра, может наблюдаться характерная односторонняя бочкообразность этих рёбер, происхождение которой объясняется их недостаточной жёсткостью, пружинением при фрезеровании по контурам ячеек.

Характерные дефекты - зарезы в углах ячеек. Причины зарезов – инерционность подвижных узлов станка с обрабатываемой ВО в момент перемен направления подач при обходе контуров ячеек, и недостаточная жёсткость системы СПИД. Наибольшей инерционностью обладают массы рабочих органов станка, перемещающиеся по координате X. По этой причине зарезы в кольцевых рёбрах более глубокие, чем в продольных.

Исходная толщина  $h$ , заданная КД, может быть получена механическим фрезерованием по сетке ребер или полным обнижением поверхности, которые выполняются по отдельным программам в условиях более благоприятных, чем фрезерование ячеек: снимаемый слой металла существенно меньше глубины ячеек; процесс осуществляется непрерывно, без чередования врезаний и отводов фрезы; подачи могут быть максимально допустимыми для механизма станка. По этим причинам «припуски» на размер  $h_0$  могут быть получены при механическом фрезеровании в заданных пределах. Это относится как к сварным заготовкам, вальцованным из листа, так и к бесшовным механически обрабатываемым заготовкам [6].

После механического фрезерования ячеек ВО чаще других наблюдаются два характерных отступления от требований КД по толщине полотна: местные (локальные) и зональные утонения полотна за пределы номинальных  $t_0$ ; - превышения фактическими толщинами  $t_{\max}$  верхних пределов. Кроме того, наблюдаются и сопутствующие дефекты полотна в ячейках ВО: большие интервалы рассеяния толщины; большие разнотолщинности полотна в ячейках; - ступенчатость полотна различного вида; - местные углубления в полотне в виде отпечатков торца инструмента.

Наибольшее влияние на точность обработки по толщине полотна ВО оказывают виды заготовок и способы настройки станков. Из-за наличия неровностей на внешних поверхностях заготовок в виде зачисток их шаберами и из-за деформаций заготовок – отклонений их от правильной геометрической формы утонения полотна могут местными (локальными) в пределах ячейки и зональными в группе соседних ячеек. Уточнения сопровождаются увеличенными интервалами рассеяния и повышенной разнотолщинности полотна в ячейках.

**Основные направления совершенствования технологии обработки корпусных элементов деталей с вафельным фоном.** На основе анализа особенностей технологии обработки корпусных элементов деталей с вафельным фоном выявлено, что на точность изготовления ВО влияют следующие технологические факторы: вид и качество применяемых заготовок (предпочтительно применять заготовки, изготовленные методом карусельной обработки); технологические приёмы, освоенные производством (настройка станка, точность расчёта управляющих программ обработки, способы базирования ВО на станке, применяемые приспособления и т.д.); способы контроля ВО и применяемые для этого средства измерения (в первую очередь для контроля толщины полотна).

Основной задачей технологии является применение комплекса мероприятий, направленных на повышение точности изготовления оснастки, повышения качества заготовок и выбора режущего инструмента, а также применения более точных средств настройки станков и измерительных средств контроля.

Для повышения точности фрезерования ВО по толщине полотна необходимо: применять в производстве ВО бесшовные механически обработанные с минимальной шероховатостью заготовки; точную и достоверную настройку станков по результатам пробного прохода; цифровую регулировку станков, обеспечивающую перпендикулярность оси инструмента к внешней поверхности ВО, устранение осевых люфтов в подшипниках шпинделей фрезерных головок и пр.; применение станков с высокой чувствительностью

слежения; требуемое качество заточки и доводки фрез, а также использование обильного охлаждения СОЖ.

Для повышения точности фрезерования ВО по ширине ребер: сведение к минимуму биения концевых фрез, кинематических погрешностей в приводах перемещений по программируемым координатам, устранении различия между фактическими диаметрами фрез; устранение неточности настройки расстояний между осями фрезерных головок вдоль образующей ВО и неточности углового расположения осей фрезерных головок; сведение некруглости и биения заготовок при фрезеровании ячеек (применение замкнутых схем фрезерования ячеек); предотвращение бочкообразности рёбер и зарезов рёбер в углах ячеек посредством уменьшения подач при чистовом обходе контура ячейки, замедления подач перед переменной направлений движений исполнительных органов станка или ввода искажения траектории в углах ячеек программно.

Максимальная глубина ячеек определяется мощностью приводов фрезерных головок, необходимой для обработки ячеек за один проход. При многопроходной обработке ячеек глубина их не ограничивается и влияет только на трудоёмкость изготовления.

Толщина остаточного полотна в ячейках является основным параметром ВО и влияет на величину массы в наибольшей степени. На нее приходится до 80% общей массы детали. Разброс ширины рёбер оказывает значительно меньшее влияние на массу от 15 до 20%

**Заключение.** Поиски и реализация в производстве различных способов повышения точности механической обработки ячеек необходимы для достижения главной цели – улучшения основной характеристики изделий за счёт снижения масс ВО. Очевидна также необходимость улучшения экономических показателей технологии снижения трудоёмкости производства ВО за счёт повышения производительности оборудования. Повышения точности механической обработки ячеек позволит в ряде случаев отказаться частично или полностью от применения в производстве ВО вспомогательных операций – повторного травления или шабрения ячеек.

### Библиографические ссылки

1. ГОСТ 22350-91. Корпус ракеты на жидком топливе. Термины и определения : утв. и введ. в действие Постановлением Гос. комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам 15 мая 1991 г. № 688 : дата введ. 1992-07-01. - Москва : Изд-во стандартов, 1991. - 17 с.
2. Кривонос Е. В. Обоснование схемы фрезерования вафельного фона // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. - С. 83-90. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-383-90.
3. Конструкция и проектирование изделий ракетно-космической техники. Часть 1. Конструирование изделий ракетно-космической техники: учеб. пособие / Н. Т. Каргин, В. В. Волоцуев; Минобрнауки России, Самар, гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Самара: СамГАУ, 2012. - 1 CD-ROM (12,8 Мб).
4. Кривонос, Е. В. Повышение эффективности формообразования панелей с вафельным подкреплением в секции для баков ракет-носителей / Е. В. Кривонос // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики : в 3-х т. (Красноярск, 13-17 апр. 2020 г.) / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. - Красноярск: Изд-во Сиб. гос. ун-та науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева, 2020. - Т. 1. - С. 197-200.
5. Пась О.В., Серков Н.А. Разработка алгоритма управления точностью фрезерования изделий РКТ с вафельным фоном на программно-копировальных станках типа СВО//Сборник трудов XXX Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2018), с. 486-489, 2019.

6. Мамай, В. И. Несущая способность тонкостенных оболочек с локальными несовершенствами. / В. И. Мамай // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. - 2011. - № 2. - С. 26-31.

© Черкасов Л. Е., Боженкова А. Ю. 2025



УДК 3.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УДАРНЫМ СТЕНДОМ

Андреев В.Д., Чубарь А. В.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» 660041,  
Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
E-mail: vdandreev2001@mail.ru, E-mail: Achubar@sfu-kras.ru

**Аннотация:** Статья посвящена теме важности информационной поддержки процессов испытаний средств космической техники, а также представляется система управления для ударного стенда копрового типа. Испытания космической техники на различных этапах требуют четкой координации, прозрачности и полноты представляемой информации, которая обеспечивает эффективность и безопасность всех выполняемых операций. Актуальность этого направления продиктована непрерывно растущими требованиями к качеству и надежности космических аппаратов, а также высокими рисками, связанными с их эксплуатацией в условиях космоса.

**Ключевые слова:** система испытаний, космическое средство, информационная система, ударный стенд, ударный спектр, испытания.

## DEVELOPMENT OF IMPACT STAND CONTROL SYSTEM

Andreev V. D., Chubar A. V.

Master's student of «Siberian Federal University». 660041, Krasnoyarsk region,  
Krasnoyarsk, Svobodny ave. 79, Krasnoyarsk  
E-mail: vdandreev2001@mail.ru, E-mail: Achubar@sfu-kras.ru

**Abstract:** The article is devoted to the importance of information support of space equipment testing processes and presents a control system for a copra-type impact bench. Testing of space equipment at various stages requires clear coordination, transparency and completeness of the presented information, which provides efficiency and safety of all performed operations. The relevance of this direction is dictated by the continuously growing requirements to the quality and reliability of spacecraft, as well as the high risks associated with their operation in space.

**Key words:** test system, space vehicle, information system, shock stand, shock impulse, shock spectrum, tests.

Обеспечение прочности, жесткости, герметичности, функционирования механических систем космических аппаратов (КА) является сложной научно-технической проблемой, над решением которых работают специалисты различных профессий. Среди множества задач, решаемых в процессе проектирования и изготовления КА, особое место занимает

наземная экспериментальная отработка конструкции лабораторных и натурных образцов, которая позволяет подтвердить правильность полученных расчетным путем решений, определить фактическое состояние конструкции, оценить работоспособность систем в условиях близких к эксплуатационным.

Решению задач, связанных с изучением поведения конструкции КА, уделяется все большее внимание. Это объясняется тем, что с одной стороны повышаются механические нагрузки на составные части космических комплексов за счет увеличения мощности и диапазона воздействий, а с другой – с состав КА включаются все более сложное электронное оборудование и механические системы развертывания. Одним из важнейших этапов наземной экспериментальной отработки конструкции КА на прочность являются динамические испытания, которые в зависимости от характера и вида силового воздействия подразделяются на ударные, акустические, вибрационные и др. Возможны также испытания на прочность с приложением различных комбинаций указанных нагрузок, а также с дополнительным воздействием как повышенных, так и пониженных температур.

Основная задача испытаний на ударную прочность — проверка способности изделия выполнять свои функции во время ударного воздействия и после него, то есть сохранять основные параметры при ударном воздействии (и после него) в пределах, указанных в нормативных документах на изделие.

Система управления ударным стендом копрового типа, которая будет детально описана в данной статье, обеспечивает безопасные и эффективные испытания изделий в условиях, имитирующих реальные космические нагрузки. Интеграция этой системы в общую структуру информационной поддержки позволяет значительно повысить уровень контролируемости и прогнозируемости результатов испытаний. Разработка программного обеспечения для управления стендом охватывает не только аспекты калибровки и контроля оборудования, но и реализацию алгоритмов обработки данных, что в свою очередь способствует повышению точности и скорости анализа результатов испытаний.

Эффективное управление процессами испытаний также включает в себя возможность интеграции с другими информационными системами, что позволяет получать более полную картину испытательного процесса и создавать отчетность, соответствующую современным стандартам. Использование автоматизации и высоких технологий в каждом этапе испытаний имеет решающее значение для достижения поставленных целей и минимизации рисков.

Ключевыми задачами исследования являются:

- Анализ и сравнение отечественных и зарубежных стандартов в области испытаний на однократный удар, выявление достоинств и недостатков известного оборудования для воспроизведения однократных ударов.
- Обоснование и разработка системы управления, обеспечивающих высокую степень автоматизации стенда.
- Разработка математической модели стенда и определение на её основе диапазонов и сочетаний функциональных параметров стенда, а также разработка алгоритма автоматической настройки.
- Разработка и реализация алгоритма управления ударным стендом.
- Создание системы управления с алгоритмом для ударного стенда.

## **Материалы и методы исследования**

### **Описание существующих систем**

В этом разделе будет проведен обзор существующих информационных систем, используемых в ударных испытаниях космической техники. Современные процессы испытаний сложных космических аппаратов требуют применения высокоэффективных информационных систем, способных обеспечивать автоматизацию процессов сбора, хранения и анализа данных, а также управления испытаниями. На текущий момент существ-

вуют различные платформы, каждая из которых имеет свои уникальные функциональные возможности и преимущества.

Одной из наиболее известных систем является система управления испытаниями (СУИ), разработанная для реализации автоматизированного контроля во время испытаний космических аппаратов. Она позволяет в реальном времени отслеживать параметры работы оборудования, а также выполнять диагностику его состояния. СУИ интегрируется с различными сенсорами и измерительными инструментами, что делает её незаменимым инструментом в процессе подготовки и проведения испытаний. Данная система служит основой для формирования отчетов и анализа полученных данных, что существенно увеличивает оперативность принятия решений и снижает вероятность ошибок [4].

Стоит отметить систему ENZO 640/680 – это система измерения удара для использования с ударными стендами различной конструкции – пневматических, классических, копров и так далее. Система позволяет инженеру получить любые записи кратковременных событий ударного процесса. Если сигнал с внешнего датчика достигает заданного порогового значения – уровень ускорения, наклон или позиция, система начинает запись сигнала и отображает график. Дополнительные возможности по анализу СРС также могут отображать мгновенную оценку потенциального повреждения. Серия импульсов может быть записана для последующего анализа. VENZO 640/680 может также управлять перемещением ударного стенда для специфических требований заказчика [1].

Другой пример – Система управления ударным стендом КС-2000 удобна в эксплуатации, имеет простую архитектуру, обладает высокой производительностью, аппаратная часть имеет модульную конструкцию и имеет высокую точность. Система управления независима от ПК, но имеет возможность подключения к ПК по интерфейсу USB. Система управления имеет возможность отсеивать шумы без прерывания работы. Также она автоматически записывает результаты испытаний и позволяет наблюдать за процессом испытания в реальном времени. Система управления построена на базе DSP, таким образом ПК только отображает процесс испытания и помогает управлять стендом. Использование ОС позволяет максимально легко выводить отчеты и следить за процессом испытания. [6]

Совершенно очевидно, что каждая из упомянутых систем играет уникальную роль в процессе испытаний космической техники. Их функциональность и особенности дополняют друг друга, создавая комплексную систему информационной поддержки, необходимую для успешной реализации испытательных задач. Объединение возможностей различных информационных систем может привести к значительным улучшениям в эффективности не только самого процесса испытаний, но и в повышении надежности и качества результатов испытаний.

### **Разработка системы управления ударным стендом**

Здесь будет описан процесс разработки системы управления ударным стендом, включая выбор архитектуры и алгоритмов. Создание эффективной системы управления для ударного стенда копрового типа является основополагающим элементом для проведения испытаний средств космической техники. Основной целью разработки является возможность надежного и безопасного выполнения испытаний в условиях, максимально приближенных к реальным.

На первом этапе разработки важно было определить платформу системы. Изучив существующие решения, было решено использовать платформу с открытым кодом Arduino. Она обеспечивает гибкость программирования, небольшой размер и низкую стоимость конечного проекта.

Следующий этап разработки включал в себя создание алгоритмов управления, определяющих ход испытаний. Алгоритм включает в себя программный код, управляющий выходными реле с пневматической частью и силовой части электрической сети. Основные алгоритмы были основаны на принципах адаптивного управления, что позволило

учитывать изменения в условиях испытаний и корректировать параметры управления в реальном времени. Система управления пневматической и силовой частей ударного стенда представлена на рисунке 1.

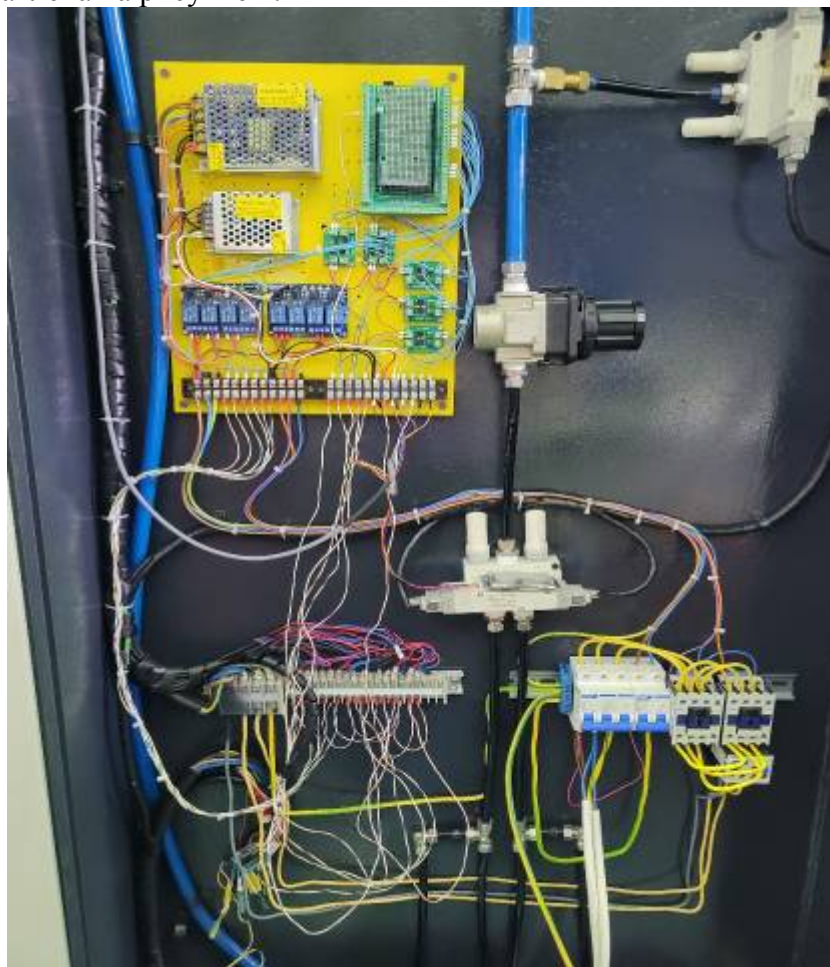


Рисунок 1 – Готовая система управления

Актуальной задачей также является разработка пользовательского интерфейса, который обеспечит удобный доступ к данным и функциям управления для операторов. Интерфейс был реализован с применением среды разработки Nextion Editor, который используется для создания графического интерфейса для встраиваемых устройств с различными типами TFT-дисплеев и сенсорных панелей. Это позволяет значительно упростить процесс настройки этапов испытания и оперативного получения результатов.

Обсуждая методы тестирования системы, акцент был сделан на практическом использовании с быстрой доработкой системы на месте ввиду ограниченности доступных материалов по ударному стенду.

В заключение, разработка системы управления ударным стендом представляет собой комплексный процесс, включающий выбор правильной архитектуры, программного обеспечения и алгоритмов управления, что в итоге обеспечивает высокую эффективность и безопасность проводимых испытаний.

### **Результаты и обсуждение**

В данном разделе будут представлены промежуточные результаты изготовления системы управления для ударного стенда. Испытания проводились с целью оценки эффективности разработанной системы управления и выявления параметров, необходимых для дальнейшей настройки и оптимизации испытательной платформы. Ударный стенд был

подвергнут ряду тестов, которые включали как статические, так и динамические нагрузки.

На текущем этапе разработки системы управления для ударного стенда с использованием Arduino и Nxtion Editor достигнуты ряд промежуточных результатов, которые важны для успешного завершения проекта.

Во-первых, была завершена проектировка схемы взаимодействия между компонентами системы. Были определены, какие модули и датчики будут использоваться для управления пневматической частью стенда. Это включает в себя использование пневматических клапанов, управляющих воздушным потоком, а также датчиков давления и положения, которые обеспечивают точность и надежность работы системы.

Во-вторых, разработана база программного обеспечения. Библиотека Arduino была настроена для работы с компонентами Nxtion, что позволит создавать удобный и интуитивно понятный интерфейс для пользователей. Интерфейс будет включать в себя различные элементы управления, такие как кнопки, ползунки и дисплеи, которые будут отображать текущее состояние системы. Дизайн интерфейса уже прошел несколько этапов тестирования, и были внесены коррективы для повышения удобства использования.

В-третьих, реализована основная логика управления. На данном этапе мы успешно провели тесты работы алгоритмов, отвечающих за управление пневматической частью и силовой в зависимости от ввода требуемых параметров от пользователя. Испытания показали, что при изменении параметров управления система корректно реагирует на изменения и обеспечивает необходимый уровень точности при выполнении команд.

Кроме того, начаты тестирования совместимости всей системы с различными пневматическими компонентами. В процессе тестирования выявлены некоторые проблемы с взаимодействием различных устройств, и в данный момент проводится работа по их устранению, что включает в себя проверку подключения, анализ стабильности и реакцию системы на различные нагрузки.

Также стоит отметить, что создана первая версия документации, описывающая физические и программные аспекты системы, что поможет в дальнейшем процессе сборки и настройки стенда. Это важно не только для текущей команды разработчиков, но и для возможных будущих команд, которые могут заняться доработкой или обслуживанием системы.

На следующем этапе планируется завершение тестирования всех компонентов в единой системе, а также интеграция функций безопасности, которые обеспечат защиту как оборудования, так и пользователей в процессе эксплуатации стенда. Таким образом, проект находится на важном этапе разработки, который требует внимания к деталям и готовности к возможным изменениям в проекте.

## **Выводы**

Результаты и обсуждение системы управления ударным стендом копрового типа продемонстрировали эффективную интеграцию компонентов и соответствие поставленным требованиям как с точки зрения функциональности, так и с точки зрения надежности. В ходе эксплуатации стенда были выявлены ключевые аспекты, которые нужно учесть для дальнейшего совершенствования системы.

Во-первых, система управления, реализованная на основе Arduino и Nxtion, продемонстрировала высокую степень пользовательской настройки. Интерфейс, созданный с использованием Nxtion Editor, обеспечил простоту и удобство в управлении процессами, позволяя операторам быстро вносить изменения в настройки работы стенда. Пользовательский опыт оказался на высоком уровне, что значительно облегчило подготовку к испытаниям и операционную работу.

Во-вторых, работая с системой давления и управления воздушными клапанами, удалось достичь точности в регулировании параметров, таких как сила удара и скорость действия. Это качество оказалось критически важным для обеспечения безопасной рабо-

ты стенда при проведении испытаний, так как позволяет избежать перегрузок и повреждений как оборудования, так и объектов, испытываемых на стенде.

В-третьих, была продемонстрирована высокая степень надежности работы системы в течение длительных периодов эксплуатации. Настройки управления, осуществляемые через программное обеспечение, были протестированы в различных рабочих и сервисных режимах, и результаты показывают, что система сохраняет стабильность и предсказуемость в действиях.

Однако, несмотря на положительные результаты, выделились и несколько областей, требующих дальнейшего внимания. Комплекс системы требует более детального анализа возможных сбоев, особенно в тех случаях, когда возникающие проблемы оказывают значительное влияние на результаты испытаний. Необходимо также продолжать мониторинг показателей системы, чтобы периодически вносить улучшения в алгоритмы управления, повышая общую эффективность работы стенда.

Рекомендуется также рассмотреть вопрос о повышении степени автоматизации процесса испытаний. Это может включать в себя разработку комплексных систем, которые смогут не только управлять стендом, но и самостоятельно анализировать полученные данные и выдавать рекомендации на основе встроенных алгоритмов. Продвижение в этом направлении откроет новые возможности для испытательных процессов, сделав их менее зависимыми от человеческого фактора и более точными.

В заключение, результаты испытаний ударного стенда копрового типа подтверждают целесообразность использования современных технологий управления как в процессах автоматизации, так и в обеспечении безопасности эксплуатации. Предстоящие этапы развития системы должны фокусироваться на усовершенствовании алгоритмов, сохранении оптимизации интерфейса, а также на тщательном тестировании и улучшении механических компонентов, чтобы дальнейшие работы стали еще более надежными и эффективными.

### **Заключение**

Заключение подводит итоги проведенного исследования, акцентируя внимание на значимости информационной поддержки в испытаниях космической техники. Испытания являются неотъемлемой частью процесса разработки и внедрения новых космических аппаратов, и именно качественная информационная поддержка способствует успеху этих испытаний. В ходе работы была разработана система управления ударным стендом копрового типа, что не только повышает уровень контроля как над оборудованием, так и над процессами, но и обеспечивает более высокую надежность результатов испытаний.

Основным выводом исследования является то, что интеграция современных информационных технологий в процессы испытаний позволяет значительно повысить их эффективность. Важно отметить, что надежность и безопасность систем, связанных с космической техникой, напрямую зависят от качества обработки данных, получаемых на всех этапах испытаний. Этот аспект подчеркивает необходимость создания единой информационной среды, которая бы объединяла все доступные данные и обеспечивала максимальную прозрачность процессов [2].

Важным результатом анализа полученных испытательных данных стало выяснение путей для улучшения системы управления. Некоторые из алгоритмов показали необходимость доработки, особенно в условиях, когда параметры, например угла отклонения молота, меняются внезапно. Это является критическим моментом для обеспечения высоких стандартов безопасности и качества в испытаниях. Тем не менее, несмотря на достижения, исследование также обращает внимание на необходимость дальнейшего анализа потенциальных эпизодов сбоя в системе. Понимание механизмов отказов и планирование стратегий их предотвращения сыграют ключевую роль в улучшении общей надежности и адаптивности системы управления. Также важно продолжать накапливать

данные о показателях работы системы для последующей оптимизации алгоритмов управления, что обеспечит дальнейшее усовершенствование её функциональности.

В заключении, данное исследование показало, что информационная поддержка испытывающих процессов является стратегически важным компонентом в области космической техники. Она не только улучшает качество испытаний, но и создает предпосылки для более глубокого понимания поведения систем в реальных условиях. Это открывает новые горизонты как для научных исследований, так и для практической деятельности в области запуска и эксплуатации космической техники [7].

Данные выводы служат основой для дальнейших исследований в области повышения эффективности испытаний, а также создания более совершенных систем управления, способных справляться с вызовами, которые ставит перед нами космическая индустрия.

### Библиографические ссылки

1. Система управления ударным стендом DTC VENZO 640/680 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pribor.ru/product/isytyatelnoe-oborudovanie/oborudovanie-dlya-mekhanicheskikh-isyptaniy/sistemy-upravleniya-vibrostandami/sistema-upravleniya-udarnym-stendom-dtc-venzo-640-680/> (дата обращения: 13.02.2025).
2. Андросов Владимир Яковлевич, Плотников Андрей Владимирович, Вагайцев Семен Александрович, Будников Евгений Анатольевич АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КЛИМАТИЧЕСКОГО И ТЕРМОВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannaya-sistema-kontrolya-parametrov-klimaticheskogo-i-termovakuumnogo-oborudovaniya-dlya-isyptaniya-izdeliy> 2014 (дата обращения: 13.02.2025).
3. Глудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1991 (дата обращения: 13.02.2025).
4. Киренков Вениамин Васильевич, Микитенко Валериан Григорьевич, Досько Сергей Иванович МОДАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЕРЕХОДНЫХ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ // Космическая техника и технологии URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modalnaya-diagnostika-perehodnyh-neustanoviv-shih-sya-protsessov-pri-otsenke-rezultatov-isyptaniy-izdeliy-raketno-kosmicheskoy> 2016 (дата обращения: 13.02.2025).
5. Безмозгий Иосиф Менделевич, Иванов Сергей Викторович МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЕРИФИКАЦИИ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ // Космическая техника и технологии URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-avtomatizirovannoy-verifikatsii-konechnoelementnyh-modeley-krupnogabaritnyh-kosmicheskikh-moduley> 2022 (дата обращения: 13.02.2025).
6. Система управления ударным стендом КС-2000, ES (Россия-Китай) [Электронный ресурс]. – URL: <https://ir1.su/oborudovanie-dlea-isyptaniy/dinamicheskiye-isyptaniya/udarnyye-stendy/ks-2000/> (дата обращения: 13.02.2025).
7. Межин Вячеслав Семенович, Обухов Владимир Васильевич ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МОДАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВЕРИФИКАЦИИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ // Космическая техника и технологии URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/praktika-primeneniya-modalnyh-isyptaniy-dlya-tseley-verifikatsii-konechno-elementnyh-modeley-konstruktsii-izdeliy-raketno> 2014 (дата обращения: 13.02.2025).

8. Капитонов Валерий Алексеевич, Кононенко Андрей Владимирович, Тихомиров Сергей Александрович СРЕДА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ РАКЕТОНОСИТЕЛЕЙ // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sreda-avtomatizirovannogo-analiza-izmeritelnoy-informatsii-kosmicheskikh-raketonositeley> 2013 (дата обращения: 13.02.2025).

© Андреев В. Д., Чубарь А. В., 2025



## **КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ЗА ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ НА КОСМОДРОМЕ**

Е.А. Нехаев, Г.М. Гринберг

Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: nekhaev19800112@gmail.com

*В статье представлена концепция автоматизированного контроля за использованием средств индивидуальной защиты на космодроме. Рассмотрены основные подсистемы, входящие в автоматизированную систему контроля, преимущества и недостатки её внедрения, а также перспективы развития. Особое внимание уделено интеграции технологий Интернета вещей, компьютерного зрения и искусственного интеллекта для повышения уровня безопасности на производственных объектах.*

*Ключевые слова: искусственный интеллект, компьютерное зрение, средства индивидуальной защиты, интернет вещей, безопасность проведения работ, космодром.*

Обеспечение безопасности на космодромах является одной из ключевых задач в современной аэрокосмической отрасли. Производственные процессы на таких объектах связаны с повышенными рисками: работа с высокотехнологичным оборудованием, использование опасных веществ и экстремальные условия труда требуют строгого соблюдения норм безопасности. Средства индивидуальной защиты (СИЗ) играют важнейшую роль в минимизации травматизма и предотвращении аварий. Однако традиционные методы контроля за использованием СИЗ, основанные на ручном мониторинге, зачастую оказываются недостаточно эффективными из-за человеческого фактора, ограниченной оперативности и сложности масштабирования.

В условиях стремительного развития технологий автоматизации и цифровизации возникает необходимость внедрения инновационных решений для повышения уровня безопасности. Предлагаемая концепция автоматизированного контроля за использованием СИЗ предполагает интеграцию современных технологий, таких как Интернет вещей (IoT), системы компьютерного зрения и искусственный интеллект (ИИ), для создания интеллектуальных систем мониторинга. Такие системы способны в реальном времени отслеживать соблюдение требований безопасности, оперативно выявлять нарушения, следить за состоянием работника и минимизировать риски для персонала.

Актуальность данной темы подтверждается исследованиями в области промышленной безопасности и опытом внедрения автоматизированных систем в других отраслях, таких как нефтегазовая промышленность и строительство [1, 2]. Внедрение подобных решений на космодромах может стать важным шагом в повышении культуры безопасности и оптимизации производственных процессов.

Космодромы представляют собой уникальные производственные объекты, где сочетаются высокие технологии, сложные инженерные задачи и экстремальные условия труда. Эти факторы создают значительные вызовы в обеспечении безопасности персонала. Одной из ключевых проблем является работа с опасными веществами, такими как ракетное топливо, которое требует строгого соблюдения протоколов безопасности. Кроме

того, процессы сборки, транспортировки и запуска ракет сопряжены с высокими рисками механических повреждений, взрывов и пожаров [3].

Ещё одной серьёзной проблемой является человеческий фактор. Несмотря на строгие регламенты, случаи несоблюдения требований по использованию СИЗ остаются распространёнными. Это может быть связано с недостаточной осведомлённостью персонала, усталостью или пренебрежением правилами безопасности в условиях высоких нагрузок. Традиционные методы контроля, такие как визуальный осмотр и ручное документирование, часто оказываются недостаточно эффективными из-за субъективности и ограниченной оперативности [4].

Кроме того, масштабы современных космодромов и сложность инфраструктуры затрудняют оперативный мониторинг всех участков производства. Это создаёт дополнительные риски, особенно в условиях сжатых сроков подготовки к запуску. Внедрение автоматизированных систем контроля за использованием СИЗ может стать решением этих проблем, обеспечивая непрерывный мониторинг и оперативное реагирование на нарушения.

Предлагаемая концепция автоматизированного контроля за использованием СИЗ базируется на трёх ключевых принципах: интеграция IoT (Интернета вещей) и датчиков в СИЗ, использование систем компьютерного зрения для мониторинга рабочего процесса и автоматическое оповещение о нарушениях (рисунок 1).



Рисунок 1 - Схематичное изображение концепции автоматизированного контроля за использованием средств индивидуальной защиты

Эти принципы позволяют создать интеллектуальную систему, способную в реальном времени отслеживать соблюдение требований безопасности и оперативно реагировать на нарушения. Рассмотрим более подробно каждый из пунктов предлагаемой концепции:

#### 1. Интеграция IoT и датчиков в СИЗ

IoT играет центральную роль в автоматизации контроля за использованием СИЗ. Современные СИЗ, такие как каски, защитные очки, перчатки и спецодежда, могут быть оснащены встроенными датчиками, которые фиксируют их использование. Например, датчики давления в касках могут определять, надета ли она на голову, сенсоры в перчатках — отслеживать их наличие на руках, следить за температурой, давлением и пульсом

работника, измерительные приборы сигнализировать о сроке последней поверки и т.д. Эти данные передаются через беспроводные сети (например, Wi-Fi, Bluetooth или LoRaWAN) в централизованную систему управления.

Преимущество IoT-решений заключается в их способности собирать и анализировать данные в режиме реального времени. Это позволяет не только контролировать использование СИЗ, но и выявлять тенденции, такие как частота нарушений или наиболее проблемные участки производства, состояние здоровья работника и время нахождения в опасных зонах. Кроме того, IoT-устройства могут быть интегрированы с другими системами безопасности, создавая единую экосистему для управления рисками [1].

## 2. Использование систем компьютерного зрения для мониторинга

Системы компьютерного зрения, основанные на технологиях ИИ, являются ещё одним важным элементом концепции. Камеры, установленные на производственных объектах, могут автоматически анализировать видеопоток и распознавать нарушения, связанные с использованием СИЗ. Например, алгоритмы ИИ способны определить, отсутствует ли у работника каска, защитные очки или спецодежда, даже в условиях плохой освещённости или высокой загруженности площадки.

Компьютерное зрение также позволяет отслеживать правильность использования СИЗ. Например, система может определить, надеты ли перчатки или используется ли респиратор в зонах с повышенной концентрацией вредных веществ. Такие технологии уже успешно применяются в других отраслях, таких как строительство и нефтегазовая промышленность, где они доказали свою эффективность в повышении уровня безопасности [2].

## 3. Автоматическое оповещение о нарушениях

Третий принцип концепции — автоматическое оповещение о нарушениях и состоянии работника. Как только система фиксирует отклонение от требований безопасности (например, отсутствие СИЗ или их неправильное использование, повышение температуры тела или критическом изменении давления работника), она немедленно отправляет уведомление ответственным лицам. Это может быть текстовое сообщение, электронное письмо или сигнал на пульт управления. В особых случаях система может также предупреждать самого работника через звуковые или световые сигналы, что позволяет оперативно устранить нарушение.

Автоматическое оповещение значительно сокращает время реакции на нарушения, что особенно важно на космодромах, где задержки могут привести к серьёзным последствиям. Кроме того, система может вести журнал нарушений, который используется для анализа и улучшения процессов безопасности. Например, данные о частоте и типах нарушений могут помочь выявить слабые места в обучении персонала или организации рабочих процессов [4].

Рассматривая более подробно вопрос получения информации от датчиков встроенных в СИЗ работника можно выделить следующие категории данных:

### 1. Данные о температуре тела и давления работника

Для мониторинга состояния здоровья работника в СИЗ могут быть встроены биометрические датчики. Например, в спецодежду или каски интегрируются датчики температуры тела, которые отслеживают изменения температуры тела. Это особенно важно в условиях космодрома, где работы по сборке космического аппарата (КА) требуют большой точности и внимания.

Датчики давления, встроенные в перчатки или обувь, позволяют контролировать физическое состояние работника. Например, они могут фиксировать повышенное давление, которое может быть связано с усталостью или стрессом. Эти данные помогают предотвратить несчастные случаи, вызванные ухудшением самочувствия персонала особенно при работе на высоте [1].

### 2. Данные о времени нахождения в опасных зонах

Для контроля времени пребывания работника в опасных зонах используются датчики, интегрированные в СИЗ. Например, в каски или костюмы могут быть встроены RFID-метки или GPS-модули, которые фиксируют местоположение работника. Эти данные передаются в систему управления, где анализируются для определения времени нахождения в зонах с повышенным риском.

Такие датчики особенно полезны при работе с опасными веществами, например, при заправке жидким реактивным топливом или в условиях повышенной радиации. Они позволяют автоматически предупреждать работника о необходимости покинуть опасную зону по истечении допустимого времени, что снижает риск для здоровья [2].

### 3. Данные мониторинга состояния окружающей среды

В СИЗ также могут быть встроены датчики, отслеживающие параметры окружающей среды, такие как концентрация вредных газов, уровень радиации, влажность и температура. Например, в респираторы или костюмы интегрируются газоанализаторы, которые предупреждают работника о превышении допустимых концентраций опасных веществ.

Датчики температуры и влажности помогают оценить комфортность условий труда и предотвратить тепловой удар или переохлаждение. Эти данные передаются в систему управления, где анализируются для принятия решений по улучшению условий труда [4].

Анализ нарушений, связанных с использованием СИЗ, а также их состоянием является вторым актуальным вопросом, на котором следует остановиться. Рассмотрим более подробно принципы работы и преимущества системы компьютерного зрения, основанной на технологии ИИ:

#### 1. Принцип работы систем компьютерного зрения

Системы компьютерного зрения состоят из видеокamer, установленных на производственных объектах, и программного обеспечения, основанного на алгоритмах ИИ. Камеры фиксируют видеопоток, который анализируется в реальном времени. Алгоритмы ИИ обучены распознавать различные элементы СИЗ, такие как каски, защитные очки, перчатки, привязи, спецодежда и респираторы – рисунок 2.

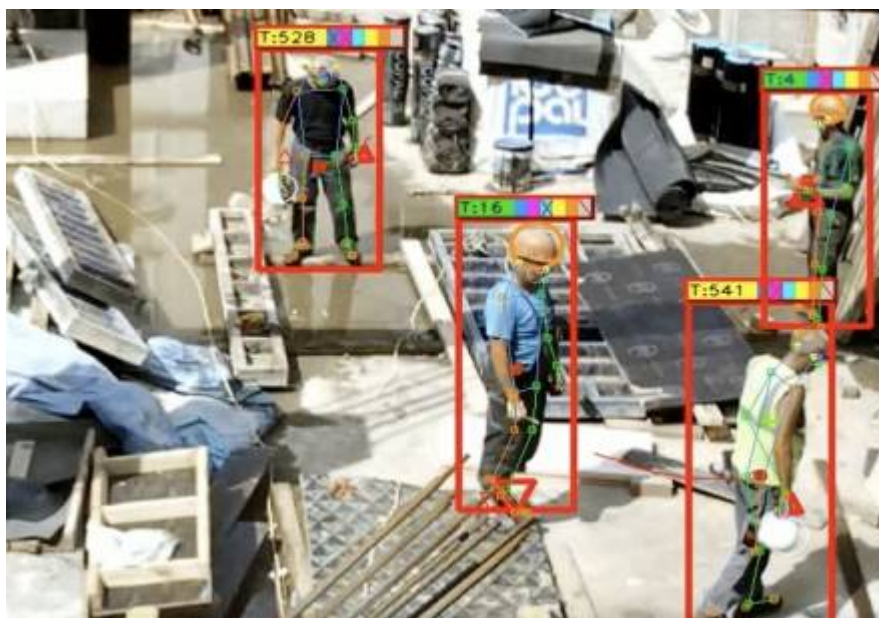


Рисунок 2 – Пример работы системы фиксации и распознавания СИЗ

Для анализа используются методы глубокого обучения (deep learning), такие как свёрточные нейронные сети (CNN). Эти алгоритмы способны идентифицировать объекты на изображении, определять их положение и состояние. Например, система может опреде-

лить, надета ли каска на голову, правильно ли используются защитные очки или присутствуют ли перчатки на руках работника [1].

## 2. Анализ состояния и правильности ношения СИЗ

Системы компьютерного зрения способны не только обнаруживать наличие СИЗ, но и анализировать их правильность использования. Например:

**Каски:** система проверяет, надета ли каска на голову и правильно ли закреплена.

**Защитные очки:** алгоритмы определяют, используются ли очки и не смещены ли они.

**Перчатки:** система распознаёт, надеты ли перчатки и соответствуют ли они требованиям для конкретной зоны.

**Спецодежда:** анализируется наличие и правильность застёгивания костюма, а также его соответствие условиям работы.

Кроме того, системы могут отслеживать состояние СИЗ. Например, они способны выявлять повреждения, такие как трещины на касках или разрывы на спецодежде, что позволяет своевременно заменить неисправные элементы и предупредить работника [2].

## 3. Преимущества использования ИИ для анализа видеоданных

Использование ИИ для анализа видеоданных имеет ряд преимуществ:

**Высокая точность:** современные алгоритмы ИИ способны распознавать объекты с точностью до 95-98%, даже в условиях плохой освещённости или высокой загруженности площадки.

**Реальное время:** анализ видеопотока происходит в режиме реального времени, что позволяет оперативно реагировать на нарушения.

**Масштабируемость:** система может одновременно обрабатывать данные с множества камер, что делает её пригодной для использования на крупных объектах, таких как монтажно-испытательные корпуса космодромоов.

**Автоматизация:** система минимизирует необходимость ручного контроля, снижая нагрузку на персонал и исключая человеческий фактор [4].

## 4. Интеграция с автоматизированной системой контроля

Данные, полученные с видеокамер, передаются в централизованную систему управления – рисунок 3, где они анализируются и визуализируются.

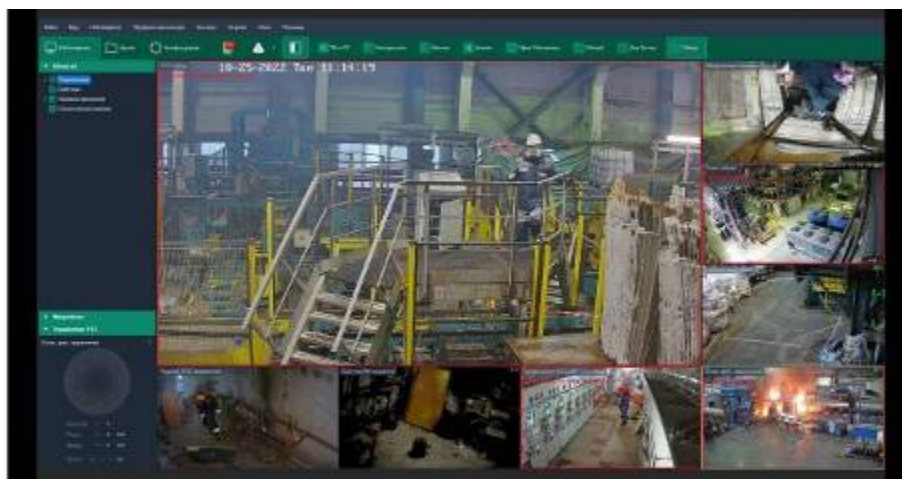


Рисунок 3 – Пример централизованной системы контроля за использованием СИЗ

В случае выявления нарушений система автоматически отправляет уведомления ответственным лицам. Например, если работник находится в опасной зоне без каски, система может отправить сигнал на пульт управления или непосредственно работнику через



звуковое или световое оповещение. Кроме того, данные о нарушениях могут использоваться для анализа тенденций и улучшения процессов безопасности [5].

Программное обеспечение (ПО) является ключевым элементом автоматизированной системы контроля за использованием СИЗ. Оно обеспечивает сбор, анализ и визуализацию данных, поступающих от датчиков, смарт-устройств и систем компьютерного зрения. В рамках концепции автоматизированного контроля на космодроме ПО выполняет ряд важных функций, связанных с выявлением нарушений применения СИЗ и оценкой их состояния. Ниже более подробно рассмотрим функции ПО системы контроля СИЗ:

#### 1. Сбор данных

ПО интегрируется с датчиками и смарт-устройствами, системами компьютерного зрения и другими системами мониторинга, такими как газоанализаторы или датчики радиации, которые предоставляют данные о состоянии окружающей среды.

Все эти данные поступают в централизованную базу данных, где они структурируются и хранятся для дальнейшего анализа [1].

#### 2. Анализ данных

ПО использует алгоритмы ИИ и машинного обучения для анализа данных. Основные задачи анализа это:

а) **Выявление нарушений:** система автоматически определяет случаи, когда работник не использует СИЗ или использует их неправильно. Например, отсутствие каски, или привязи для работы на высоте, не застёгнутый костюм или неправильно надетые защитные очки – рисунок 4.



Рисунок 4 – Пример нарушения ношения СИЗ:  
у сотрудника справа обнаружено 3 нарушения – отсутствуют защитные очки, перчатки и респиратор

б) **Оценка состояния СИЗ:** алгоритмы анализируют данные от датчиков, чтобы определить, находятся ли СИЗ в исправном состоянии. Например, выявляются повреждения касок, износ перчаток, целостность карабинов и строп или неисправности встроенных устройств.

с) **Прогнозирование рисков:** на основе данных журнала нарушений система может прогнозировать возможные аварийные ситуации, что позволяет принимать превентивные меры [2].

#### 3. Визуализация данных

Для удобства анализа и принятия решений ПО предоставляет инструменты визуализации данных, такие как:

а) **Графики и диаграммы:** отображение частоты нарушений, состояния СИЗ и других ключевых показателей.

б) **Тепловые карты:** визуализация зон с наибольшим количеством нарушений или повышенным риском.

с) **Отчёты в реальном времени:** автоматическое формирование отчётов о выявленных нарушениях, состоянии СИЗ и рекомендациях по улучшению – рисунок 5.

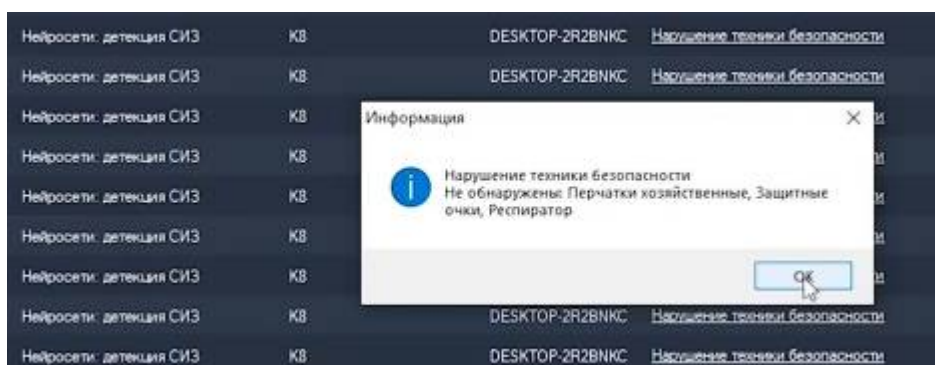


Рисунок 5 – Пример отчета выявленных нарушениях применения СИЗ

Визуализация данных позволяет ответственным лицам (сотрудникам охраны труда (ОТ), начальникам производственных цехов) быстро оценить ситуацию и принять необходимые меры. Например, если на определённом участке космодрома часто фиксируются нарушения, это может указывать на необходимость дополнительного обучения персонала или изменения организации работ [4].

#### 4. Автоматическое оповещение и управление

ПО должно обеспечивать автоматическое оповещение о нарушениях. В случае выявления проблем система отправляет уведомления:

а) **Ответственным лицам:** через SMS, электронную почту или интерфейс системы управления.

б) **Работникам:** через звуковые или световые сигналы на устройствах, встроенных в СИЗ, сигнальных и звуковых устройствах, расположенных в рабочей зоне.

Кроме того, ПО может интегрироваться с другими системами управления, такими как ERP (Enterprise Resource Planning) или системой управления охраной труда, что обеспечивает комплексный подход к обеспечению безопасности [5].

### 5. Анализ тенденций и оптимизация процессов

ПО позволяет анализировать данные за длительные периоды, выявляя тенденции и закономерности. Например:

- а) Какие типы нарушений встречаются чаще всего?
- б) На каких участках космодрома чаще всего происходят нарушения?
- с) Какие СИЗ чаще всего выходят из строя?

На основе этих данных можно разрабатывать меры по улучшению процессов безопасности, оптимизировать обучение персонала, осуществлять своевременную замену некачественных СИЗ или менять рабочие процедуры.

Внедрение системы автоматизированного контроля за использованием СИЗ на космодроме требует поэтапного подхода, который включает пилотные проекты, обучение персонала и масштабирование на весь объект. Такой подход позволяет минимизировать риски, связанные с внедрением новых технологий, и обеспечить плавный переход к автоматизированному контролю.

#### 1. Пилотные проекты на отдельных участках

Первый этап внедрения системы — запуск пилотных проектов на отдельных участках космодрома, например, таких как монтажно-испытательный корпус и заправочная стан-

ция. Это позволит протестировать технологические решения в реальных условиях, выявить возможные проблемы и доработать систему перед её масштабированием.

а) **Выбор участков:** для пилотного проекта выбираются участки с наиболее высокими рисками, например, зоны работы с ракетным топливом или участки сборки ракет.

б) **Установка оборудования:** на выбранных участках устанавливаются датчики, смарт-устройства, видеокамеры и другие элементы системы.

с) **Тестирование и сбор данных:** система тестируется в течение определённого периода, в ходе которого собираются данные о её работе, выявляются ошибки и недочёты, происходит дополнительное машинное обучение в реальных условиях.

д) **Анализ результатов:** на основе данных, полученных в ходе пилотного проекта, проводится анализ эффективности системы, её точности и надёжности. При необходимости вносятся корректировки [1].

## 2. Обучение персонала работе с новой системой

Успешное внедрение системы автоматизированного контроля невозможно без обучения персонала. Работники должны понимать, как работает система, как правильно использовать СИЗ и как реагировать на уведомления о нарушениях.

а) **Теоретическое обучение:** проводятся лекции и семинары, на которых персонал знакомится с принципами работы системы, её преимуществами и основными функциями.

б) **Практические тренинги:** работники учатся взаимодействовать с системой на практике, например, как реагировать на звуковые или световые сигналы, поступающие от смарт-устройств.

с) **Обратная связь:** после обучения собирается обратная связь от персонала, что позволяет выявить возможные трудности и улучшить процесс обучения [2].

## 3. Масштабирование на весь космодром

После успешного завершения пилотного проекта и обучения персонала система масштабируется на весь космодром. Этот этап включает:

а) **Установка оборудования:** датчики, смарт-устройства и видеокамеры устанавливаются на всех участках космодрома, где требуется контроль за использованием СИЗ.

б) **Интеграция с существующими системами:** система автоматизированного контроля интегрируется с другими системами управления.

с) **Мониторинг и поддержка:** после масштабирования система продолжает работать в режиме мониторинга, чтобы своевременно выявлять и устранять возможные проблемы. Также обеспечивается техническая поддержка для персонала [4].

Внедрение автоматизированной системы контроля за использованием СИЗ на космодроме направлено на решение ключевых задач в области безопасности и оптимизации производственных процессов. Ожидаемые результаты от внедрения такой системы включают снижение количества нарушений и аварий, повышение культуры безопасности среди сотрудников и оптимизацию затрат на обеспечение безопасности.

### 1. Снижение количества нарушений и аварий

Одним из основных ожидаемых результатов является значительное снижение количества нарушений, связанных с неправильным использованием СИЗ, и, как следствие, уменьшение числа аварий и несчастных случаев.

а) **Оперативное выявление нарушений:** система автоматически фиксирует случаи, когда работники не используют СИЗ или используют их неправильно. Это позволяет оперативно устранять нарушения до того, как они приведут к аварии.

б) **Предупреждение рисков:** система способна прогнозировать потенциально опасные ситуации на основе анализа данных. Например, если работник находится в зоне с повышенной концентрацией вредных веществ без респиратора, система предупредит его и ответственных лиц.



с) **Статистика и анализ:** данные о нарушениях и авариях анализируются для выявления тенденций и разработки мер по их предотвращению. Это способствует созданию более безопасной рабочей среды [1].

## 2. Повышение культуры безопасности среди сотрудников

Автоматизированная система контроля способствует формированию культуры безопасности среди сотрудников, что является важным аспектом в обеспечении долгосрочной эффективности мер по охране труда.

а) **Осознанность и ответственность:** постоянный мониторинг и автоматическое оповещение о нарушениях повышают осознанность сотрудников в вопросах безопасности. Работники начинают более ответственно относиться к использованию СИЗ.

б) **Обучение и мотивация:** система предоставляет данные о нарушениях, которые могут быть использованы для проведения целевого обучения и тренингов. Это помогает сотрудникам лучше понимать важность соблюдения правил безопасности.

с) **Прозрачность и доверие:** автоматизированный контроль исключает субъективность в оценке соблюдения требований безопасности, что повышает доверие сотрудников к системе [2].

## 3. Оптимизация затрат на обеспечение безопасности

Внедрение автоматизированной системы контроля позволяет оптимизировать затраты на обеспечение безопасности за счёт снижения числа аварий, минимизации простоев и улучшения управления ресурсами.

а) **Снижение затрат на ликвидацию аварий:** уменьшение количества аварий и несчастных случаев приводит к снижению затрат на их ликвидацию, включая медицинские расходы, ремонт оборудования и компенсации.

б) **Эффективное использование СИЗ:** система позволяет отслеживать состояние СИЗ и своевременно заменять изношенные или повреждённые элементы, что снижает затраты на их приобретение и хранение.

с) **Автоматизация процессов:** сокращается необходимость в ручном контроле, что снижает нагрузку на персонал и позволяет перераспределить ресурсы на другие задачи.

д) **Анализ данных для оптимизации:** данные, собираемые системой, могут быть использованы для анализа и оптимизации процессов безопасности, что способствует снижению общих затрат [4].

Внедрение автоматизированной системы контроля за использованием СИЗ на космодроме сопряжено с рядом сложностей, которые могут замедлить или осложнить процесс. К ним относятся технические ограничения, сопротивление персонала и высокие финансовые затраты. Однако эти проблемы могут быть успешно решены при грамотном подходе.

### 1. Технические ограничения

Одной из основных сложностей являются технические ограничения, связанные с работой системы в экстремальных условиях космодрома.

а) **Точность датчиков:** датчики, встроенные в СИЗ, могут быть чувствительны к экстремальным температурам, вибрациям или воздействию химических веществ, что может снижать их точность и надёжность.

б) **Работа в сложных условиях:** системы компьютерного зрения могут сталкиваться с трудностями при анализе видеопотока в условиях плохой освещённости, запылённости или высокой загруженности площадки.

### Пути решения:

а) Использование специализированных датчиков и оборудования, рассчитанных на работу в экстремальных условиях.

б) Регулярная калибровка и техническое обслуживание оборудования для поддержания его работоспособности.

с) Поэтапное тестирование системы на различных участках космодрома для выявления и устранения технических проблем [1].

## 2. Сопротивление персонала

Внедрение новых технологий часто встречает сопротивление со стороны персонала, что может быть связано с недоверием к системе, страхом перед изменениями или недостатком знаний.

а) **Недостаток понимания:** сотрудники могут не понимать, как работает система и какие преимущества она предоставляет.

б) **Страх перед контролем:** автоматизированный контроль может восприниматься как чрезмерный надзор, что вызывает негативную реакцию.

### Пути решения:

а) Проведение обучающих программ и тренингов для персонала, чтобы объяснить принципы работы системы и её преимущества.

б) Вовлечение сотрудников в процесс внедрения, например, через сбор обратной связи и учёт их предложений.

с) Создание системы мотивации, например, поощрение за соблюдение требований безопасности [2].

## 3. Финансовые затраты

Разработка и внедрение автоматизированной системы контроля требуют значительных финансовых вложений, что может стать серьёзным барьером.

а) **Высокая стоимость оборудования:** датчики, смарт-устройства, видеокамеры и программное обеспечение требуют значительных затрат.

б) **Затраты на внедрение и поддержку:** установка системы, обучение персонала и техническое обслуживание также требуют ресурсов.

### Пути решения:

а) Поэтапное внедрение системы, начиная с пилотных проектов на отдельных участках, что позволяет распределить затраты во времени.

б) Партнёрство с технологическими компаниями, которые могут предоставить оборудование и решения на условиях лизинга или совместного финансирования.

с) Использование государственных программ поддержки или грантов для внедрения инновационных решений в области безопасности [4].

Несмотря на потенциальные сложности, внедрение автоматизированной системы контроля за использованием СИЗ на космодроме является важным шагом в повышении уровня безопасности. Технические ограничения, сопротивление персонала и финансовые затраты могут быть успешно преодолены за счёт поэтапного внедрения, обучения и мотивации сотрудников, а также партнёрства с технологическими компаниями.

Создание концепции автоматизированного контроля за использованием СИЗ на космодроме представляет собой важный шаг в повышении уровня безопасности и эффективности производственных процессов. Внедрение такой системы позволяет не только минимизировать риски для персонала, но и создать условия для более ответственного отношения к требованиям охраны труда.

Космодромы являются объектами с повышенными рисками, где даже незначительные нарушения в использовании СИЗ могут привести к серьёзным авариям. Автоматизированный контроль обеспечивает:

а) **Оперативное выявление нарушений:** система в реальном времени отслеживает использование СИЗ и предупреждает о нарушениях, что позволяет предотвращать аварии до их возникновения.

б) **Повышение культуры безопасности:** постоянный мониторинг и автоматическое оповещение способствуют формированию у сотрудников осознанного отношения к безопасности.

с) **Оптимизацию затрат**: снижение количества аварий и эффективное управление ресурсами СИЗ позволяют сократить расходы на обеспечение безопасности.

Эти преимущества делают автоматизированный контроль незаменимым инструментом для обеспечения безопасной и бесперебойной работы на космодроме [1].

Развитие автоматизированного контроля за использованием СИЗ открывает новые перспективы для повышения уровня безопасности. Ключевые направления развития включают:

1. **Интеграция с другими системами безопасности:**

Автоматизированный контроль может быть интегрирован с системами управления охраной труда, ERP и другими платформами. Это позволит создать единую экосистему для управления рисками и повышения эффективности производственных процессов.

2. **Использование Big Data и ИИ:**

Анализ больших объёмов данных, собираемых системой, с использованием технологий ИИ позволит прогнозировать риски и разрабатывать превентивные меры. Например, на основе временных наблюдений можно выявлять тенденции и оптимизировать процессы безопасности.

3. **Развитие IoT и смарт-устройств:**

Дальнейшее совершенствование технологий Интернета вещей (IoT) и смарт-устройств позволит повысить точность и надёжность системы. Например, разработка более компактных и энергоэффективных датчиков расширит возможности их применения.

4. **Автоматизация обучения персонала:**

Использование данных о нарушениях для создания персонализированных программ обучения и тренингов поможет повысить квалификацию сотрудников и снизить количество ошибок [2].

Внедрение автоматизированного контроля за использованием СИЗ на космодроме — это лишь первый шаг на пути к созданию безопасной и эффективной рабочей среды. Для дальнейшего развития концепции необходимы:

а) **Исследования в области технологий безопасности**: разработка новых датчиков, алгоритмов ИИ и методов анализа данных.

б) **Пилотные проекты и тестирование**: апробация новых решений в реальных условиях для выявления и устранения потенциальных проблем.

с) **Междисциплинарное сотрудничество**: объединение усилий специалистов в области безопасности, IT, инженерии и управления для создания комплексных решений.

Только через непрерывные исследования и внедрение инноваций можно достичь нового уровня безопасности на космодромах и других объектах с повышенными рисками.

### **Библиографические ссылки**

1. Иванов А.А., Петров В.В. «Автоматизация контроля безопасности на производственных объектах». – М.: Издательство «Техносфера», 2021.
2. Смит Дж., Браун Р. «IoT- технологии системы мониторинга безопасности во взрывоопасных средах». – Журнал "Инженерия промышленной безопасности", 2022.
3. Петров В.И., Сидоров А.А. «Безопасность на космодромах: риски и решения». – М.: Издательство «Аэрокосмические технологии», 2020.
4. Джонсон Л., Уайт К. «Человеческий фактор в промышленной безопасности: проблемы и пути их решения». – Международный журнал по технике безопасности, 2021.
5. Гусев М.И., Козлов В.П. «Технологии IoT в промышленной безопасности». – М.: Издательство «Инновационные технологии», 2023.

## БОРТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА МОДЕЛЬНЫХ РАКЕТ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А.Н. Рыжков

Научный руководитель М.С. Руденко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

\*E-mail: bratella1@bk.ru

*Прилагается схема бортовой электроники для пассивной системы спасения и схема, состоящая из 2 частей, бортовой электроники для активной системы спасения.*

*Ключевые слова: Бортоника, модельная ракета, система спасения, микропроцессор.*

Важнейшим этапом проектирования модельных ракет является разработка бортового комплекса, основными функциями которого является прием и передача телеметрии, отслеживание высоты и скорости полета, а также решение дополнительных задач. В данной статье описан опыт работы участников студенческого конструкторского бюро «СТАРТ» с аппаратной платформой Arduino и платформой STM.

Одним из ключевых требований современных чемпионатов по запуску модельных ракет является разработка бортовой электроники для сбора данных о полете. Команда студенческого конструкторского бюро «СТАРТ» накопила значительный опыт работы с готовыми модулями датчиков на базе Arduino и платформы STM. На соревнованиях «Старт с Востока 2024» были представлены две модели бортовых комплексов.

Первая модель использовала пассивную систему спасения на микроконтроллере ATmega328 от Arduino, а вторая — активную систему спасения на базе Cortex-M3 от STM32. Их комплектация существенно различалась. В модели на базе Arduino были установлены только барометр и радиомодуль, что было обусловлено ограниченными размерами отсека для бортовой электроники (рис.1). В модели на базе STM32 были установлены акселерометр, барометр, радиомодуль, GPS-модуль, модуль SD-карты и два реле для системы спасения (рис.2(а, б)). В ходе отработки систем были выявлены некоторые проблемы, которые мешали успешной их работе.

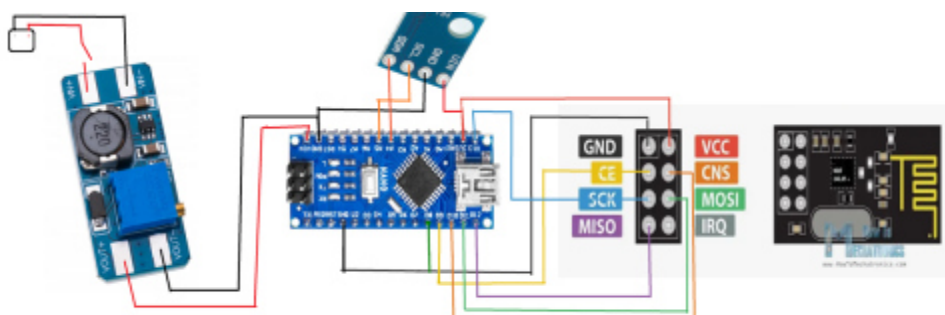


Рис. 1. Схема бортовой электроники с пассивной системой спасения

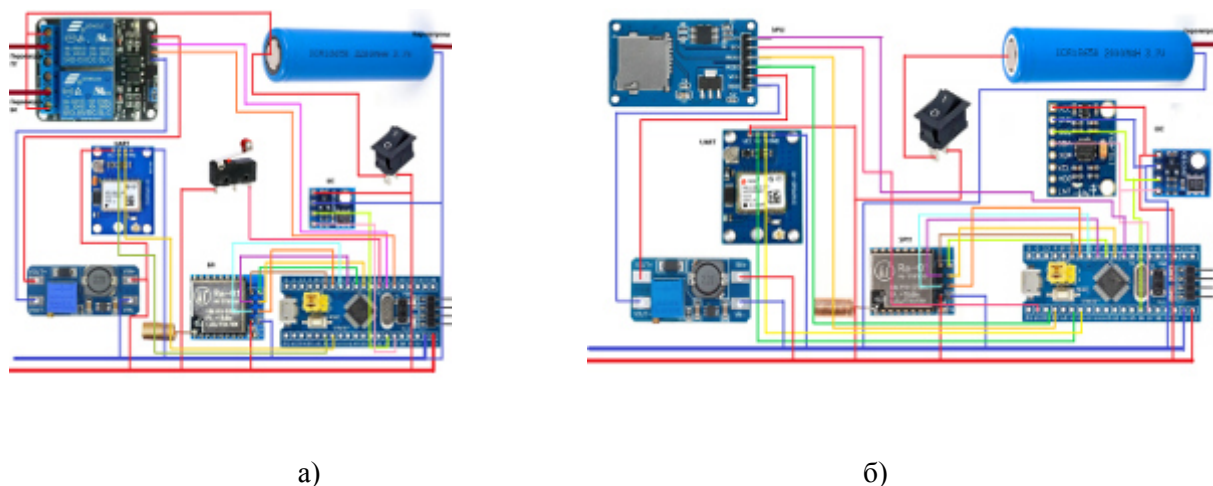


Рис.2. Схемы Бортовой электроника и полезного груза для ракеты с активной системы спасения

Проблемы с бортовым комплексом на Arduino возникли еще на этапе проектирования модели ракеты. Максимальное теоретическое ускорение ракеты составляло около  $200 \text{ м/с}^2$ , что приводило к колоссальным перегрузкам при старте (свыше 20G). Модуль arduino не был рассчитан на такие нагрузки (~15-18G) и вышел из строя менее чем через секунду после старта. Другая проблема заключалась в тонком корпусе отсека бортового комплекса, который не выдержал удара пыха при срабатывании системы спасения, что привело к разрушению корпуса и всего комплекса в воздухе.

Проблемы с бортовой электроникой на базе STM32 были связаны исключительно с технической частью комплекса. Главной проблемой было произвольное срабатывание реле из-за остаточных микротоков. Другая проблема заключалась в том, что блок электроники не реагировал на концевик.

Для решения проблем с моделью ракеты на базе Arduino необходимо перейти на более надежную схему или уменьшить перегрузки путем изменения конструкции ракеты. Также необходимо модернизировать корпус, сделав его более прочным, или осуществить переход от пассивной системы спасения к активной. Тогда отсек с бортовым комплексом можно будет разместить внутри ракеты так, чтобы на него не приходилась большая нагрузка при срабатывании системы спасения.

Для модели ракеты на базе STM32 необходимо исключить остаточные токи в схеме путем добавления стабилизаторов или маломощных компонентов. Также можно заменить реле на транзисторы, поскольку принцип их работы отличается. Транзисторы управляются электрическим сигналом, и микротоки не оказывают на них никакого влияния, что делает их более подходящими для данной задачи. Проблема с блоком электроники и концевиком была связана с плохим контактом из-за использования быстросъемных соединений. Необходимо отказаться от них и перейти к классической пайке, или найти качественную замену, которая обеспечит надёжный и постоянный контакт.

Таким образом, успешное проектирование и эксплуатация бортовых комплексов для модельных ракет требуют комплексного подхода, включающего как улучшение механической прочности и конструкции, так и оптимизацию электрических схем и соединений.

Эти выводы и рекомендации помогут будущим разработчикам избежать аналогичных проблем и повысить надёжность и эффективность своих проектов.

### **Библиографические ссылки**

1. Atmel ATmega328/P [DATASHEET] [Электронный ресурс].  
URL:[https://cdn.sparkfun.com/as-sets/c/a/8/e/4/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](https://cdn.sparkfun.com/as-sets/c/a/8/e/4/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf)
2. Учебник STM32-описание, программирование, отличие от Arduino.  
<https://arduinomaster.ru/stm32/stm32-mikrokontroller-dlya-nachinayushhih-posle-arduino/?ysclid=m2pqcvh97u550896748>
3. STM32 Microcontrollers (MCUs)- SI Mictoelectronics  
<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>

©А.Н. Рыжков 2025

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТАМИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Самохов Д.А.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия,  
E-mail: samohov2003@mail.ru

*Аннотация:* В статье рассматривается система автоматического управления (АСУТП) оборотами газотурбинного двигателя (ГТД) с использованием нечеткого регулятора. Обоснована актуальность применения нечетких регуляторов для управления сложными нелинейными объектами, такими как ГТД. Описан метод синтеза нечеткого регулятора, включающий этапы сбора данных, анализа и кластеризации, определения параметров функций принадлежности, формирования и редукции базы правил, верификации и валидации. Приведено описание объекта управления – турбовального ГТД. Представлена структура нечеткого регулятора, реализованного в среде динамического моделирования SimInTech. Проведено сравнение эффективности нечеткого регулятора с классическим ПИД-регулятором. Показаны преимущества нечеткого регулятора в условиях нестационарности и неопределенности параметров ГТД. Приведены результаты моделирования, подтверждающие более высокое качество регулирования при использовании нечеткого регулятора. Рассмотрены результаты при различных входных воздействиях.

*Ключевые слова:* АСУТП, газотурбинный двигатель, нечеткий регулятор, нечеткая логика, SimInTech, моделирование, оптимизация, ПИД-регулятор, система управления.

### Введение

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) играют ключевую роль в современной промышленности, обеспечивая эффективное и безопасное управление сложными объектами. Газотурбинные двигатели (ГТД) широко применяются в энергетике, авиации и других отраслях, предъявляя высокие требования к системам управления. Одной из актуальных задач является разработка высокоэффективных регуляторов, способных обеспечить требуемое качество регулирования оборотов ГТД в условиях неопределенности, нелинейности и нестационарности параметров двигателя.

Основной проблемой в управлении ГТД является необходимость обеспечения точности регулирования частоты вращения ротора при различных режимах работы. Классические регуляторы, такие как ПИД, не всегда способны эффективно справляться с изменением параметров системы. В данной работе исследуется возможность применения нечеткого регулятора, обладающего адаптивностью и высокой точностью. Объектом исследования является система управления ГТД, реализованная в среде SimInTech.

На текущий момент проведено моделирование работы нечеткого регулятора в SimInTech. Выполнен сравнительный анализ с ПИД-регулятором, продемонстрировавший более плавное управление и меньший уровень перерегулирования. Полученные результаты показывают потенциал использования нечеткой логики для улучшения управления ГТД.

### Область применения

Разработанная система управления может быть использована в:

- Авиационной промышленности для управления силовыми установками.

- Энергетическом секторе для газотурбинных электростанций.
- Промышленных установках, требующих точного контроля параметров двигателя.

## **1. Основы и применение нечеткой логики для реализации нечеткого регулятора в АСУТП**

### **1.1 Структура АСУТП**

АСУТП представляют собой человеко-машинные системы, предназначенные для автоматизации контроля и управления технологическим оборудованием. Основными задачами АСУТП являются контроль параметров, регулирование и стабилизация режимов, оптимизация работы и предотвращение аварий. Типовая структура АСУТП включает полевой уровень (датчики, исполнительные механизмы), уровень контроллерного оборудования, уровень человеко-машинного интерфейса и уровень серверов [2].

### **1.2 Основные концепции нечеткой логики**

Нечеткая логика, предложенная Л. Заде [4], является расширением классической логики и позволяет оперировать нечеткими множествами, где элементы имеют степень принадлежности от 0 до 1. Это позволяет моделировать неопределенность и размытость данных. Ключевыми элементами нечеткой логики являются нечеткие множества, нечеткие правила, нечеткий вывод и дефаззификация [3].

### **1.3 Нечеткие регуляторы: теория и применение**

Нечеткие регуляторы используют нечеткие правила, описывающие связь между входными и выходными переменными системы управления. Эти правила формулируются на естественном языке с использованием лингвистических переменных [3]. Нечеткие регуляторы обладают рядом преимуществ: учет неопределенности, использование экспертных знаний, робастность, адаптивность [4].

## **2. Метод синтеза нечеткого регулятора**

Метод синтеза нечеткого регулятора, используемый в данной работе, включает следующие этапы, показанные на рисунке 1:

- 1. Сбор данных:** Сбор данных о работе ГТД при различных режимах, включая входные (расход топлива) и выходные (обороты) параметры.
- 2. Анализ и кластеризация данных:** Обработка данных, удаление шумов, нормализация. Кластеризация данных для выявления характерных режимов работы ГТД (например, с использованием метода Fuzzy C-means).
- 3. Определение параметров функций принадлежности:** Определение функций принадлежности для лингвистических переменных, описывающих входные и выходные параметры (например, треугольные, трапецеидальные функции).
- 4. Создание базы правил:** Формирование нечетких правил вида "ЕСЛИ...ТО..." на основе результатов кластеризации и экспертных знаний.
- 5. Редукция базы правил:** Упрощение базы правил путем удаления избыточных и противоречивых правил.
- 6. Верификация и валидация:** Проверка работоспособности регулятора на модели системы, настройка параметров.



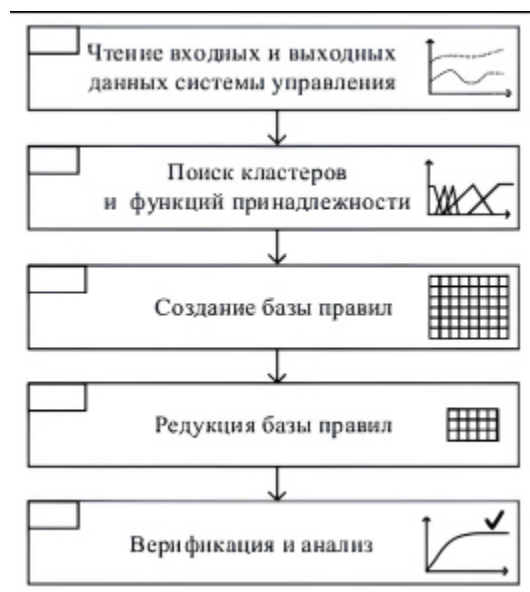


Рис. 1. Алгоритм синтеза нечеткого регулятора

### 3. Реализация нечеткого регулятора в среде динамического моделирования SimInTech

#### 3.1 Описание объекта управления

Объектом управления является турбовальный ГТД расположенный на рисунке 2, который можно представить как нестационарный объект с передаточной функцией (формула из ВКР), линеаризованной относительно момента турбины и момента компрессора. Параметры передаточной функции (коэффициент усиления и постоянная времени) зависят от режима работы двигателя.

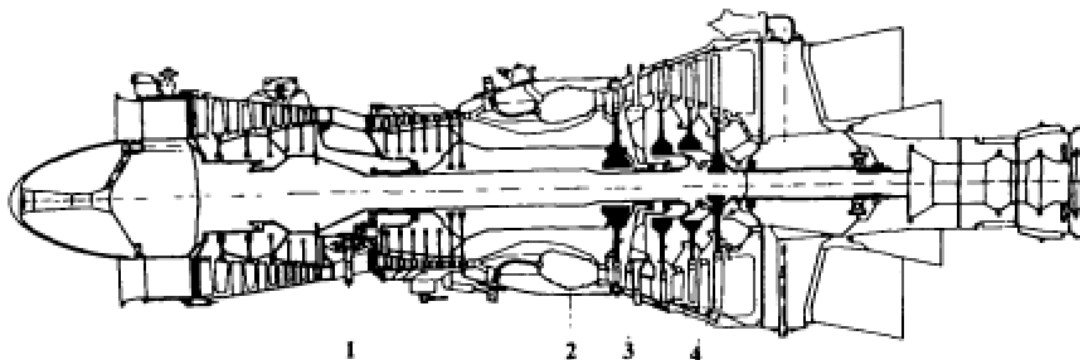


Рис. 2. Схема типового промышленного ГТД

1- компрессор; 2 - камера сгорания; 3 – турбина компрессора; 4 – силовая турбина.

Газотурбинный двигатель (ГТД) представляет собой роторную машину, где:

- компрессор (1) осуществляет сжатие воздуха;
- в камере сгорания (2) происходит горение топлива, которое подводится к воздуху;
- турбина компрессора (3) отбирает часть энергии от горячих газов, используя ее для привода компрессора (1);
- силовая турбина (4) создает мощность за счет расширения газов, которая передается от двигателя к потребителю.

В большинстве случаев управляемой величиной является частота вращения ротора ГТД. В системе автоматического управления (САУ) частотой вращения ротора ( $n$ ) управляется через расход топлива ( $G_t$ ) в камеру сгорания. Параметры двигателя существенно меняются на разных режимах работы и в различных внешних условиях.

### 3.2 Структура системы управления с нечетким регулятором

Частота вращения задаётся напряжением  $u_1(t)$  и измеряется импульсным датчиком ИД, частота выходного сигнала которого определяется выражением:

$$f = kmn,$$

где  $n$  – число оборотов двигателя;

$m$  – число зубьев редуктора;

$k$  – коэффициент передачи.

Переменное напряжение, снимаемое с выхода ИД, с помощью электронного преобразователя частоты ЭПЧ преобразуется в сигнал  $u_2(t)$ , величина которого пропорциональна числу оборотов двигателя  $n$ . Напряжение  $u_2(t)$  сравнивается с задающим напряжением, и сигнал ошибки после усилителя  $U$  поступает на двухфазный асинхронный двигатель Дв, который через редуктор Ред регулирует дроссельный клапан ДК, изменяя расход топлива, поступающего в газотурбинный двигатель.

Импульсный датчик вместе с электронным преобразователем частоты можно описать как пропорциональное звено с передаточной функцией, равной единице. При этом сама система имеет единичную обратную связь. Рассматривая последовательное соединение усилителя, асинхронного двигателя, дроссельного клапана, газотурбинного агрегата и частотного датчика с электронным преобразователем частоты в качестве единого объекта управления и применяя цифровой нечёткий регулятор, вся структура изображена на рисунке 3. При этом все передаточные функции звеньев сводятся к общей передаточной функции  $G_0(s)$ .

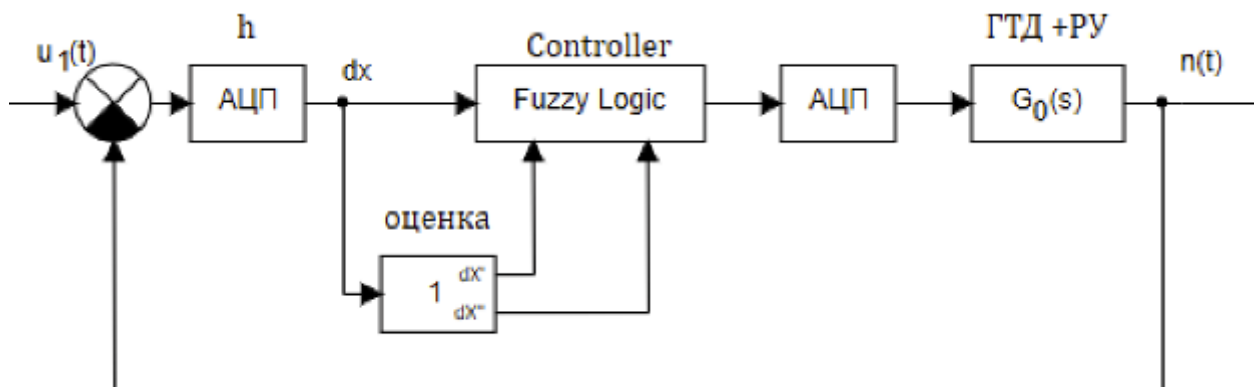


Рис. 3. Структура системы управления с нечетким регулятором.

### 3.2 Структура нечеткого регулятора

Структура нечеткого регулятора, реализованного в SimInTech, включает следующие блоки:

- **Экстраполятор:** Преобразование непрерывного сигнала ошибки в дискретный.
- **Блоки вычисления производных:** Вычисление первой и второй производных сигнала ошибки.
- **Блоки фаззификации:** Преобразование четких значений входных переменных (ошибка, скорость изменения ошибки, ускорение ошибки) в нечеткие множества с использованием треугольных функций принадлежности.
- **Блок нечетких правил:** Релизация базы нечетких правил с использованием логических операций "И".
- **Блок дефаззификации:** Преобразования нечётких выходных данных в чёткие значения.

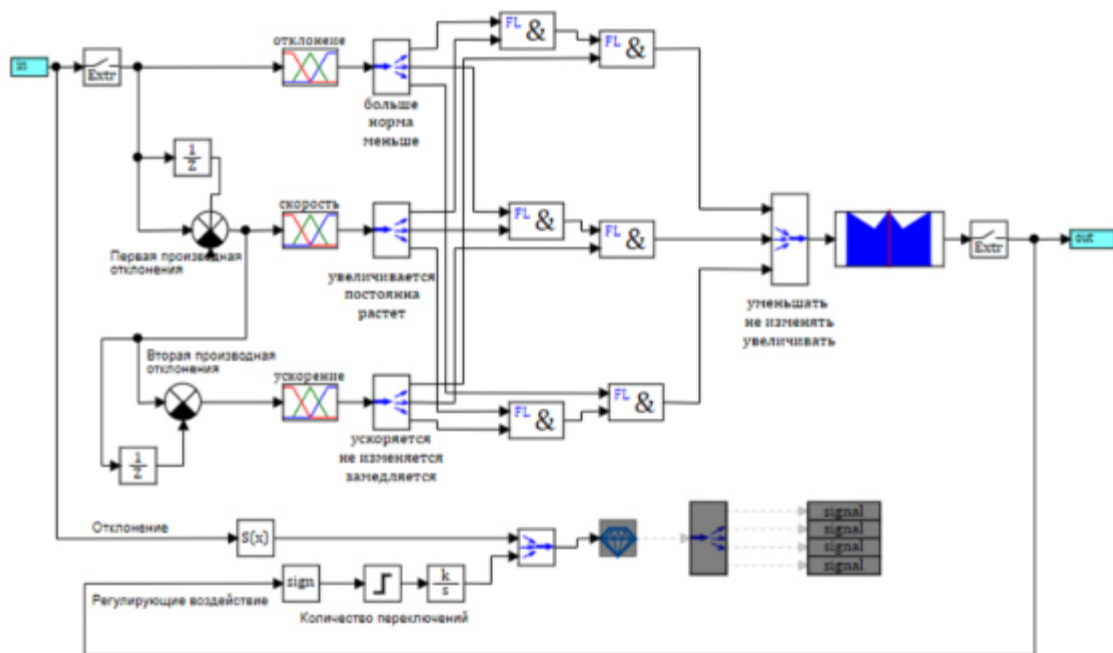


Рис.4. Нечеткий регулятор

### 3.3 Синтез регулятора на базе нечеткой логики

Для начальной настройки нечеткого регулятора использовались следующие параметры (значения из ВКР):

- $u_{\text{Max}}$  (амплитуда управляющего воздействия);
- $\text{deltaMax}$  (максимальное отклонение);
- $\text{divMax}$  (максимальная производная отклонения);
- $\text{div2Max}$  (максимальная вторая производная отклонения).

Функции принадлежности – треугольные, симметричные относительно нуля. База правил сформирована на основе экспертных знаний о поведении ГТД. Для улучшения качества была приведена оптимизация, методом симплекса.

### 4. Результаты моделирования и сравнение с ПИД-регулятором

Было проведено моделирование работы системы управления с нечетким регулятором и ПИД-регулятором в SimInTech при плавном и ступеньчатом изменении задающего воздействия (оборотов).

При плавном изменении оборотов, нечёткий регулятор показал лучший результат. При ступеньчатом наборе оборотов, нечеткий регулятор не справился с задачей и система ушла в автоколебания.

Результаты моделирования (графики из ВКР, иллюстрирующие переходные процессы для обоих регуляторов) показывают, что нечеткий регулятор обеспечивает:

- Меньшее перерегулирование.
- Более плавное управляющее воздействие.
- Более быструю стабилизацию оборотов.

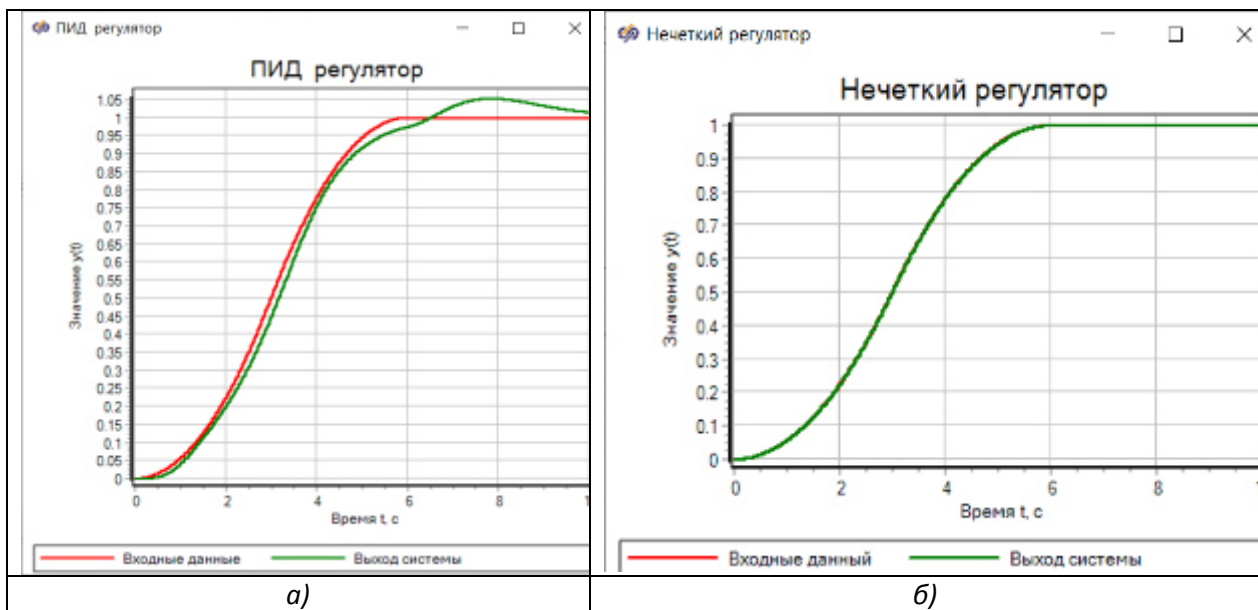


Рис. 5. Графики переходных процессов:  
 а - ПИД регулятора; б - нечеткого регулятора

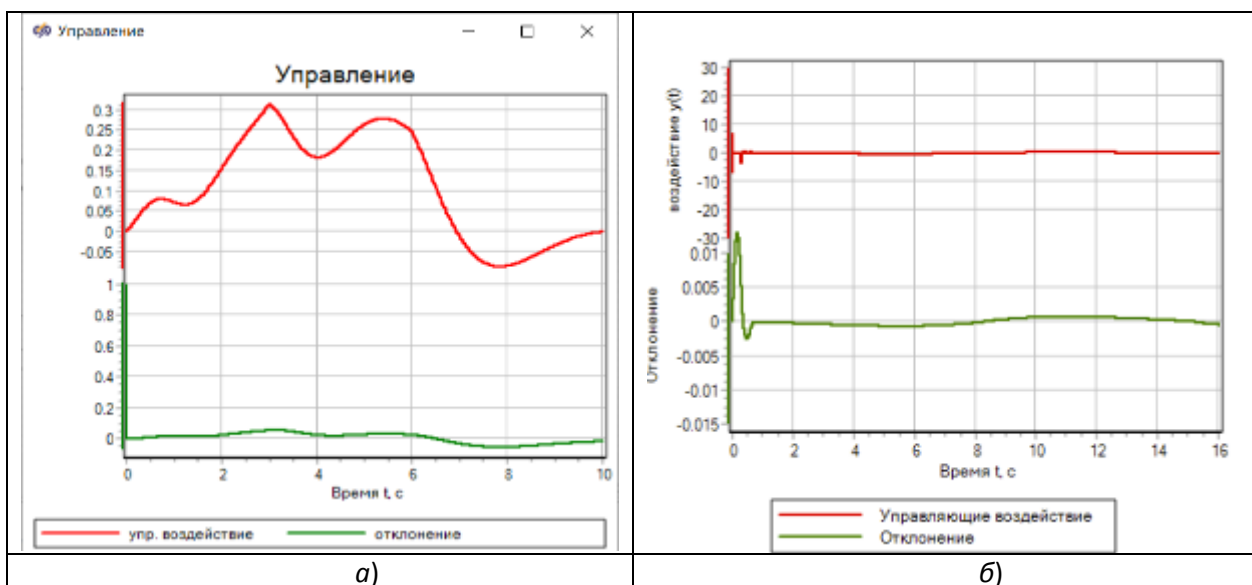


Рис. 6. Управляющие воздействие и отклонение)  
 а - ПИД регулятора; б - нечеткого регулятора

### Закключение

Разработана и исследована система управления оборотами ГТД на основе нечеткого регулятора, реализованного в среде SimInTech. Результаты моделирования показали преимущества нечеткого регулятора по сравнению с классическим ПИД-регулятором в условиях нелинейности и нестационарности параметров ГТД, а именно: меньшее пере-регулирование, более плавное управляющее воздействие и более быструю стабилизацию.

### Библиографические ссылки

1. Аль-Наджар Б. Нечеткие микрорегуляторы траектории инструмента станков с ЧПУ // Приборы и системы управления. 1996. №2. С.28-29.

2. Бриджид Е.С., Доррер Г.А., Дурмушкин С.В. Проектирование нечетких регуляторов на основе имитационного моделирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. №8. С.26-33.
3. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 408 с.
4. Заде, Л. А. (1973). "Основные принципы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений". IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 3(1), 28-44.

© Самохов Д.А. 2025 г.

## СТЕНД ДЛЯ СНЯТИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕЕБЕКА

Е.А. Голубев, А.Д. Мартыненко, Г.Л. Редкоус, И.Е. Бородин, К.О. Фаилов

Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: evgeniy\_golubev@internet.ru

*В работе рассматривается разработка экспериментальной установки для исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) элементов Зеебека, применяемых в термоэлектрических генераторах (ТЭГ). Актуальность исследования обусловлена недостатком данных от производителей, ограничивающихся указанием базовых параметров (температурный диапазон, напряжение холостого хода, ток короткого замыкания), что затрудняет проектирование систем электропитания на основе ТЭГ. Предложенный стенд позволяет регулировать и поддерживать температуры «горячей» и «холодной» сторон элемента, варьировать нагрузку в диапазоне от короткого замыкания до холостого хода, а также фиксировать ток и напряжение.*

*Ключевые слова:* элементы Зеебека, термоэлектрогенератор, экспериментальная установка, вольт-амперная характеристика.

Разработка и внедрение ТЭГ на основе элементов Зеебека представляют собой перспективное направление в создании автономных систем электропитания. Однако проектирование таких систем затруднено из-за недостатка данных о ВАХ элементов Зеебека, предоставляемых производителями. Обычно производители ограничиваются указанием базовых параметров, таких как температурный диапазон работы, напряжение холостого хода и ток короткого замыкания, что недостаточно для точного моделирования и оптимизации систем на основе ТЭГ [1].

В связи с этим необходимо разработать экспериментальную установку, которая позволяет провести необходимые экспериментальные исследования для получения ВАХ элементов Зеебека.

В данной работе представлены конструктивные особенности экспериментального стенда и его функциональные возможности. Экспериментальный стенд для исследования элементов Зеебека представляет собой multifunctional установку, разработанную для проведения точных измерений ВАХ в широком диапазоне условий. Основная задача стенда — обеспечить возможность изучения поведения элементов Зеебека при различных температурных режимах и нагрузках, что является важным для проектирования ТЭГ [2].

Основные возможности стенда:

1. Регулирование температур «горячей» и «холодной» сторон элемента Зеебека.

Стенд позволяет изменять температуры «горячей» и «холодной» сторон элемента Зеебека в заданном диапазоне, что необходимо для моделирования реальных условий эксплуатации термоэлектрогенераторов. Температура «горячей» стороны регулируется с помощью нагревательных элементов, встроенных в теплопроводящую пластину, а температура «холодной» стороны контролируется за счет использования незамерзающей жидкости и системы охлаждения. Это обеспечивает возможность исследования элементов Зеебека при различных градиентах температур, что является ключевым фактором для определения их эффективности.

2. Поддержание постоянства температур горячей» и «холодной» сторон элемента Зеебека во время измерений.

Одной из важнейших функций стенда является способность поддерживать стабильные температуры «горячей» и «холодной» сторон элемента Зеебека на протяжении всего процесса снятия ВАХ. Это достигается за счет использования теплопроводящих пластин с высокой теплоемкостью, которые минимизируют колебания температур, а также благодаря точной системе терморегуляции, включающей термопары и электронный термометр. Такая стабильность обеспечивает высокую точность измерений и воспроизводимость результатов.

3. Изменение токопотребления элемента Зеебека от режима тока короткого замыкания и до режима холостого хода

Стенд позволяет варьировать нагрузку на элемент Зеебека в широком диапазоне: от режима короткого замыкания (максимальный ток) до режима холостого хода (нулевой ток). Это достигается за счет использования электронной нагрузки, которая обеспечивает изменение тока в широком диапазоне. Такая возможность позволяет получить необходимое количество точек для построения «плавной» ВАХ элемента Зеебека, включая ключевые точки, такие как ток короткого замыкания и напряжение холостого хода. Для проведения точных измерений стенд оснащен высокоточными приборами, такими как цифровые мультиметры или специализированные измерительные модули, которые фиксируют значения тока и напряжения на выходе элемента Зеебека. Данные передаются в систему сбора и обработки информации, что позволяет строить ВАХ в реальном времени и анализировать их с высокой точностью.

Таким условиям соответствует стенд, структурная схема которого приведена на рисунке 1.

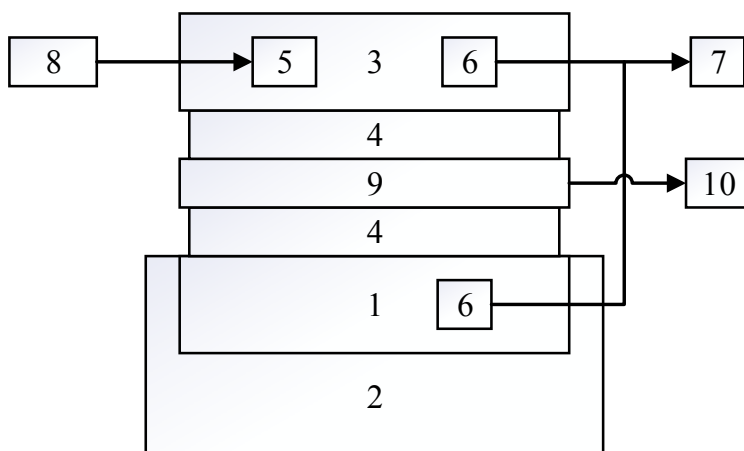


Рис. 1. Структурная схема стенда для снятия ВАХ элемента Зеебека

1 – первая теплопроводящая оребренная пластина, 2 – ёмкость с незамерзающей жидкостью, 3 – вторая теплопроводящая оребренная пластина, 4 – теплопроводящая паста, 5 – нагревательные элементы, 6 – термопары, 7 – электронный термометр, 8 – лабораторный блок питания с регулируемым выходным напряжением, 9 – элемент Зеебека, 10 – электронная нагрузка и измерительные приборы (вольтметр, амперметр).

В этом стенде температура «холодной» стороны элемента Зеебека, контактирующей с первой теплопроводящей оребренной пластиной 1, изменяется за счёт повышения температуры незамерзающей жидкости посредством нагревателя. При этом температура незамерзающей жидкости до начала эксперимента понижается до температуры, которая ниже минимально необходимой температуры «холодной» стороны элемента Зеебека с использованием дополнительного холодильного устройства. Температура «горячей»







3. Шостаковский П. Термоэлектрические источники альтернативного электропитания  
// Компоненты и технологии. - 2010. - №12 (113). - С. 131-138.

© Голубев Е.А., Мартыненко А.Д., Редкоус Г.Л., Бородин И.Е., Фаилов К.О., 2025

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

И.М. Журавлев, А.Г. Струговец

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»

имени академика М.Ф. Решетнёва

Российская Федерация, 662972, Красноярский край, г Железногорск, ул Ленина, зд. 52

E-mail: iv\_zhuravlev@mail.ru

*В работе рассмотрена структура энергопреобразующей аппаратуры, обеспечивающая требуемый уровень отказоустойчивости для космических аппаратов. Показано, что применение цифровой системы управления и передачи информации позволяет обеспечивать работоспособность при двух произвольных отказах.*

*Ключевые слова: космический аппарат, энергопреобразующая аппаратура, цифровая система управления, надежность, резервирование.*

Развитие электроники и микроэлектроники за последние 5-10 лет открывает новые возможности при построении перспективной аппаратуры для космических аппаратов (КА). Появление на рынке высокопроизводительных микроконтроллеров, ПЛИС и АЦП позволяет начать их активно внедрять для построения систем регулирования с обратной связью в самых разнообразных приборах и устройствах КА, в частности в энергопреобразующей аппаратуре (ЭПА). В настоящей работе предлагается структурная и функциональная схема энергопреобразующего комплекса, обеспечивающие требуемый уровень отказоустойчивости.

Энергопреобразующая аппаратура КА представляет собой комплекс импульсных преобразователей энергии, осуществляющих формирование стабилизированной шины питания КА [1,2]. В состав ЭПА входят: шунтовой стабилизатор (ШС), осуществляющий преобразование энергии БС при нахождении КА на солнечных участках орбиты, и зарядно-разрядное устройство (ЗРУ), осуществляющее преобразование напряжения АБ при нахождении КА на теневых участках орбиты и заряд АБ заданным стабилизированным током при нахождении КА на солнечных участках орбиты.

Для обеспечения отказоустойчивости импульсные преобразователи энергии, входящие в ЭПА, строятся из отдельных нерезервированных каналов, а конструктивно состоят из отдельных модулей, шунтовой стабилизатор из модулей шунтового стабилизатора (МШС), зарядно-разрядное устройство из модулей зарядно-разрядного устройства (МЗРУ). Управление всеми преобразователями энергии во всех режимах функционирования ЭПА осуществляется от единого резервированного модуля управления.

Внедрение цифровых устройств управления взамен аналоговых позволит сократить количество используемых для целей управления элементов, реализовывать более функциональные и надежные и адаптивные алгоритмы управления, а также использовать более эффективные схемотехнические решения [1,3]. Функции цифрового управления энергопреобразующей аппаратурой возложены на модуль цифрового управления (МЦУ). Таким образом, структурная схема ЭПА с цифровой системой регулирования, объединяющая в себе многоканальный ШС, многоканальное ЗРУ и резервированный МЦУ приведена на рисунке 1.

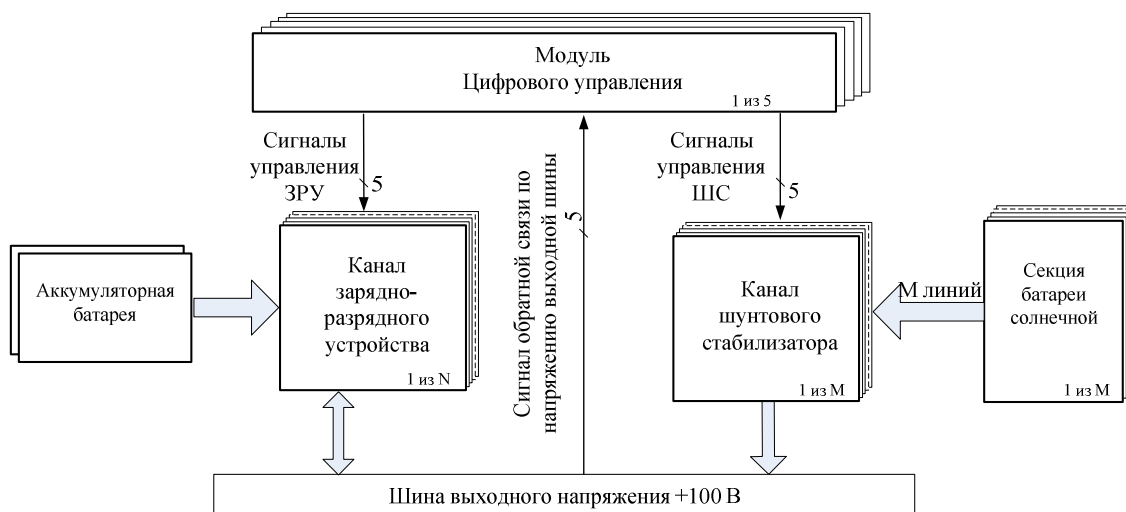


Рисунок 1. Структурная схема ЭПА

Концентрация множества регулирующих, управляющих и защитных функций преобразователями в едином модуле цифрового управления диктует высокие требования к надежности, резервированию и безотказной работе данного модуля. Данная работа посвящена методам резервирования цифровой системы автоматического регулирования с опорой на распределение задач по реализации резервирования между МЦУ и каналами ШС и ЗРУ. Для этого будет описано, каким образом осуществляется резервирование МЦУ, и за счет каких принципов и устройств поддерживается резервирование со стороны ШС и ЗРУ с учетом реализованного типа управления для каждого модуля.

Реализация функции резервирования в МЦУ.

Контуры управления ЭПА подразделены на верхний уровень (уровень прибора) и нижний уровень (уровень каналов преобразователей энергии). Контур управления верхнего уровня, на основе сигнала рассогласования между опорным значением и текущим значением напряжения выходной шины, осуществляет выработку управляющих воздействий для контуров управления нижнего уровня, реализованных в ЗРУ и ШС. Выполнение задач контура управления верхнего уровня реализует МЦУ.

Для обеспечения резервирования основного управляющего устройства, МЦУ строится из пяти параллельно работающих каналов, что позволит обеспечить резервирование по схеме «3 из 5». Это означает, что ШС и ЗРУ будут работать с достоверными сигналами управления, даже если на каком-то из этапов функционирования, от непосредственной обработки сигнала обратной связи до передачи его в остальные модули произойдут сбой в двух каналах МЦУ или двух каналах передачи данных. Все каналы МЦУ гальванически развязаны, что исключает взаимное влияние каналов между собой.

Система управления МЦУ реализована на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), функциональная схема канала МЦУ изображена на рисунке 2.

На вход всех каналов поступает напряжение стабилизируемой шины, которое масштабируется и оцифровывается. Оцифрованное значение вычитается из опорного значения, и передается на вход регулятора. Обработанный регулятором сигнал рассогласования используется для формирования управляющего воздействия (УВ) для ШС и ЗРУ.

Передача управляющего воздействия от главного контура стабилизации напряжения МЦУ в ШС и ЗРУ осуществляется с помощью специализированного цифрового интерфейса связи SPI с физическим уровнем передачи данных LVDS.

Модуль цифрового управления обеспечивает работу прибора во всех режимах (ШС, ЗУ, РУ) путём смены коэффициентов регулятора и задания режима работы модуля. Управляющее воздействие для ЗРУ передаётся в виде 16-ти разрядного слова данных и участвует в дальнейшем, в зависимости от режима работы, как задание на ток заряда ак-

кумуляторной батареи (режим ЗУ), либо в качестве опорного значения для контура тока (режим РУ).

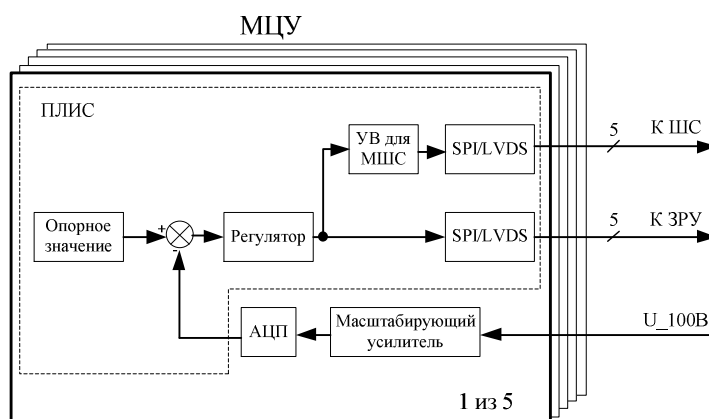


Рисунок 2. Функциональная схема МЦУ

Таким образом, на уровне МЦУ резервирование осуществляется путем одновременной параллельной работы пяти вычислителей, которые формируют пять управляющих воздействий, которые передаются во все каналы ШС и ЗРУ. Каким образом осуществляется обработка пяти УВ в каналах ШС и ЗРУ описано в следующих разделах.

#### Резервированный МШС.

Функционально, шунтовой стабилизатор (ШС) состоит из N-го числа каналов, каждый из которых подключен к отдельной секции БС. Данная структура позволяет повысить надежность ЭПА за счет реализации N-го количества нерезервированных каналов ШС. Схемотехнически, каждый канал ШС выполнен на основе классического шунтового стабилизатора с дискретной ШИМ, который с помощью полупроводниковых ключей позволяет подключить БС непосредственно к нагрузке, отключить БС от нагрузки, или подключить БС к нагрузке на некоторое дискретное, в рамках периода работы время. МЦУ, как было описано выше, исходя из ошибки регулирования формирует конфигурацию подключенных, отключенных каналов ШС, и длительность открытого состояния одного из каналов ШС, что создаст такой суммарный выходной ток секций БС, который обеспечит заданное напряжение выходной шины для данной подключенной нагрузки. Функциональная схема системы управления ЗРУ приведена на рисунке 3.

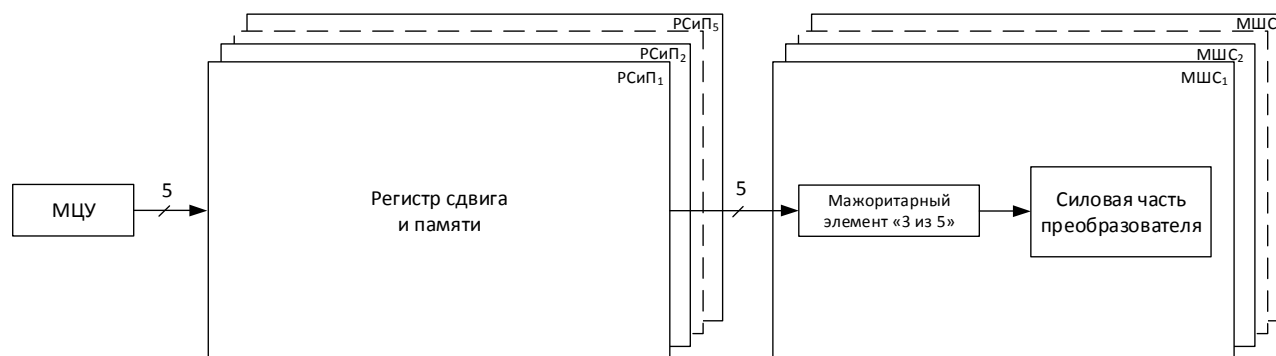


Рисунок 3. Структурная схема ШС

Учитывая повышенные требования к надежности цифровой системы управления космическим аппаратом, ШС должен сохранять свою работоспособность при двух отказах произвольных элементов [4]. В зависимости от выходной мощности ЭПА ШС может включать в себя от одного до семи модулей ШС, каждый из которых конструктивно состоит из 9 каналов ШС.

Интерфейс передачи сигнала управления из МЦУ реализован с помощью резервированного регистров сдвига и памяти последовательно-параллельного типа. Использование подобного набора микросхем в каждом из каналов ШС является избыточным, поэтому данный узел вынесен на уровень выше и реализован в виде 5 регистров сдвига и памяти в каждом модуле ШС. Принцип работы следующий – на вход пяти регистров сдвига и памяти, по последовательной шине, одновременно поступает пять одинаковых управляющих воздействий от пяти каналов МЦУ. Выходные сигналы регистров сдвига и памяти поступают на вход мажоритарных элементов «3 из 5», размещенных в каждом из каналов МШС. Мажоритарный элемент реализует сравнение пяти сигналов, поступивших с МЦУ, и выдает один сигнал, являющийся преобладающим. Таким образом, обеспечивается функционирование блока при отказе двух любых элементов.

Таким образом, схемотехника ШС гарантирует, что ключи фаз ШС будут именно в тех состояниях, которые задал им МЦУ в процессе регулирования, даже при наличии двух ошибок в каналах МЦУ, либо двух сбоях в каналах передачи данных от МЦУ к ШС.

Резервированный МЗРУ.

Так как напряжение АБ КА изменяется в диапазоне 55-96 В, и не превышает напряжения выходной шины 100 В [5], в ЗРУ планируется применить двунаправленный преобразователь с неполным диапазоном регулирования.

Двунаправленная схема предполагает возможность работы одной силовой части в двух принципиально разных режимах.

1. Преобразование энергии от АБ – режим разрядного устройства (РУ). В этом режиме преобразователь работает как вольтодобавочный, основная задача которого стабилизация напряжения выходной шины. Применяется двухконтурная система автоматического регулирования, где внешний контур стабилизации напряжения реализован в МЦУ, а подчиненный контур стабилизации тока реализован в ЗРУ.

2. Преобразование энергии от стабилизированной выходной шины – режим зарядного устройства (ЗУ). В этом режиме преобразователь работает, как понижающий напряжение, основная задача которого стабилизация зарядного тока АБ. Ток дросселя в режиме ЗУ будет противоположен по направлению току, протекающему через этот дроссель в режиме РУ. В данном случае применяется одноконтурная система стабилизации тока, реализованная в ЗРУ, задание на который формирует МЦУ.

Функциональная схема ЗРУ приведена на рисунке 4.

Представленная структурная схема, как и логика работы аналогичны для режимов РУ и ЗУ, различие будет в коэффициентах регулятора контура тока, которые будут определяться режимом работы. ЗРУ представляет собой N параллельно работающих преобразователей, подключенных к одной нагрузке, и работающих от одного источника. Равномерное распределение тока между каналами осуществляется благодаря внутренним контурам стабилизации тока.

Логика функционирования в соответствии со структурной схемой приведена далее. На вход мажоритарного элемента «3 из 5» из МЦУ приходит пять сигналов управляющего воздействия. Функцию мажоритарного элемента выполняет медианный фильтр, который выстраивает по возрастанию принятые пять значений и находит среди них серединное, которое поступает на задающий вход подчиненного контура стабилизации тока. Значение тока дросселя с датчика тока поступает на вход АЦП. Преобразованное в АЦП значение вычитается из сигнала задания на ток, таким образом формируя сигнал рассогласования. Сигнал рассогласования обрабатывается регулятором и полученное значение подается на вход ШИМ, который формирует соответствующую последовательность импульсов управления транзисторами силовой части ЗРУ.

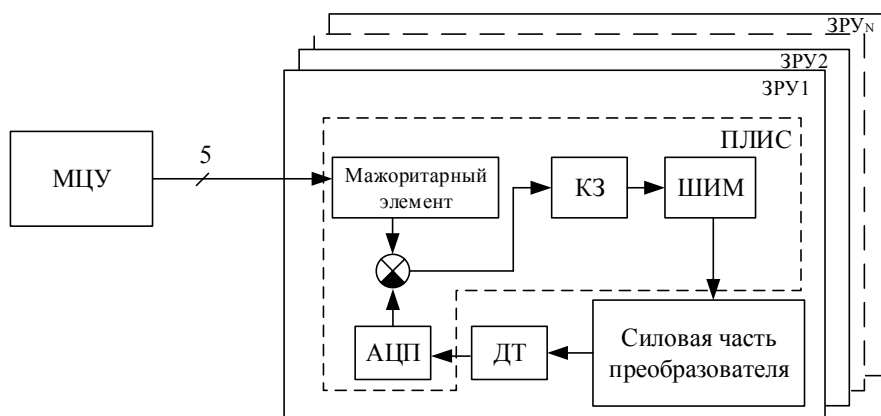


Рисунок 4. Функциональная схема ЗРУ

Таким образом, гарантируется сбоеустойчивая работа ЗРУ даже в случае возникновения двух отказов в МЦУ, или двух сбоев при передачи данных от МЦУ к ЗРУ.

Выводы. В данной работе рассмотрен способ построения резервированной цифровой системы автоматического регулирования комплексом энергопреобразующей аппаратуры. Подход к построению резервированной системы состоит в реализации пяти параллельно работающих вычислителей, которые формируют пять сигналов управления для каждого преобразователя ЭПА, и декодирование их на стороне силовых модулей при помощи регистров сдвига и памяти последовательно-параллельного типа с мажоритарными элементами для случая ШС, или при помощи медианного элемента для случая ЗРУ для получения единственного действительного управляющего воздействия, формируемого МЦУ. Данный подход к резервированию позволяет обеспечивать бесбойную работу при возникновении любых двух отказов в системе управления для конфигурации ЭПА любой необходимой мощности, состоящего из необходимого количества каналов ШС и ЗРУ.

### Библиографические ссылки

1. Источники энергии систем электроснабжения космических аппаратов : монография / [М. В. Лукьяненко и др.] ; Федеральное агентство по образованию, Сибирский гос. аэрокосмический ун-т им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск : Сибирский гос. аэрокосмический ун-т им. М. Ф. Решетнева, 2008. – ISBN 978-5-86433-362-4. – EDN QNVJQT.
2. Обеспечение надежности сложных технических систем : учебник / А. Н. Дорохов, В. А. Керножицкий, А. Н. Миронов, О. Л. Шестопалова. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 352 с. — ISBN 978-5-8114-1108-5.
3. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
4. Комплексный алгоритм проектирования энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов / И.Е. Лысенко, И.М. Журавлев, М.Е. Хлыстунов, Д.О. Дударьков, А.Г. Струговец // Вестник чувашского университета. – 2023. – 4. – С. 85-98.
5. Журавлев И. М. Зарядное устройство аккумуляторной батареи космического аппарата на основе двухтактного понижающего преобразователя напряжения с трансформаторными датчиками тока / М.Е. Хлыстунов, И.М. Журавлев, А.Г. Струговец // Практическая силовая электроника. – 2023. – № 4(92). – С. 33-37.

© Журавлев И.М., Струговец А.Г. 2025

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА БОРТОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ СБОРОК СТУДЕНТАМИ

В.М. Нечепуренко, Г.М. Гринберг

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: nechepurenkovika@yandex.ru

*Рассмотрена организация подготовки специалистов в области технологии изготовления и испытаний кабельных сборок летательных аппаратов.*

*Ключевые слова: летательный аппарат, бортовая кабельная сеть, изготовление и испытания кабельных сборок.*

На кафедре систем автоматического управления (САУ) Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева осуществляется подготовка студентов-бакалавров и студентов-магистрантов соответственно направлений подготовки 24.03.02 и 24.04.02 - Системы управления движением и навигация, а также студентов-специалистов специальности 24.05.06 – Системы управления летательными аппаратами.

Для студентов-бакалавров и студентов-специалистов преподаются дисциплины «Технология приборостроения» и «Испытания приборов и систем управления летательными аппаратами», а для студентов-магистрантов – дисциплины «Технология изготовления элементов систем управления» и «Технология испытаний и контроля систем управления».

Одной из целей дисциплин технологической направленности является изучение студентами принципов и методов технологии и организации производства приборного оборудования летательных аппаратов, а задачами дисциплин - формирование у студентов достаточных знаний в области теоретических основ технологии приборостроения, приобретение навыков разработки технологических процессов, выполнения технологических работ.

Целью дисциплин, содержание которых связано с испытаниями приборов и систем управления летательными аппаратами, является формирование у студентов фундаментальных и профессиональных знаний по организации и технологии контроля и испытаний, теоретическое и практическое освоение студентами методологии испытаний изделий аэрокосмической техники.

Для достижения указанных целей и задач учебными планами подготовки по этим дисциплинам предусмотрены практикумы в виде лабораторных и/или практических занятий, в ходе которых обучающиеся выполняют определённый цикл работ в соответствии с программой.

Практикумы по учебным дисциплинам обслуживают прикладную сторону профессионального обучения, содействуют формированию у будущего специалиста системы необходимых профессиональных умений, позволяющих профессионалу достичь гарантированного успеха в работе [1].

По сравнению с обычными лабораторными работами и практическими занятиями, практикумы характеризуются большей практической направленностью, большей самостоятельностью учащихся и творческим отношением к выполнению заданий.

Перед разработчиком лабораторного практикума стоят следующие важные задачи:

- практическое закрепление полученных теоретических знаний;
- приобретение навыков самостоятельной работы с реальным оборудованием;
- планирование и постановка инженерного эксперимента;
- выбор оборудования для проведения эксперимента;
- обработка и объяснение результатов эксперимента;
- сопоставление результатов теоретического анализа с экспериментальными данными.

В идеальной постановке образовательного процесса для повышения эффективности усвоения учебного материала, каждый объект изучения в рамках учебной дисциплины в обязательном порядке должен снабжаться всеми необходимыми компонентами теоретического, практического, модельного и экспериментального изучения [2].

На борту летательных аппаратов устанавливается большое количество различных бортовых радиоэлектронных, информационно-измерительных, преобразующих, вычислительных устройств и приборов, которые предназначены для совместной работы и должны быть электрически связаны между собой.

Для обеспечения таких связей используются кабельные сборки - сочетание применяемых, как единое целое, кабеля (ей) и соединителя (ей) с дополнительной защитой либо без нее, с установленными характеристиками, и предназначенные для решения конкретной задачи. Сборки удобны тем, что с ними не приходится беспокоиться о подсоединении интерфейсов (коннекторов, разъемов) и их надежной фиксации [3].

Кабельные сборки предназначены для передачи электрической энергии или информации на расстояние, т.е. для создания самых разнообразных электрических, электронных и радиотехнических схем и цепей. Ни одно современное техническое устройство, работа которого связана с использованием электрических и электронных схем, не может работать без кабелей и проводов, которые образуют системы электроснабжения, информатики и управления работой этого устройства [4].

Студенты, изучающие названные выше дисциплины, должны быть обучены, в том числе, технологии изготовления кабельных сборок и технологии последующей оценки их качества.

Для организации такого обучения была разработана концепция практикума по технологии изготовления и испытания кабельных сборок, описание которой приведено в [5].

Согласно разработанной концепции практикум состоит из трех этапов.

Первый этап - подготовительно-ознакомительный направлен на подготовку студентов к успешному выполнению заданий практикума.

На этом этапе каждому студенту выдается индивидуальное техническое задание (ТЗ) на изготовление кабельной сборки.

В соответствии с определением, данным в ГОСТ 15.016-2016, техническое задание является исходным техническим документом для проведения работы, устанавливающий требования к создаваемому изделию и технической документации на него, а также требования к объему, срокам проведения работы и форме представления [6].

В каждом техническом задании на выполнение практической работы приводятся следующие основные данные: описывается назначение кабельной сборки; оговариваются марки используемых для изготовления кабельной сборки материалов (марки проводников, материал оболочки и др.); оговаривается исполнение кабельной сборки – герметичное, негерметичное; задается рабочее напряжение; задается род тока; задается рабочая частота; задается номинальный ток; задаются условия эксплуатации.

Помимо указанных, могут быть заданы дополнительные требования.

Конструктивное исполнение кабельной сборки задается сборочным чертежом (рис. 1),

Задаются типы используемых в сборке электрических соединителей и схемы заделки проводов в них (рисунок 2).



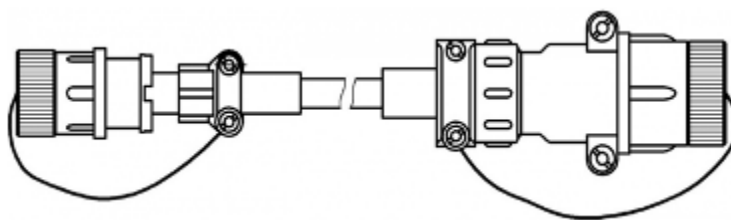


Рисунок 1 – Сборочный чертеж соединительного кабеля

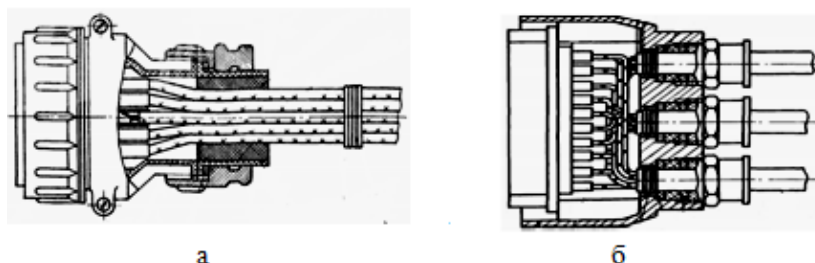


Рисунок 3 – Схемы заделки проводов в электрических соединителях разных типов:  
а - для круглых электрических соединителей; б - для прямоугольных электрических соединителей

Каждому студенту выдается один из вариантов электрической схемы кабельной сборки. На рисунке 2 показан один из вариантов электрической схемы.

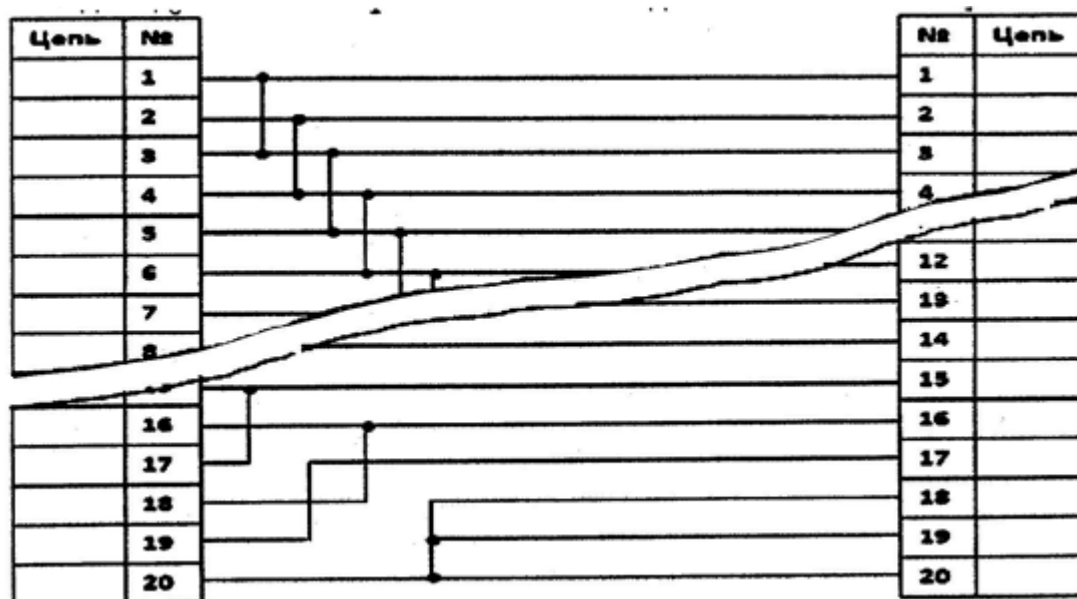


Рисунок 3 - Электрическая схема кабельной сборки

На втором этапе практикума согласно полученному техническому заданию студент:

- разрабатывает технологию изготовления кабельной сборки (разрабатывает технологический маршрут изготовления сборки, осуществляет подбор необходимого оборудования, инструмента, приспособлений, материалов из числа имеющихся в лаборатории радиомонтажной практики кафедры САУ);
- изготавливает кабельную сборку.

На третьем заключительном этапе производится оценка студентом изготовленной им сборки на соответствие требованиям технического задания.

Полученные результаты оформляются в виде отчета по практикуму, который предоставляется на защиту.

Для выполнения операций изготовления и оценки сборки используется технологическое оборудование лаборатории радиомонтажной практики кафедры САУ (рис. 4).



Рисунок 4 -Технологическое оборудование лаборатории радиомонтажной практики

Предлагаемый вариант построения практикума будет способствовать установлению логических связей между учебными дисциплинами с тем, чтобы обучающиеся усвоили их материал как целостную систему со всей структурой, отражающей данную науку.

Материалы статьи могут быть полезными для преподавателей вузов, учителей технологии и работников системы повышения квалификации и дополнительного профессионального обучения.

### Библиографические ссылки

1. Чернилевский Д. В. Дидактические технологии в высшей школе: учебное пособие для вузов / Д. В. Чернилевский. Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 437 с.
2. Современная концепция реализации лабораторного практикума в техническом университете [Электронный ресурс] / URL: <http://www.edu.kspu.ru/file.php/1/hrestomatia/part12.html> (дата обращения: 12.09.2024).
3. Кабельные сборки: виды и назначение [Электронный ресурс] / URL: <https://folan.ru/blog/tehnologii/kabelnye-sborki-vidy-i-naznachenie/?ysclid=m8bapvw3tb464522416> (дата обращения: 12.02.2025).
4. Основы кабельной техники [Текст] : учебник для вузов / В. М. Леонов [и др.] ; под ред. И. Б. Пешкова. - Москва. : Academia, 2006. – 426 с.
5. Гринберг Г.М., Мамаджанова Н.И., Нечепуренко В.М. В сборнике: Решетневские чтения. Материалы XXVIII Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева: 2-х частях. Красноярск, 2024. С. 753-755.
6. ГОСТ 15.016-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению [Электронный ресурс] / URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=206706&ysclid=m8azfejexj370375290> (дата обращения: 18.02.2025).

© Нечепуренко В.М., Гринберг Г.М., 2025

УДК 621.792

**ИСПЫТАНИЕ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ВИДЕ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ**

М.С. Руденко, А.В. Гирн, А.Е. Михеев, Д.И. Орешкин, А.Ю. Тимошева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: rudenko\_ms@sibsau.ru

*В работе представлены результаты испытаний на сдвиг клеевого соединения в виде тел вращения клеевой пары «Титан-Углепластик». Поверхность титана модифицирована лазерной спиральной текстурой, что увеличило прочность клеевого соединения более чем на 50% относительно механической обработки, это подтверждает эффективность применения данной технологии.*

*Ключевые слова: прочность клеевого соединения, лазерное текстурирование, титановый сплав.*

Развитие ракетно-космической техники требует применения новых материалов и технологий, обеспечивающих безопасность и долговечность конструкций в экстремальных условиях эксплуатации. Одним из ключевых элементов современных космических аппаратов (КА) является клеевое соединение, которое широко используется для соединения композит-металлических конструкций и снижения массы аппарата. Испытания клеевых соединений играют ключевую роль в оценке их прочности, устойчивости к температурным перепадам, вибрациям и другим нагрузкам [1].

В современных космических аппаратах широкое применение находят композиционные материалы, такие как углепластики, благодаря их высокой удельной прочности и жесткости. Многие каркасные и ферменные элементы конструкций КА, включая корпусные панели, силовые элементы и узлы крепления, выполняются с использованием клеевых соединений. Это обусловлено необходимостью обеспечения минимальной массы конструкции, высокой надежности и равномерного распределения нагрузок. Клеевые соединения позволяют эффективно соединять разнородные материалы, такие как углепластик и титан, что особенно важно при создании легких и прочных конструкций.

Титан относится к трудносклеваемым материалам, по причине нахождения на его поверхности тонкой аморфной оксидной пленки, которая не позволяет образовать прочные межатомные и межмолекулярные связи с клеем. Поэтому поверхность титанового сплава необходимо предварительно обработать перед склеиванием, для повышения адгезионных свойств.

Существуют несколько распространенных способов подготовки поверхности для повышения адгезии между клеем и подложкой. Например, механическая обработка, такая как пескоструйная обработка, шлифовка абразивом, является традиционным методом, которая увеличивает шероховатость поверхности, что способствует лучшему сцеплению клея. Эти методы также позволяют удалять с поверхности материала загрязнения и оксидные пленки, которые могут снижать адгезию [2].

Перспективным методом повышением прочности является метод лазерной обработки поверхности металла перед склеиванием [1]. В зоне лазерной обработки создается высокое внутреннее давление плазменного шлейфа, которое выталкивает расплавленный материал от центра фокального пятна, создавая микроканавку. При затвердевании, металл взаимодействует с кислородом из воздуха, образуя кристаллический  $\text{TiO}_2$  (диоксид титана). Этот процесс позволяет повысить адгезию за счет изменения химического состава и структуры поверхности.

В работах [3, 4] представлены результаты исследований прочности клеевых соединений на плоских образцах титанового сплава с модифицированной поверхностью. Однако значительная часть каркасных и ферменных элементов КА представляет собой соединения типа "труба-втулка", где труба выполнена из углепластика, а втулка – из титанового сплава. Для обеспечения высокой адгезии клеевого соединения, в таких конструкциях необходимо применение методов модификации поверхности титанового сплава, в частности, лазерного текстурирования.

Целью настоящего исследования является экспериментальное подтверждение реализуемости технологии лазерного текстурирования поверхности титанового сплава, выполненного в форме тела вращения, для повышения прочности клеевого соединения с углепластиком.

Клеевые соединения, выполненные в виде тела вращения, в реальных эксплуатационных условиях подвергаются комплексным механическим нагрузкам, включающим сдвиговые и крутящие напряжения. Согласно работе [5] текстурирование поверхности металлического образца в виде спиральной текстуры демонстрирует повышенную устойчивость к сдвиговым нагрузкам. Это связано с тем, что спиральная геометрия создает направленную анизотропию поверхности, которая эффективно перераспределяет приложенные сдвиговые напряжения вдоль линии текстуры. В данной работе исследуются две спиральные текстуры с разным шагом  $\delta$  между канавками (рисунок 1а), полученные методом лазерной обработки.

Для создания спиральной текстуры на поверхности металлического образца используется синхронизация двух движений: поступательного перемещения лазерного луча вдоль оси образца и вращательного движения образца, закрепленного на шаговом двигателе. Это позволяет точно контролировать шаг спирали и глубину текстурирования.

В работе реализованы две спиральные текстуры с различными параметрами:

- Первая спиральная текстура (Т1) имеет шаг  $\delta = 250$  мкм;
- Вторая спиральная текстура (Т2) имеет шаг  $\delta = 125$  мкм.

Шаг спирали определяется скоростью  $v$  поступательного движения лазерного луча и частота вращения  $n$  образца (рисунок 1а). Чем выше скорость вращения, при фиксированной скорости поступательного движения, тем меньше шаг спирали.

Для экспериментального исследования изготовлены образцы из титанового сплава ОТ-4, с диаметром 17,8 мм, длина обработанной части составила 15 мм.



Рис. 1. Лазерная обработка поверхности тела вращения

а - схема обработки (1 – зажим шагового двигателя, 2 – источник лазерного излучения, 3 – образец), б – внешний вид образца с спиральной текстурой; в – микроструктура поверхности образца

Лазерная обработка поверхности (рисунок 1б и 1в) проводилась на иттербиевом импульсном волоконном лазере (IPG, YLPM-1- 4×200-20-20) с длиной волны 1,064 мкм, режимы обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1 -Режимы лазерного текстурирования

| Текстура                         | Спиральная (T1) | Спиральная (T2) |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| Мощность лазера, Вт              | 10              |                 |
| Частота вращения, об/мин         | 200             |                 |
| Скорость обработки, мм/с         | 0,852           | 0,568           |
| Длина волны лазера, мкм          | 1,064           |                 |
| Частота следования импульса, кГц | 40              |                 |
| Ширина импульса, нс              | 200             |                 |
| Энергия в импульсе, мДж          | 1               |                 |

Титановые образцы с одинаковой спиральной текстурой клеивались с двух сторон в углепластиковую трубку (длина 180 мм, внутренний диаметр 18 мм, толщина стенки 1,5 мм) на глубину 10 мм. В качестве адгезива использовался трехкомпонентный клей ВК-9 (ОСТ 1-90281-86) на основе эпоксидной и полиамидной смолы. Площадь клеевого контакта  $S = 560 \text{ мм}^2$ . Испытания на сдвиг проводились через 7 дней после склеивания, для полной полимеризации клея на воздухе при комнатной температуре. Для лучшего сцепления между поверхностями к образцам прикладывали статическую нагрузку и фиксировали до полного застывания соединения (рисунок 2б).

Определения прочности клеевого соединения на сдвиг проводили (рисунке 2а) на универсальной разрывной машине (Eurotest T-50, S.A.E.IBERTEST, Испания) со скоростью 5 мм/мин (рисунок 2в).



Рис.2. Испытание клеевого соединения, где: а – принципиальная схема испытаний (1 - неподвижная траверса; 2 - законцовки; 3 - образец; 4 - подвижная траверса), б - внешний вид образцов клеевого соединения, в – образец, установленный в разрывную машину

**Результаты и обсуждения.** Шероховатость обработанной поверхности измеряли профилометром (TR110, TIME Group Inc., Китай). У первой спиральной текстуры T1 шероховатость поверхности составила  $Ra = 4,76 \text{ мкм}$ , у второй текстуры T2 шероховатость составила  $Ra = 6,37 \text{ мкм}$ .



На рисунке 3 представлен график зависимости приложенной нагрузки от перемещения траверсы разрывной машины, отражающий поведение клеевых соединений при механическом нагружении до момента разрушения. Данный график позволяет визуализировать характер деформации и разрушения образцов в зависимости от типа обработки поверхности.

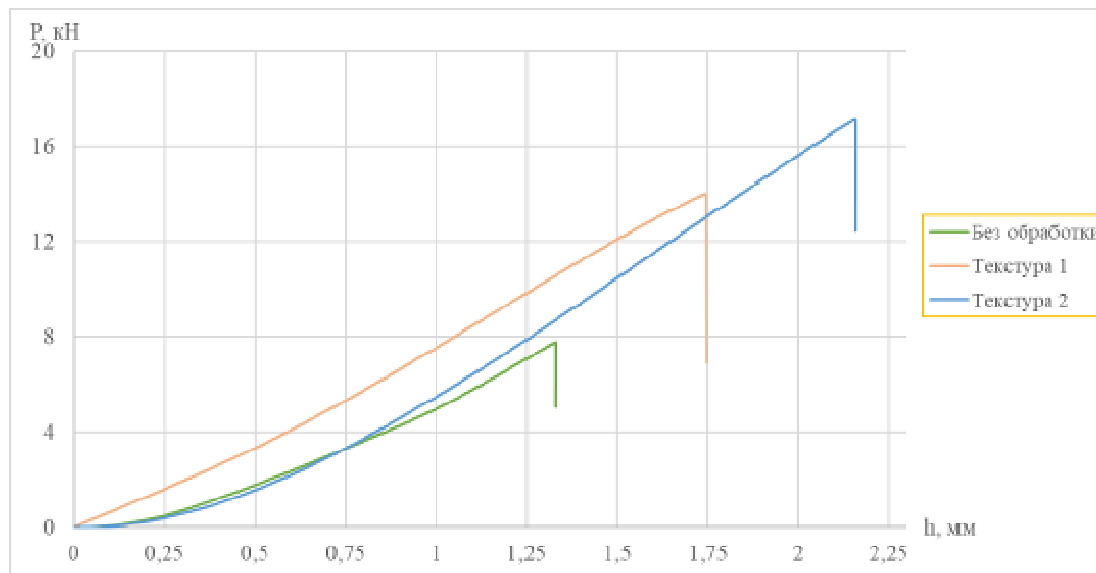


Рис. 3. Зависимость нагрузки от перемещения

Прочность клеевых соединений была определена на основе значения нагрузки, зафиксированной в момент разрушения образца. Эти данные представлены на рисунке 4, где проведено сравнение прочности соединений для различных типов обработки поверхности:

- Плоские образцы клеевого соединения «Титан-Углепластик» без предварительной обработки исследованные в работе [5].
- Образцы, полученные точением при изготовлении, с шероховатостью поверхности  $Ra = 1,8$  мкм.
- Образцы с нанесенными спиральными текстурами T1 и T2.

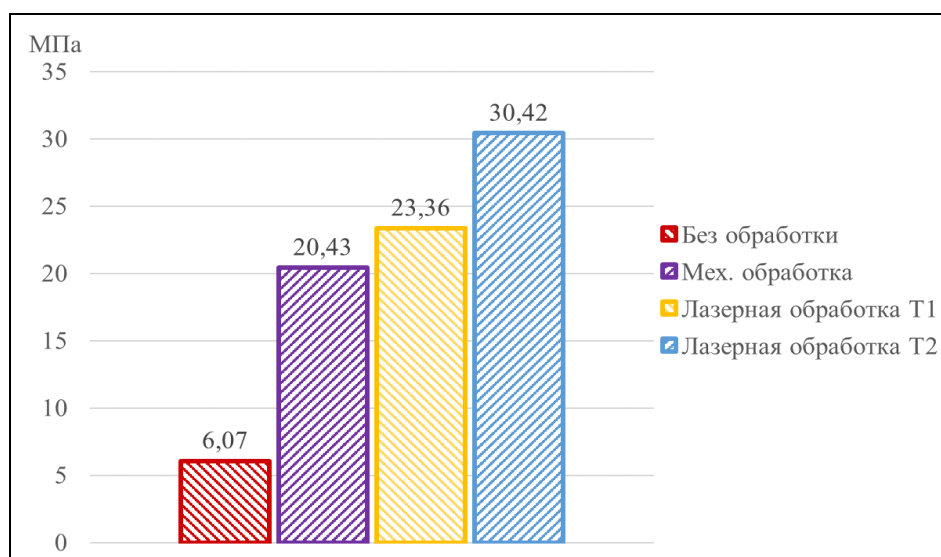


Рис. 4. Прочность клеевого соединения от метода обработки поверхности титанового сплава

Согласно представленной диаграмме, можно сделать выводы о прочности клеевых соединений для различных типов обработки поверхности. Без обработки поверхности титанового сплава, прочность клеевого соединения составляет 6,07 МПа. Это наименьшее значение среди всех рассмотренных вариантов, что связано с низкой адгезией клея к гладкой поверхности, а также наличием оксидных пленок, которые снижают качество сцепления.

При лазерной обработке Т1 прочность соединения достигает 23,36 МПа. Лазерное текстурирование обеспечивает более высокую прочность по сравнению с механической обработкой 20,43 МПа, благодаря созданию контролируемого микрорельефа, который увеличивает площадь контакта и улучшает механическое зацепление.

Прочность клеевого соединения текстуры Т2 максимальна и составляет 30,42 МПа. Спиральная текстура демонстрирует наилучшие результаты, что подтверждает эффективность лазерного текстурирования для повышения адгезионных свойств поверхности. При сравнении лазерное текстурирование повысило прочность клеевого соединения относительно механической обработки приблизительно на 50%. Более высокая шероховатость способствует увеличению площади контакта и усилению механического зацепления, что приводит к значительному повышению прочности соединения.

**Заключение.** Результаты испытаний демонстрирует, что лазерное текстурирование поверхности, особенно с более высокой шероховатостью поверхности, является наиболее эффективным методом повышения прочности клеевых соединений. Результаты испытаний подтверждают, что лазерное текстурирование может успешно применено для обработки поверхностей сложной геометрии, что делает его перспективным методом для улучшения адгезионных свойств в элементах КА.

### Библиографические ссылки

1. Junying Min, Hailang Wan, Blair E. Carlson, Jianping Lin, Chengcheng Sun. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review / Optics and Laser Technology. 2020. V. 128, 106188, DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106188
2. Сибилева С. В., Каримова С. А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 25–35.
3. Гирн А. В., Руденко М. С., Тайгин В. Б., Михеев А. Е., Раводина Д. В. Влияние лазерной обработки поверхности титановых образцов на адгезионную прочность клеевых соединений // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6. № 2. С. 90-99. DOI: 10.26732/j.st.2022.2.03
4. Руденко М.С., Гирн А.В., Михеев А.Е., Тайгин В.Б. Лазерная обработка титановых сплавов для увеличения прочности клеевого соединения с углепластиком / Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1, С. 188-194. – DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-188-194.
5. Руденко М.С., Гирн А.В., Михеев А.Е., Тайгин В.Б. Испытание на термоциклирование клеевого соединения «титан – углепластик», полученного с применением технологии лазерного текстурирования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 4. С. 155-166. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-155-166

© Руденко М.С., Гирн А.В., Михеев А.Е., Орешкин Д.И., Тимошева А.Ю. 2025

## ИЗ ОПЫТА НАЗЕМНОЙ ПОДГОТОВКИ СИСТЕМ ВЗАИМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ «КУРС» КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ К ПОЛЕТУ

М. Д. Евтифьев

Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

Е-mail: [emd1958@mail.ru](mailto:emd1958@mail.ru)

*По открытым материалам из литературы и воспоминаниям автора проводится анализ наземной подготовки системы взаимных измерений «Курс» кораблей «Союз-ТМ» и «Прогресс». Во время наземной подготовки по этой системе подтверждались правильность принятых технических решений по изменениям в ее конструкции, которые были осуществлены с целью повысить надежность сближений и стыковки кораблей со станцией «Мир» и в последствии МКС.*

*Ключевые слова: аппаратура системы «Курс», антенны, испытания, наземная подготовка, космический корабль, орбитальная станция, безэховая камера,*

Немного о предыстории моего перемещения на курирование испытаний системы «Курс». Несколько информации по размещению этой системы на кораблях и станции «Мир».

В 1989 году по традиции испытательных отделов, каждый специалист распределялся по системам и в отделе, где я работал по теме орбитального корабля (ОК) 11Ф35 «Буран» в том числе. Мне досталась система взаимных измерений (СВИ) «Курс-35» для ОК [1].

Надо сказать, что после полета «Бурана» мы готовы были свернуть горы [2].

Шла подготовка к сближению и стыковки ОК со станцией «Мир» и космическим пилотируемым кораблем (КПК) «Союз-ТМ» №101 (11Ф732 №101, «Союз-спасатель»), а также с другим «Бураном». На всех этих объектах стоял андрогинно-периферийный агрегат стыковки (АПАС-89) [1].

В связи с этим мне пришлось участвовать в совещаниях у ведущих конструкторов по согласованию режимов работы этой системы. Все было в наших силах и возможностях и эту глыбу мы бы свернули.

«Курс» – радиотехническая система взаимных измерений параметров движения для поиска, сближения и стыковки КК с орбитальной станцией. Эта система пришла 1986 году на смену ненадежной системе «Игла». Разрабатывать систему «Курс» начали еще в 1979 году. Ее разработчиком является научно-исследовательский институт точных приборов («НИИ ТП») начальником, которого в то время был Моргулев А.С.. Производилась аппаратура системы на Киевском радиозаводе (ныне ПАО «Элмиз»).

Система «Курс» состоит из аппаратуры «активного» КК, который производит все необходимые манёвры, и аппаратуры «пассивного» орбитальная станция (ОС), положение которой не управляется этой системой. Изначально аппаратура активного корабля именовалась 17Р64 «Курс-А», а ОС 17Р65 «Курс-П» (рис.1, 2) [3].



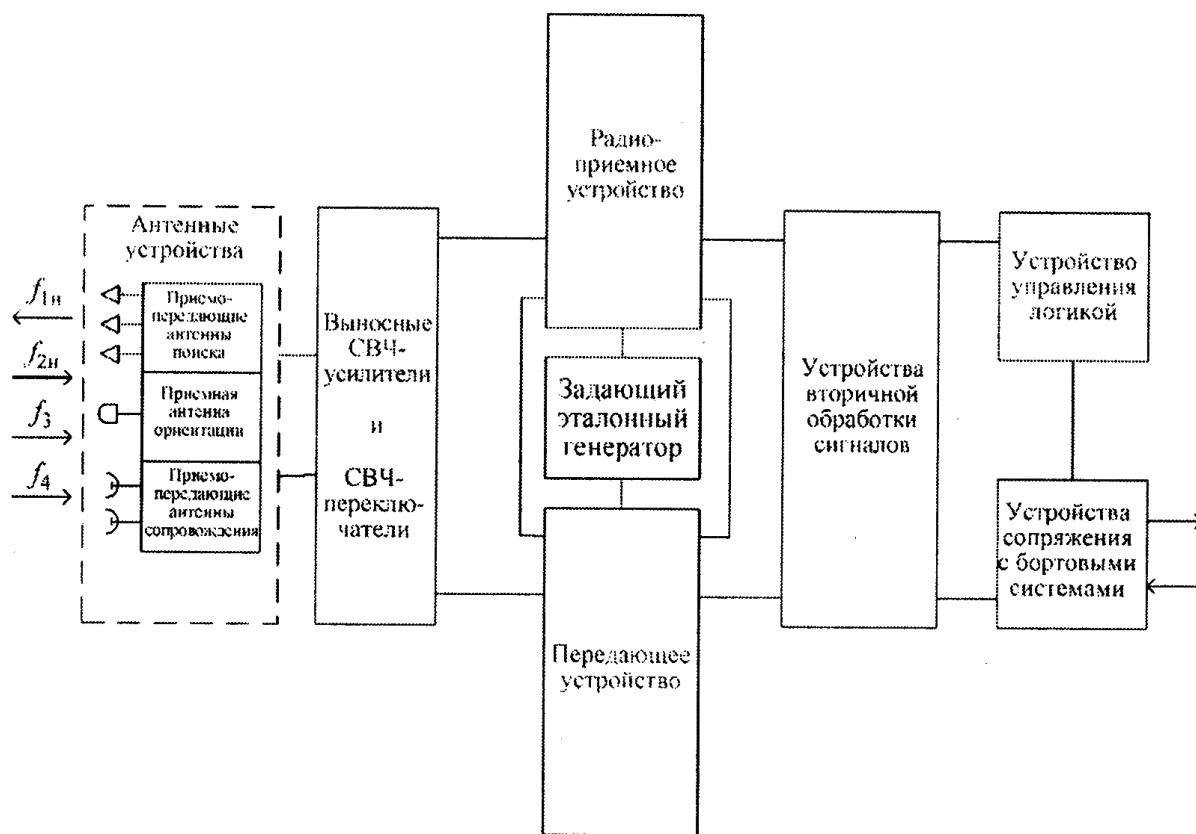


Рис. 1. Структурная схема аппаратуры «Курс-А» [3]

Главными особенностями системы «Курс» относительно системы «Игла» стали отсутствие необходимости в развороте орбитальной станции, резервирование аппаратуры для повышения надежности, системы встроенного тест-контроля, измерение дальности и скорости на обоих объектах, большие диапазоны измеряемых параметров, высокая точность, выдача необходимой информации для облёта.

Система «Курс» обладала не только высокими характеристиками измерений параметров относительного движения космических аппаратов (КА), но и достаточно высокой степенью надежности. В отличие от системы сближения «Игла» (измерительный канал работал с 20 км), измерения системы «Курс» могут использоваться системой управления с дальности 400 км.

Аппаратура «Курс» для подготовки к полету имела комплекс контрольно-испытательной аппаратуры, включавший в себя управляющий вычислительный комплекс на базе УВМ СМ-2М, имитаторы дальности, скорости, системы управления, углов и угловой скорости, уникальный стенд с двумя безэховыми камерами и камерами тепловидения.

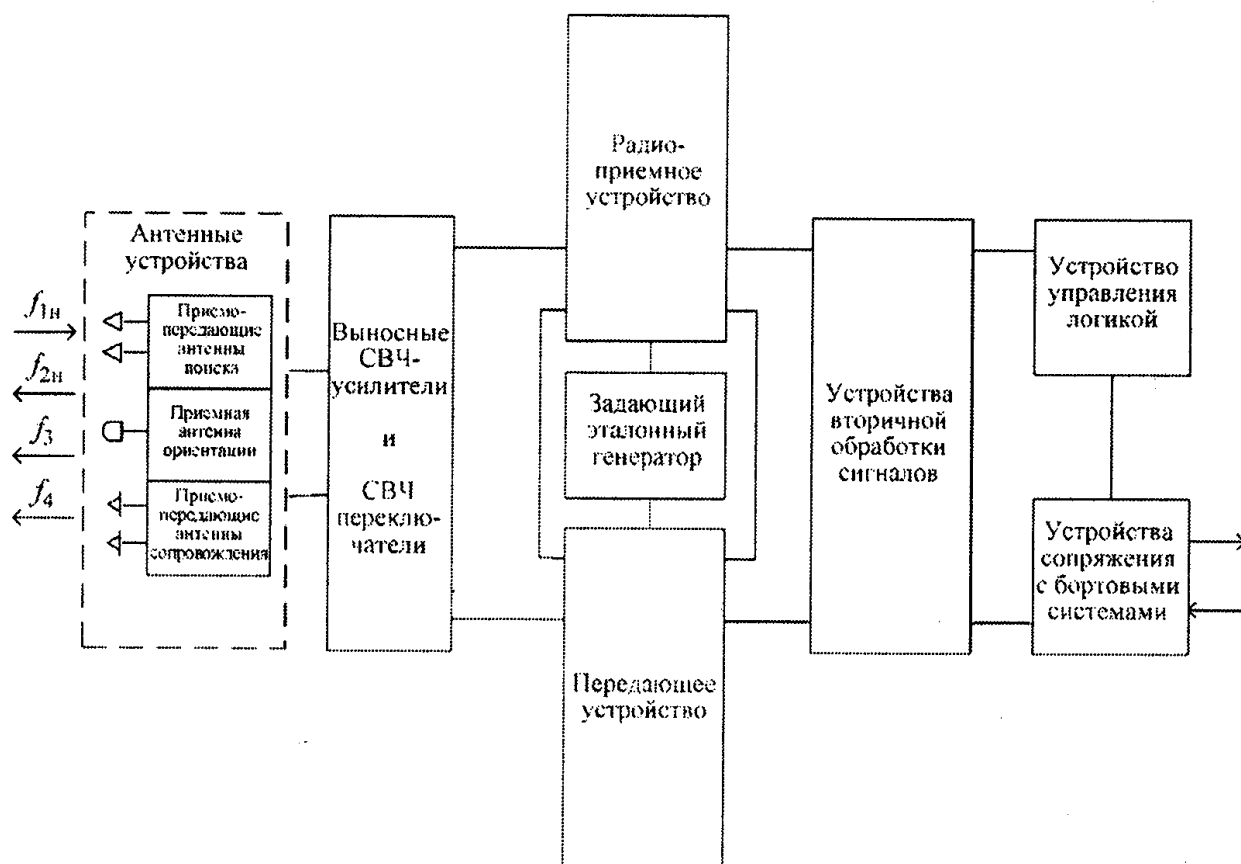


Рис.2. Структурная схема аппаратуры «Курс-П» [3]

И еще отмечу не маловажную деталь, что система «Курс» относится к сложным системам, имеющим свою логику работы.

Впервые система «Курс» была применена при стыковке КПК «Союз-ТМ-1» (11Ф732А51 № 51, Союз 7К-СТМ №51), а затем космического грузового корабля (КГК) «Прогресс-М1» (11Ф615А55 №201 с модифицированной аппаратурой 17Р64-03 системы «Курс») со станцией «Мир» 23 мая 1986 года и 25 августа 1989 году соответственно [1, 4].

На базе системы «Курс» была создана система «Курс-35» для ОК «Буран», которая включала в себя активный и пассивный комплекты аппаратуры «Курс», а также оптический канал 17Р616Э «Курс-О», который должен был обеспечивать причаливание на последних 30 метрах.

Вот этой системой мне и предстояло заняться и я приступил к ее кропотливому изучению уже в январе 1989 г.

Пришлось выезжать на предприятия – разработчики: системы управления научно-исследовательский институт автоматики и приборостроения (НИИАП, ныне АО «НПЦАП») и системы «Курс-35» НИИ ТП.

Во время моего участия по этой теме НИИАП руководил Лапыгин В.Л., а НИИ ТП - Сусленников В.В.

И на этом этапе пришлось столкнуться с некоторыми ошибками. Во время изучения электрических схем и схем размещения антенн системы «Курс» на ОК «Буран» выяснилось, что провода, по которым шли сигналы, для включения прогревающих элементов антенн, не доходили до нужного места. Вот как полезно изучать технику перед тем как с ней проводить испытания.

В начале лета 1989 г. с ОК «Буран» начинается какая-то неопределенность, а тему по системе «Курс-35» передают в другое подразделение научно-производственного объединения (НПО «Энергия», ныне РКК «Энергия» им. С.П. Королева). По этой причине я не стал долго думать и в августе перешел за этой темой в другое отделение и отдел, который занимался системами управления и в том числе системой «Курс» для КПК «Союз-ТМ», КГК «Прогресс-М» и ОС «Мир» (ее модулей).

Теперь мне приходилось заниматься системой «Курс» не только для ОК «Буран», но и для «Союзов», «Прогрессов» и станции «Мир».

Надо сказать, что я делал и защищал дипломный проект в феврале 1986 года по теме «Транспортный космический корабль» на НПО «Энергия» и естественно знакомился с конструкцией корабля «Союз-Т», следующая модификация которого является «Союз-ТМ», в связи с этим я имел некоторое представление о нем.

Аппаратура системы «Курс-А» находится в бытовом отсеке КПК «Союз-ТМ». На рис. 3 представлена схема размещения антенн аппаратуры «Курс-А» на КПК «Союз-ТМ».

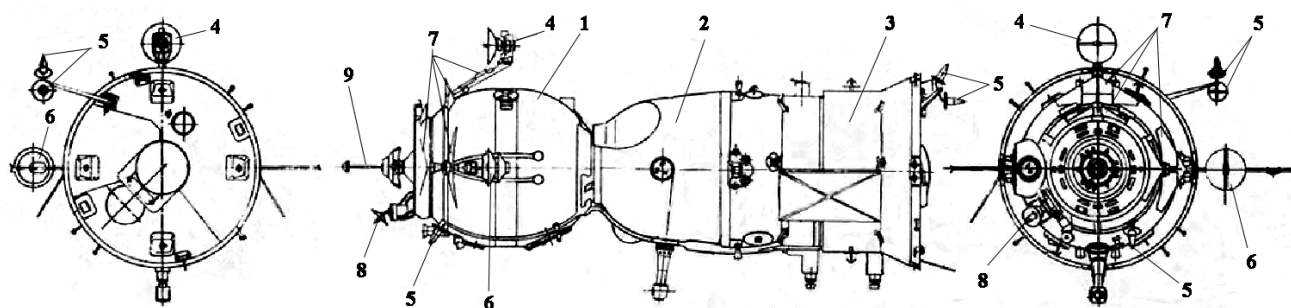


Рис. 3. Схема размещения антенн аппаратуры «Курс-А» на КПК «Союз-ТМ»:

1 – бытовой отсек (БО); 2 – спускаемый аппарат (СА); 3 – приборно-агрегатный отсек (ПАО); 4 – антенна автосопровождения; 5 – всенаправленные антенны; 6 – узконаправленная антенна; 7 – экран радиотехнической защиты антенн; 8 – антенна ориентации; 9 – стыковочный агрегат

Работа по системе «Курс» заключалась в написании программ методик, инструкций и участии в испытаниях как на контрольно-испытательной станции (КИС) НПО «Энергия», так и космодроме на технической позиции (ТП-2Т, в монтажно-испытательном корпусе (МИК) по закрытому каналу, а также в корпусе ЭХО-3 на подвижной в трех степенях свободы платформе по открытому каналу).

Отметим что в процессе отработки и испытаний бортовой аппаратуры «Курс» были апробированы многие передовые методы, которые позволили в дальнейшем оптимизировать процесс ее испытаний. Начиная с аппаратуры «Курс-А» для КПК «Союз-ТМ-3» время наработки в процессе подготовки и испытаний в БЭК «Эхо-3» уменьшилось с около 36 часов на КПК «Союз-ТМ-2 до 9 часов. Это дало значительно сократить ресурс бортовой аппаратуры при наземной отработке на ТП-2Т без ущерба качеству испытаний.

Первое с чего я начал - разработка программы методики послеполетного обслуживания системы «Курс-35» ОК «Буран» на космодроме. В это обслуживание входили внешний осмотр и проверки работоспособности системы с целью предъявления ее на испытания с подтверждением готовности к последующим полетам. Такая программа

методика была мной разработана. Кроме этого для стыковок ОК «Буран» и «Союз-ТМ» №101 со станцией мир потребовался стыковочный модуль (СМ, в последствии он использовался для стыковок со «Спейс Шаттлом»), а для него необходим был комплект кабелей к разъемам антенн от аппаратуры системы «Курс-П», находящейся на станции «Мир». В первую очередь нужны были схемы прокладки этих кабелей. Необходимо было написать инструкцию с порядком действия космонавтов после стыковки модуля к станции «Мир». Все это согласовывалось с предприятием-изготовителем СМ и представителем заказчика. Этим всем мне пришлось и заниматься. А результат моей работы по теме «Буран» все могли видеть во время стыковок «Спейс-Шаттла» со станцией «Мир» (к этому времени станция превратилась уже в целый орбитальный комплекс).

Параллельно с работами указанными выше я ходил на испытания систем «Курс» космических кораблей «Союз-ТМ» и «Прогресс-М» набирался опыта. После испытаний по результатам их занимался коррекцией инструкций операторам от завода (завода экспериментального машиностроения (ЗЭМ)) и военной части космодрома. Эти изменения инструкций согласовывались со всеми участниками. В испытаниях этой системы на заводе-изготовителе космического корабля принимали участие разработчики системы, представитель центрального конструкторского бюро экспериментального машиностроения (ЦКБЭМ, т.е. мы разработчики документации для испытаний), оператор от ЗЭМ и представитель заказчика. На космодроме в процессе испытаний системы участвовали: военный оператор от военной части, разработчик системы и мы.

После испытаний появлялись разного рода замечания и даже такие как разовый сбой. Приходилось выявлять и другие нарушения в работе аппаратуры «Курс». Контроль и испытания проводились с пульта управления. Проводились проверочные включения и комплексные испытания. В то время автоматизированный испытательный комплекс был применен только для испытаний на КС-35 и на космодроме для штатного «Бурана» [2].

По результатам испытаний я посылал на Байконур ВЧ-грамму с содержанием: «аппаратура системы «Курс» соответствующего корабля прошла штатно испытания и пожаровзрывобезопасна».

Первый раз с ознакомительной поездкой на Байконур по испытаниям системы «Курс» я выехал в декабре 1990 года.

Летом 1991 г. и 1992 г. уже у меня были самостоятельные поездки на месяц. Я полноправно участвовал в испытаниях аппаратуры системы «Курс».

Конечным результатом наземной подготовки системы «Курс» и корабля в целом, а также работы экипажей в космосе должен был стать доклад о касании корабля со станцией.

Вообще это работа была связана с большой ответственностью не только за космические корабли и орбитальную станцию, но и за жизнь членов экипажей. Оно и понятно неправильные сближения и касания могли привести к катастрофе.

И это не простые слова, они основываются на практике полета станции «Мир». Произошло много различных ситуаций, которые ставили под угрозу не только выполнение задач программы полета, но и жизнь членов экипажа.

Вот одна из ситуаций, которая коснулась автора: 26 января 1991 года космонавты Виктор Афанасьев и Муса Манаров выполнили третий выход на поверхность станции. На торце модуля «Квант» они поставили новые угловые отражатели для лазерных дальномеров КПК «Союз ТМ». При этом был погнут вращающийся отражатель («зеркало»,

тонкий алюминиевый отражатель антенны диаметром 23 см) антенны ЗАО-ВКА системы «Курс», о чем космонавты не доложили в ЦУП [1, 4].

19 марта 1991 г. с Байконура стартовал КГК «Прогресс М-7», а 21 марта он подходил к станции. На расстоянии около 500 м на корабле автоматически отключился режим сближения, а двигатели сработали на «увод». В ЦУПе решили, что траектория подхода корабля к «Кванту» отклонилась от расчетной в результате нарушения центровки «Прогресса» при укладке в него грузов. Было решено слегка расширить допустимый «коридор» для подхода корабля. 23 марта была предпринята вторая попытка. Однако на дальности несколько десятков метров на экране в ЦУПе стало видно, как стыковочный узел корабля начал подозрительно уходить в сторону и чуть не ударился в борт станции. В последний момент на Земле успели выдать команду на КГК «Прогресс М-7» и он пролетел под станцией «Мир» на очень близком расстоянии. Существовало опасение, что антенны корабля могли зацепить за станцию. Было решено произвести перестыковку «Союза ТМ-11» (11Ф732 № 61) с переходного отсека (ПхО) базового блока станции «Мир» на модуль «Квант» [1, 4].

26 марта В. Афанасьев и М. Манаров отчалили от «Мира» и, облетев его, начали подход к стыковочному узлу Кванта и на передаваемом с камеры «Союза ТМ-11» изображении в ЦУПе увидели, что одна из антенн «Курса» на «Кванте» как бы погнута и вращается с трудом. Из-за этого стыковка была невозможно. Экипажу было приказано проводить причаливание с использованием основного («Курс») и резервного («Прогноз») комплектов. «Прогноз» позволял при отсутствии угловых данных от «Курса» путем расчетов спрогнозировать движение корабля и привести его к цели [1, 4].

28 марта «Прогресс М-7» все же причалил к ПхО станции. С 13 апреля космонавты начали готовиться к вне плановому выходу для осмотра поврежденной антенны с целью возможного исправления отражателя антенн. Выход состоялся в ночь с 25 на 26 апреля. Манаров дошел до торца «Кванта» к антенне и доложил, что отражателя на антенне нет. Он снял остатки антенны на фото и видео, подробно описал для Земли каждый из оставшихся болтиков и подходы к ним.

Что касается участия автора в данных перипетиях, это то, что мне пришлось писать и согласовывать техническое решение и инструкцию для подготовки новой антенны ЗАО-ВКА к отправке на космодром и в конечном итоге на станцию «Мир» с целью замены поврежденной антенны. Я же присутствовал при проверке антенны в КИС НПО «Энергия». Все это было выполнено.

1 июня 1991 г., успешно причаливший КГК «Прогресс М-8» к ПхО станции «Мир», привез новую антенну для модуля «Квант», которую 25 июня космонавты Анатолий Арцебарский и Сергей Крикалев установили с помощью специального инструмента на место, демонтированной антенны, во время выхода в космос [4].

А вот такой случай, говорящих об важности резервирования аппаратуры системы «Курс». На «Союзе ТМ-15», стартовавшем 27 июля 1992 года, на орбиту отправились Анатолий Соловьев, Сергей Авдеев и Мишель Тонини. Сразу после отделения корабля при тестировании бортовых систем был выявлен отказ системы сближения и стыковки «Курс». Стыковка с «Миром» оказалась бы под угрозой, если бы не второй комплект «Курса», который работал без сбоев и 29 июля корабль причалил к ПхО станции [1, 4].

В связи с сокращением финансирования в 1992 году произошел отказ полета ОК «Буран» и все работы по этой теме начали останавливать. По другим изделиям работы продолжались и мне не приходилось просиживать на одном месте.

### **Выводы**

1. Система взаимных измерений «Курс» сложная радиотехническая система со своей логикой работы, поэтому приходилось ее кропотливо испытывать.

2. По теме «Бурана» фактически все было готово ко второму полету и осуществлению стыковок с «Союзом-спасителем» и станцией «Мир», однако сокращение финансирования в 1992 г. привело к отказу от полетов «Бурана».

3. Испытания системы «Курс» проходили не совсем гладко, однако с замечаниями успешно справлялись.

4. Как и сама система «Курс» так и ее наземная проверочная аппаратура совершенствовались без ущерба для надежности.

5. Сократилось в 4 раза время наземной подготовки и испытаний системы.

### **Библиографические ссылки**

1. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева / Гл. ред. Ю.П. Семенов. – Королев Моск. обл.: РКК «Энергия». – 1996. – 672 с.

2. Электрические испытания орбитального корабля «Буран». Как это было / М.Д. Евтифьев // ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск 26-28 февраля 2022 г. Под общ. ред. В.П. Назарова. – СибГУ им. М.Ф. Решетнёва. Красноярск, 2020. – С.84-97.

3. Машиностроение. Энциклопедия / Ред совет: К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Ракетно-космическая техника. Т. IV+22 / И.П. Абрамов, И.В. Алдашкин, Э.В. Алексеев и др.; под ред. В.П. Легостаева. В 2 кн. Кн. 2. Ч. II. 2014. – С. 147-152.

4. Мировая пилотируемая космонавтика. История. Техника. Люди И.Б.Афанасьев, Ю.М.Батулин, А.Г.Белозерский и др. Под ред. Ю.М.Батулина Авт. вступ. ст. Ю.М.Батулин и Б.Е.Черток М.: Издательство «РТСофт», 2005. – 752 с.

Евтифьев М. Д., ©

## ИСПЫТАНИЯ ГАЗОВЫХ РУЛЕЙ

О. В. Крашенинникова\*, В.Г. Сидоров

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: olesya.krash@mail.ru

*В данной статье рассматривается моделирование направляющих для хвостовой части ракеты. Описывается процесс создания моделей, учитывающих физические параметры и условия эксплуатации данного элемента ракеты. Кроме того, приводятся различные варианты конструкции направляющих и их влияние на общую аэродинамику и устойчивость ракеты. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации проектирования и повышения эффективности ракетных систем.*

*Ключевые слова: проект, направляющие, модель, хвостовая часть ракеты, 3D-моделирование, летательный аппарат.*

Моделирование направляющих для хвостовой части ракеты является актуальной задачей, поскольку правильно спроектированные направляющие обеспечивают стабильность и управляемость ракеты во время полета. Они также могут улучшить аэродинамические характеристики и снизить аэродинамические потери.

С помощью современных методов и технологий моделирования, таких как компьютерное моделирование и численное моделирование, можно оптимизировать форму и расположение направляющих для достижения наилучших результатов. Моделирование и реализация моделей в макеты с помощью аддитивных технологий [1] позволяют учитывать различные факторы, такие как аэродинамические нагрузки, углы атаки и углы скольжения, а также другие параметры, влияющие на поведение ракеты в полете.

Создание макета направляющих для хвостовой части ракеты и их испытания необходимы в образовательных целях [2]. Рассматриваемые макеты будут использоваться для реализации проекта создания стенда, на котором студенты кафедры систем автоматического управления будут отрабатывать знания, полученные на лекционных занятиях [3].

Для моделирования направляющих для хвостовой части ракеты можно использовать различные программы CAD (Computer-Aided Design), такие как:

- SolidWorks. САПР для организации производства, которая предлагает инструменты для проектирования деталей, механизмов, электросетей и других конструкций;
- КОМПАС-3D. Российская система параметрического моделирования деталей и сборок, используемая в сфере машиностроения, приборостроения и строительства;
- T-FLEX CAD. Российская программа для проектирования, основанная на параметрическом моделировании. Содержит профессиональные инструменты для создания параметрических моделей и чертежей, оптимизации, анализа изделий;
- и другие.

Направляющие ракеты обычно имеет треугольный вид. Такая форма обеспечивает устойчивость и точность полета ракеты, а также уменьшает аэродинамическое сопротивление. Для испытаний было смоделировано несколько видов направляющих с разным углом и толщиной. На рисунке 1 представлены модели, имеющие габаритные показатели 41,84x12,98x30 мм и 42,19x12,98x40 мм и отверстием под крепление на сервопривод Tower Pro Micro Servo 9g SG90 [4].

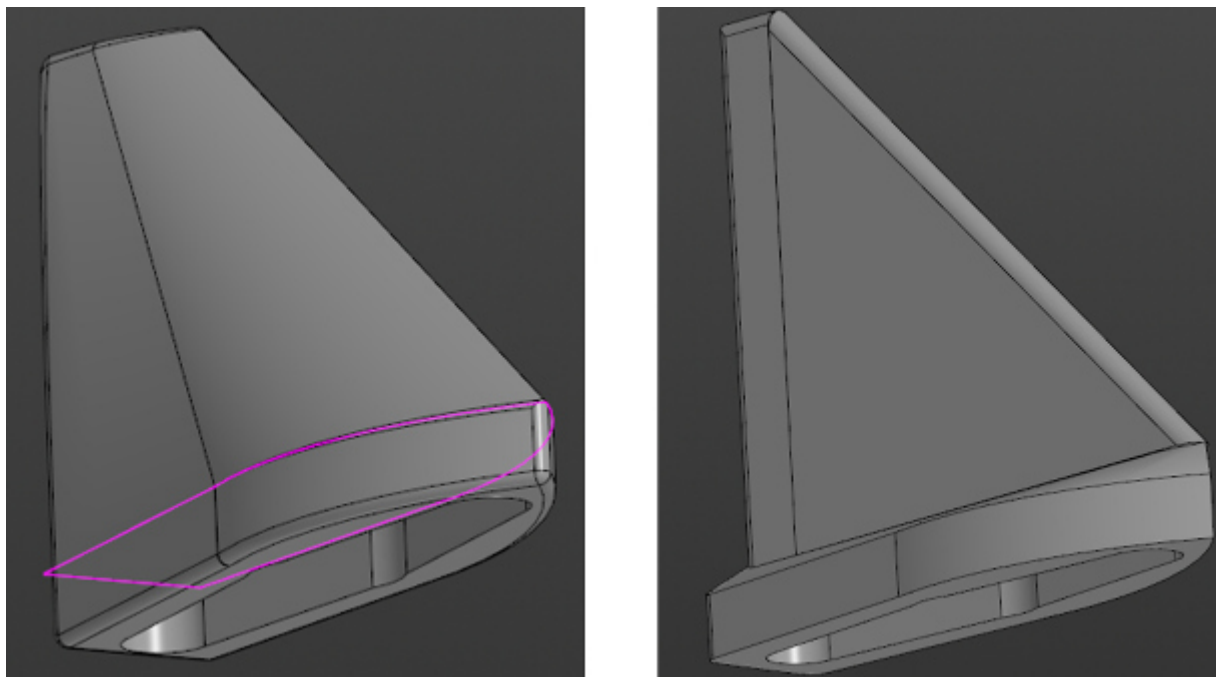


Рис. 1 – Модели направляющих хвостовой части ракеты

После завершения моделирования направляющих файлы с моделями были переконвертированы в STL формат и нарезаны с помощью программы PrusaSlicer, предназначенной для экспорта моделей в G-код, который необходим для печати макетов на 3D-принтере.

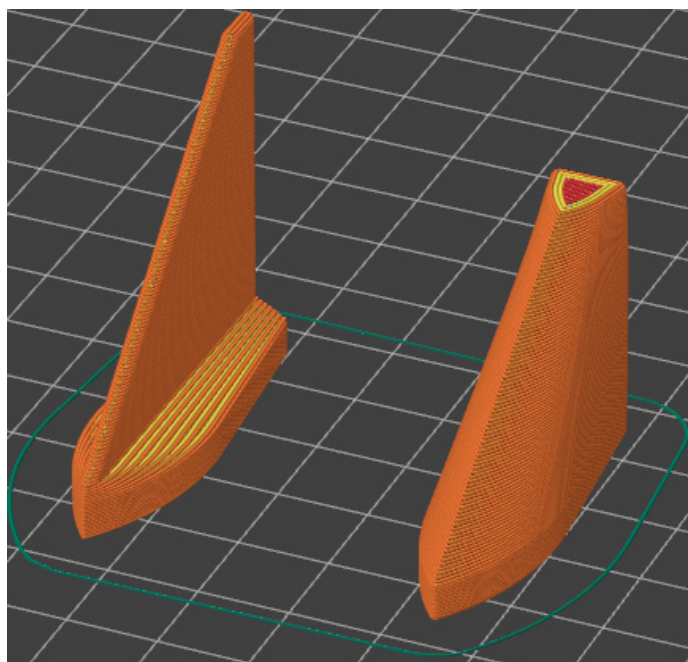


Рис. 2 – Нарезка направляющих хвостовой части ракеты

Результат печати макетов направляющих представлен на рисунке 3.





Рис. 3 – Нарезка направляющих хвостовой части ракеты

Методика испытаний:

- настроить пульт на одновременный поворот сервоприводов на определенный градус в противофазе;
- подключить сервоприводы к пульту управления через Bluetooth-модуль;
- закрепить направляющие на выбранном сервоприводе. В случае несовпадения размеров пересчитать усадку пластика на принтере и перепечатать макет;
- установить сервоприводы с направляющими на хвостовой части ракеты;
- закрепить хвостовую часть ракеты на специальном стенде с гироскопическим эффектом – удержание оси вращения объекта в пространстве, который позволяет совершать движение в трех плоскостях (рисунок 4);



Рис. 4 – Стенд с гироскопическим эффектом

- установить на хвостовой части ракеты датчики угла поворота;
- привести мотор в действие с помощью дистанционного пульта управления, изображенного на рисунке 5.
- постепенно изменяя угол поворота сервоприводов, записать данные, считываемые датчиками угла поворота;
- по завершении испытаний проводится анализ полученных данных для оценки аэродинамических качеств;
- по результатам анализа принимаются решения о дальнейших модификациях формы направляющих.

Схема для проведения испытаний представлена на рисунке 5.

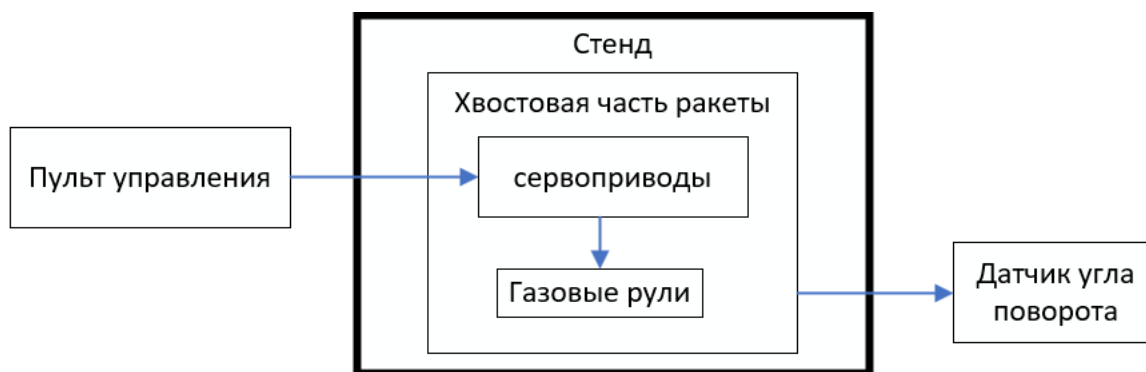


Рис. 5 – Схема испытаний направляющих для хвостовой части ракеты

В процессе испытаний было выявлено, что слишком тонкие направляющие подвергались вибрации от потока воздуха, создаваемого пропеллером, а слишком широкие были менее эффективные для поворотов, так как меньше захватывали поток воздуха.

### Библиографические ссылки

1. Аддитивные технологии и их возможности [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/futurology/6284222d9a79472c8b9a67bc> (дата обращения 05.02.2025).
2. Крашенинникова, О. В., В. Г. Сидоров. Применение 3D-моделей в педагогической практике технических вузов // XVII Королёвские чтения: Материалы Всероссийской молодёжной научной конференции с международным участием, посвящённой 35-летию со дня первого полёта МТКС "Энергия -Буран". В 2-х томах, Самара, 03–05 октября 2023 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 195-196. – EDN PHUBJQ.
3. Твёрдотельное моделирование каркаса хвостовой части ракеты в cad-системе компас-3D / Крашенинникова О.В., Сидоров В.Г. // журнал «Наука и бизнес: пути развития», 2024 №10 (160). С. 40–43.
4. MG90S Servo, Микро сервопривод, металлический редуктор, 2.8кг.см/6В [Электронный ресурс]. URL: [https://www.chipdip.ru/product/mg90s-servo?utm\\_source=direct&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=Y\\_tovarnaya\\_key\\_products&utm\\_content=text1\\_ya&utm\\_term=---autotargeting&yclid=5191636034409725951](https://www.chipdip.ru/product/mg90s-servo?utm_source=direct&utm_medium=cpc&utm_campaign=Y_tovarnaya_key_products&utm_content=text1_ya&utm_term=---autotargeting&yclid=5191636034409725951) (дата обращения 06.02.2025).

© О. В. Крашенинникова, В.Г. Сидоров 2025

## МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПОЗИТНОЙ СПИЦЫ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ ЗОНТИЧНОЙ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М.А. Рутковская\*, А.В. Лопатин

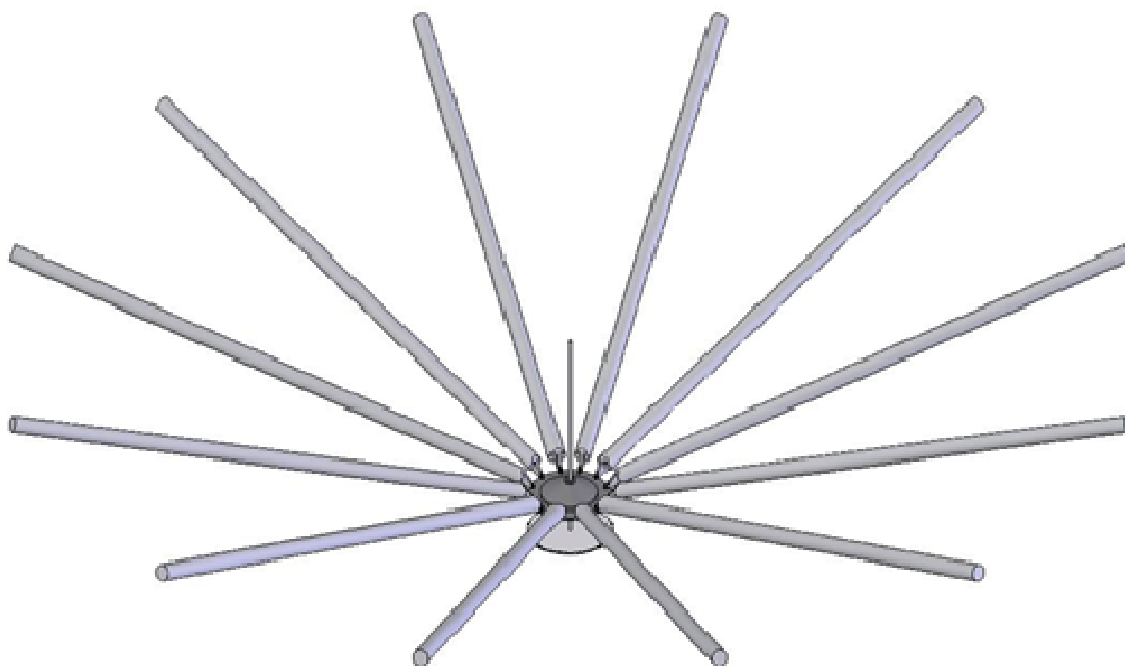
Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*e-mail: [rutkovskaya@sibsau.ru](mailto:rutkovskaya@sibsau.ru)

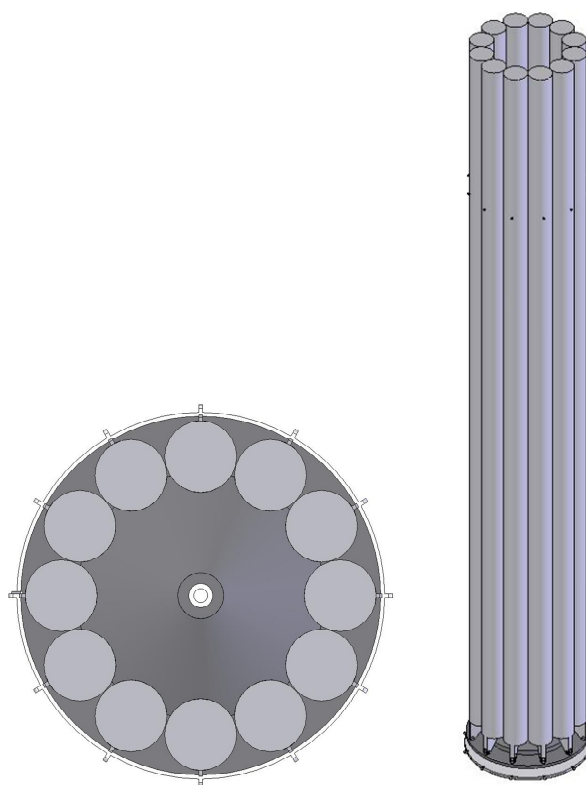
*Авторами данной работы проведен модальный анализ сплошной композитной спицы трансформируемой зонтичной антенны космического аппарата. Были получены аналитические формулы, которые учитывают деформации поперечного сдвига и инерцию поворота поперечного сечения.*

*Ключевые слова:* зонтичная антенна, композитная спица, модальный анализ.

Среди трансформируемых космических антенн заметное распространение получили зонтичные антенны, состоящие из сетеполотна и радиальных спиц [1-3]. Одним концом радиальные спицы прикрепляются к центральной ступице антенны. Перед установкой на космический аппарат антенна складывается в стартовое положение. Прямолинейные спицы без сетеполотна и вантовой системы в развернутом положении показаны на рисунке 1а, а в собранном на рисунке 1б.



а



б

Рисунок 1 - Зонтичная антенна с прямолинейными спицами  
а - в развернутом положении; б - в стартовом положении

Конструкция спицы должна удовлетворять противоречивым требованиям обеспечения значительной жесткости при ограниченной массе, а также сравнительно невысокой стоимости и технологичности изготовления. Этим требованиям в наибольшей степени отвечает тонкостенная спица с круглым поперечным сечением (рисунок 1а, б) которая изготавливается методом автоматической намотки из однонаправленного композиционного материала. Одним из составляющих проектирования такой композитной тонкостенной спицы является модальный анализ. Он позволяет оценить жесткость конструкции и при необходимости помочь в определении мест крепления к спице штанг, используемых при раскрытии антенны. Расчетной моделью спицы, учитывая ее значительное удлинение, является тонкостенный ортотропный стержень, один край которого жестко закреплен, а другой свободен.

Рассматривается консольная тонкостенная спица с круглым поперечным сечением (рисунок 2). Ось спицы связана с продольной координатой  $x$ , отсчитываемой от точки крепления. Длина спицы  $l$ , радиус поперечного сечения  $r$  и толщина стенки  $h$  (рисунок 3).

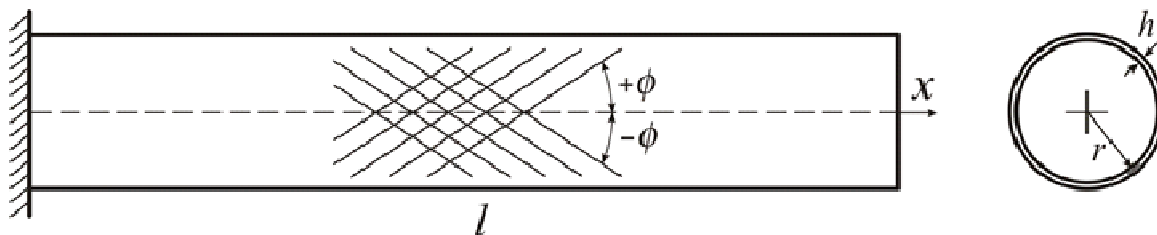


Рисунок 2 - Консольная тонкостенная спица с круглым поперечным сечением

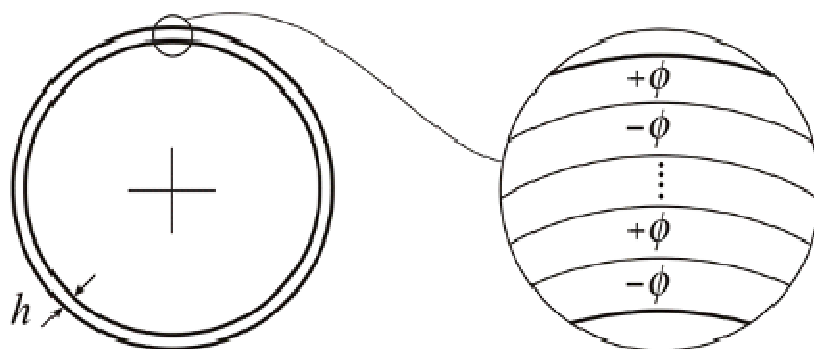


Рисунок 3 - Сечение тонкостенной спицы с круглым поперечным сечением

Решена задача определения собственных частот колебаний консольного тонкостенного ортотропного стержня с круглым поперечным сечением. Этот стержень является расчетной моделью спицы большой космической антенны зонтичного типа. Уравнения, описывающие движение спицы, учитывают деформации поперечного сдвига и инерцию поворота поперечного сечения. Входящие в эти уравнения изгибная и сдвиговая жесткости спицы зависят от радиуса поперечного сечения, упругих параметров однонаправленного композиционного материала и угла армирования. Для удобства анализа уравнения движения преобразованы к уравнениям с безразмерными коэффициентами. Решение этих уравнений было получено в аналитическом виде. Показано, что задача вычисления частоты колебаний спицы сводится к определению безразмерного частотного параметра. Значения частотного параметра получаются из решения трансцендентного уравнения. Был выполнен анализ влияния удлинения спицы и угла армирования на величину частотного параметра.

### Библиографические ссылки

1. Гуляев В.И., Лизунов П.П., Гром А.А., Кравченко С.Г., Мирчевский А.В. Динамика крупногабаритных космических отражателей при сложных режимах движения // Материалы Международной конференции по крупногабаритным космическим конструкциям НПО «Энергия». – Новгород, 1993. – С. 35.
2. Соколов А.Г., Гвамичава А.С. Решения инженерных конструкций космических радиотелескопов // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. – М.: Радио и связь, 1981. – Вып. 29. – С. 2-10.
3. Охоткин К. Г., А. Ю. Власов, Ю. В. Захаров и др. Аналитическое моделирование гибкого обода рефлекторов космических антенн// Журнал «Прикладная механика и техническая физика». 2017. Т. 58, N 5. С. 190–200.

© Рутковская М. А., Лопатин А. В. 2025

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ  
С РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДАМИ  
АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Манохина Э.С., Рейфшнейдер Д.П., Албычаков А.А., Раменский Б.А., Иванов А.С.

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: xim96@inbox.ru

*В работе рассматривается экспериментальная установка для исследования формирования динамического пограничного слоя на различных поверхностях обтекания рабочим телом со сменными пластинами, а так же методика обработки экспериментальных данных.*

*Ключевые слова: экспериментальная установка, аддитивные технологии*

К современным РДМТ, как и к другим изделиям ракетно-космической техники, применяются высокие требования надёжности и экономичности. Достоверное заключение о надёжности разрабатываемого изделия можно сделать только на основе испытаний опытных образцов. Поэтому при проектировании РДМТ проводят комплекс испытаний отдельных систем, узлов, агрегатов и изделия в целом.

Аддитивные технологии позволяют изготавливать изделия РКТ и в частности камеры ЖРД на качественно новом уровне с использованием технических решений и конструктивных особенностей не использовавшихся и не применяемых до этого. Показатели плотности при 3D-печати на 50% лучше, чем при литье. Это значит, что в определенных технологических режимах для ее увеличения не нужно использовать, к примеру, ковку или прокат. Полученной плотности (а она составляет более 99% теоретической детали) будет достаточно.

Так же необходимо отметить, что данный метод не лишен своих недостатков, в частности повышенная шероховатость внутренних полостей, которые невозможно подвергнуть обработки, что приводит к дополнительным гидравлическим потерям в каналах систем подачи компонентов топлива, с другой стороны повышенная искусственная и технологическая шероховатость приводит к перестройки динамических и температурных пограничных слоев и должно приводить к увеличению коэффициентов теплоотдачи, в частности в тракте охлаждения ЖРД. Повышение шероховатости поверхности теплообмена в трактах охлаждения ЖРД влияет на режим течения в пограничном слое и, следовательно, на интенсивность теплообмена. При проектировании новых образцов ЖРД изготовленными методами аддитивных технологий необходимо учитывать данные особенности и дополнительного аналитического и экспериментального исследования по выявлению теоретических зависимостей гидравлических потерь и коэффициентов теплоотдачи и влияние их на энергетические параметры и обеспечение надежности от прогара камеры ЖРД [1-2].

В работе рассматривается экспериментальная установка для исследования формирования динамического пограничного слоя, который в свою очередь существенно влияет на формирование температурного пограничного слоя и соответственно влияют на гидравлические потери и процессы теплообмена[3-5].

Экспериментальная установка предназначена для исследования и измерения формирующегося динамического ППС для развивающегося и динамически стабилизиро-

ванного течения на поверхностях с различной шероховатостью поверхности обтекания рабочим телом:

- гидравлически гладкая поверхность (№1);
- поверхность на плоской пластине с искусственной шероховатостью полученной методами аддитивных технологий (№2);
- - поверхность на плоской пластине с искусственной шероховатостью полученной методами аддитивных технологий (№3);
- поверхность на плоской пластине с искусственной шероховатостью и дополнительными интенсификаторами динамического ППС полученной методами аддитивных технологий (№4).

Пластины №2, №3, №4 с искусственной шероховатостью поверхности изготовлены из материала «Силумин». Гидравлически гладкая поверхность (№1) выполнена из шлифованного оргстекла (рис. 1).

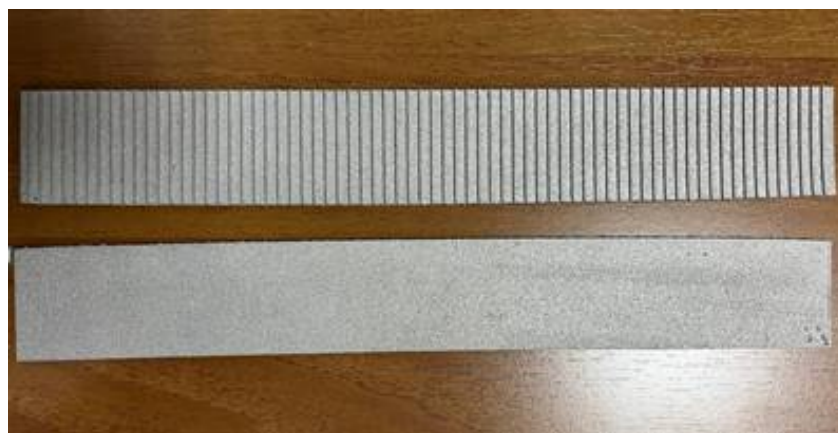


Рис.1. Экспериментальные поверхности изготовленные методом аддитивных технологий №2, №4

Экспериментальная установка представляет сборно-разборную конструкцию. Замеры профиля динамического пространственного пограничного слоя осуществляется с помощью приемников полного и статического давления. Конструкция установки позволяет перемещать приемники полного и статического давления по координате  $y$ . Приемники давления установлены с определенным шагом и обеспечивают замер параметров давления на различном расстоянии от входа потока на пластину по координате  $x$ .

Методика обработки экспериментальных данных:

- замер параметра статического  $P_{ст}$
- замер параметра полного давления  $P_{полн}$
- определение динамического давления  $P_{дин} = P_{полн} - P_{ст}$

- определение скорости потока в исследуемой точке  $U = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{дин}}{\rho}}$ .

Далее производится перемещение приемников давления по координате  $y$  и производится снятие параметров во всех точках по координате  $x$ .

Производится изменение расходов подаваемого рабочего тела и производятся замеры.

3D модели спроектированной и изготовленной установки представлены на рисунке 2.



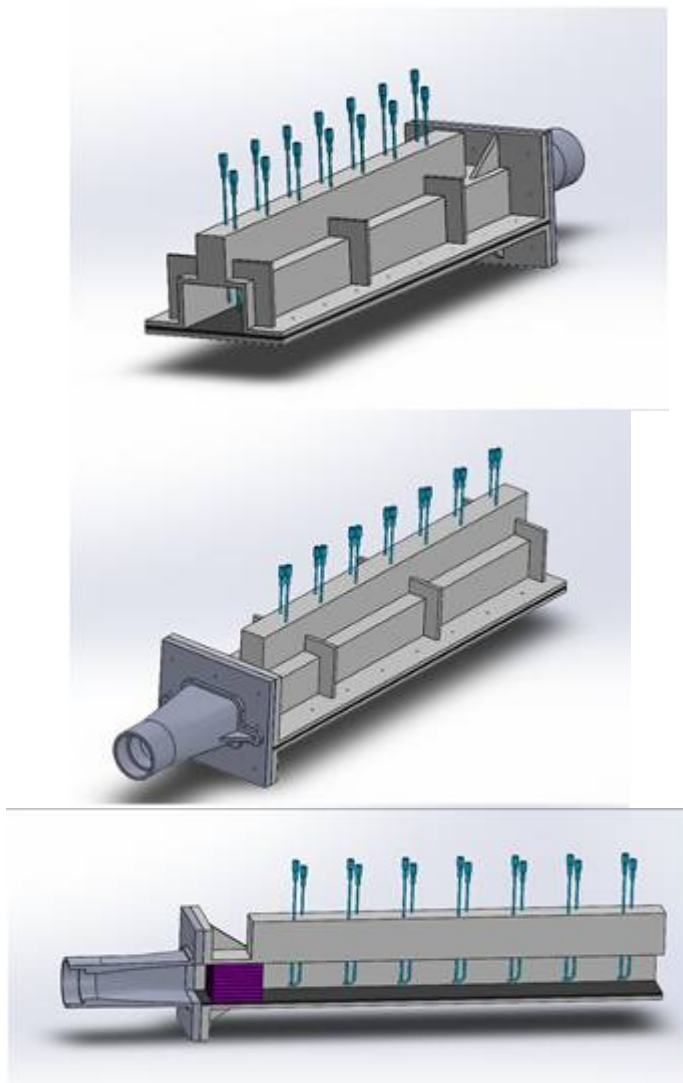


Рис. 2. Д-модель экспериментальной установки исследования формирующегося динамического ППС для развивающегося и динамически стабилизированного течения на различных поверхностях обтекания рабочим телом

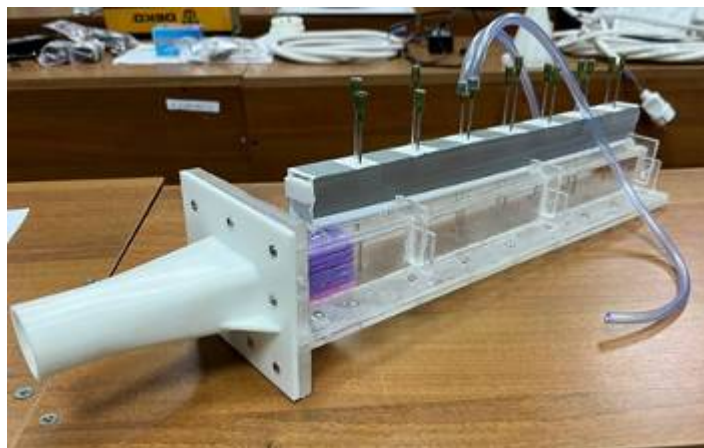


Рис.3. Экспериментальная установка исследования формирующегося динамического ППС для развивающегося и динамически стабилизированного течения на различных поверхностях обтекания рабочим телом





Рис.4. Общий вид собранного стенда для установки экспериментального образца исследования и измерения динамического ППС для развивающегося и динамически стабилизированного течения

Для исследования формирования профилей скорости на поверхностях произведены замеры шероховатости поверхности по Ra и Rz с помощью профилометра TR110.

Для пластин №2 и №3 измерения шероховатости производились в диагональном, продольном и поперечном направлениях.

Таблица 1

**Пластина №2**

| Диагональное направление |       | Продольное направление |       | Поперечное направление |       |
|--------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| Ra_1                     | Rz_1  | Ra_2                   | Rz_2  | Ra_3                   | Rz_3  |
| 4,73                     | 18,23 | 1,67                   | 5,92  | 2,06                   | 7,61  |
| 7,08                     | 30,2  | 0,19                   | 1,47  | 1,56                   | 8,82  |
| 7                        | 21    | 5,89                   | 18,96 | 1,36                   | 7,42  |
| 8,98                     | 31    | 1,39                   | 8,21  | 5,46                   | 19,78 |
| 5,32                     | 15,76 | 2,16                   | 10,3  | 2,86                   | 8,13  |
| 6,09                     | 18,88 | 2,75                   | 7,48  | 1,76                   | 5,27  |
| 6,53                     | 24,5  | 2,17                   | 8,15  | 8,93                   | 31    |
| 4,26                     | 20,8  | 4,61                   | 12,53 | 4,8                    | 11,48 |
| 5,62                     | 19,86 | 1,14                   | 6,45  | 10,7                   | 34    |
| 1,96                     | 7,79  | 3,21                   | 15,52 | 8,64                   | 28,1  |
| 3,78                     | 14,15 | 1,48                   | 7,91  | 2,85                   | 11,8  |
| 3,47                     | 10,73 | 0,97                   | 3,9   | 8,81                   | 32,9  |

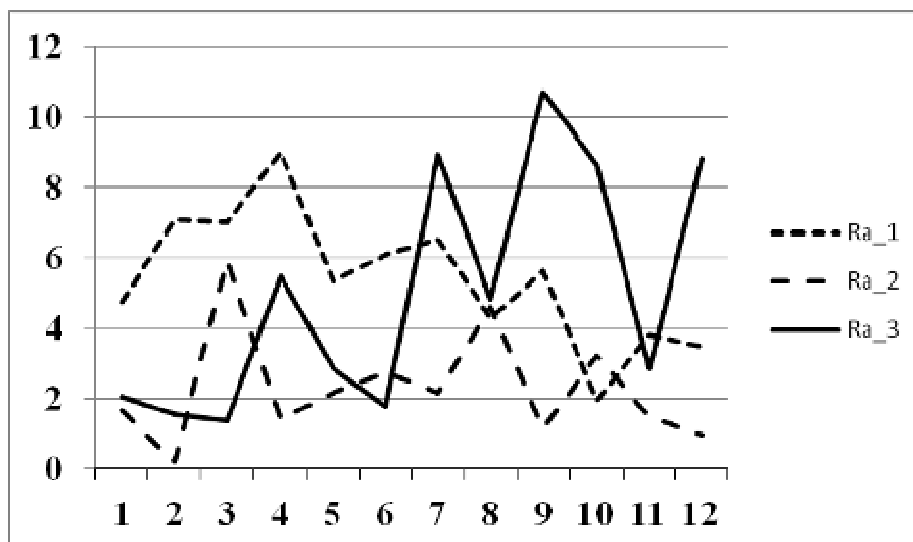


Рис.5. Результаты Замеров шероховатости по Ra в различных направлениях

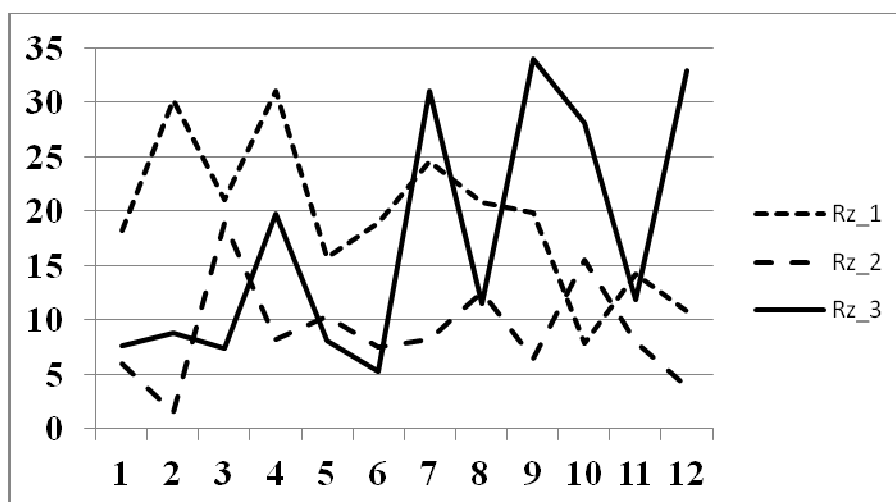


Рис.6. Результаты Замеров шероховатости по Rz в различных направлениях

Таблица 2

| Пластина №3              |      |                        |       |                        |       |
|--------------------------|------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| Диагональное направление |      | Продольное направление |       | Поперечное направление |       |
| Ra_1                     | Rz_1 | Ra_2                   | Rz_2  | Ra_3                   | Rz_3  |
| 8,01                     | 29,7 | 5,91                   | 28,2  | 5,41                   | 15,24 |
| 8,95                     | 26,9 | 7,93                   | 24,7  | 6,58                   | 19,52 |
| 9,58                     | 33   | 3,5                    | 17,72 | 9,47                   | 29,6  |
| 6,48                     | 24,9 | 2,56                   | 9,46  | 7,24                   | 31,7  |
| 7,57                     | 28,2 | 7,89                   | 25    | 7,16                   | 27,4  |
| 8,62                     | 32,1 | 7,68                   | 23,6  | 0,23                   | 1,1   |
| 9,48                     | 35,1 | 4,21                   | 17,76 | 4,96                   | 20,3  |
| 7,43                     | 33,3 | 4,06                   | 15,18 | 8,58                   | 26,6  |
| 8,77                     | 31   | 5,11                   | 19,11 | 5,66                   | 21,5  |
| 7,13                     | 28,3 | 6,22                   | 21,6  | 2,31                   | 13,8  |
| 9,5                      | 31,7 | 4,05                   | 15,35 | 4,57                   | 20,5  |
| 7,07                     | 24,5 | 4,85                   | 21,9  | 7,72                   | 32,1  |

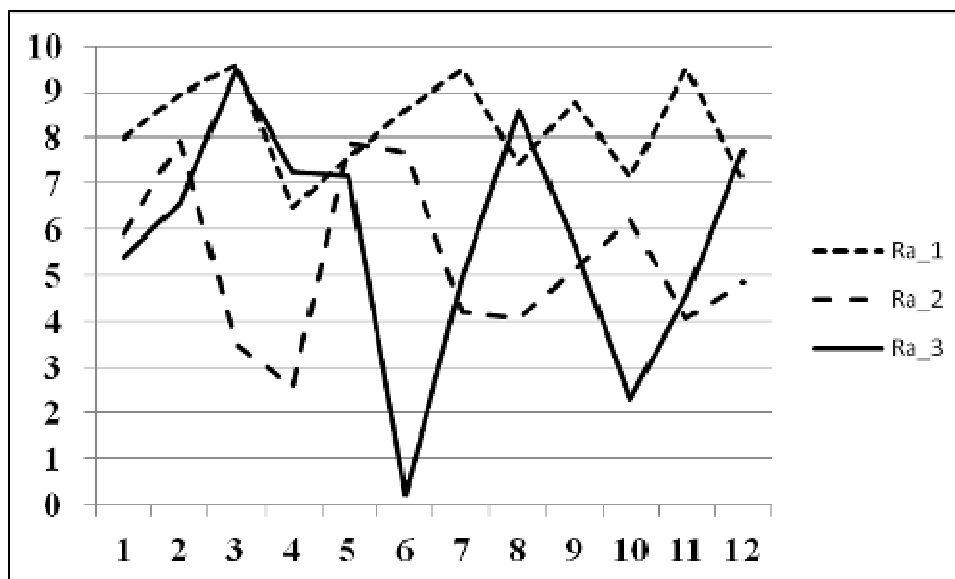


Рис.6. Результаты Замеров шероховатости по Ra в различных направлениях

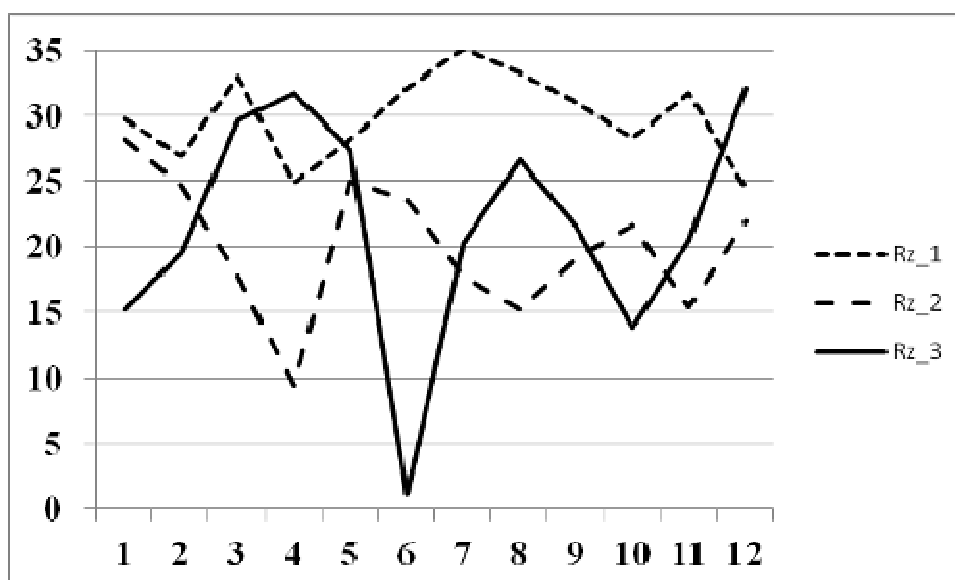


Рис.7. Результаты Замеров шероховатости по Rz в различных направлениях

Далее были посчитаны среднее значения шероховатости для пластин №2 и №3.

| Пластина №2 |            | Пластина №3 |            |
|-------------|------------|-------------|------------|
| Ra = 7,58   | Rz = 23,59 | Ra = 4,22   | Rz = 15,17 |

Пластина №4 выполнена со следующей геометрией профиля

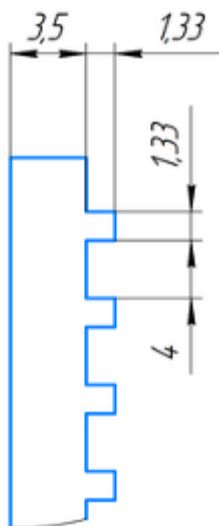


Рис.8. Пластина №4

Шероховатость измерялась только между ребрами профиля

Таблица 3

Пластина №4

| Ra   | Rz    |
|------|-------|
| 9,43 | 42,1  |
| 0,66 | 3,27  |
| 4,59 | 23,2  |
| 6,46 | 27,8  |
| 1,58 | 8,69  |
| 3,68 | 16,17 |
| 7,1  | 30,3  |
| 4,21 | 15,69 |
| 0,95 | 4,2   |
| 3,59 | 7,44  |
| 0,19 | 0,99  |
| 2,95 | 14,26 |

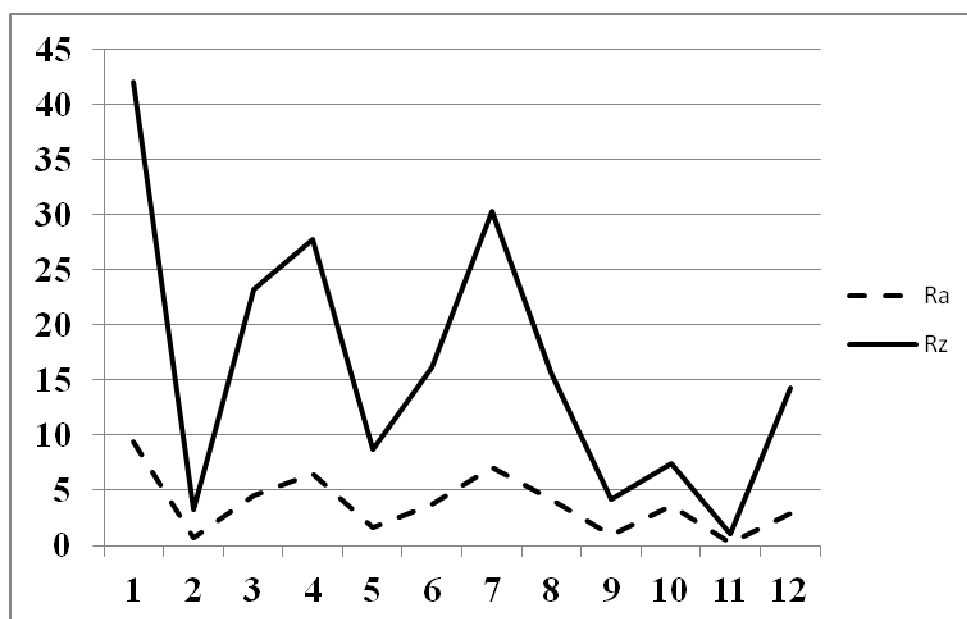


Рис.9. Результаты замеров шероховатости по Ra и Rz

Далее были посчитаны среднее значения шероховатости для пластины №4.

| Ra   | Rz    |
|------|-------|
| 3,78 | 16,18 |

В результате спроектирована экспериментальная установка исследования формирующегося динамического ППС для развивающегося и динамически стабилизированного течения на различных поверхностях обтекания рабочим телом со сменными пластинами, а так же методика обработки экспериментальных данных. Проведены исследования по определению шероховатости поверхностей для участков №2 и №3.

#### **Библиографические ссылки**

1. Александренков В.П., Зубков Н.Н., Ягодников Д.А., Ирьянов Н.Я. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик трактов охлаждения камер сгорания с предельными параметрами оребрения энергосиловых установок. Инженерный журнал: наука и инновации, 2016, вып. с.1-13
2. Александренков В.П. Эффективность интенсификации теплоотдачи в кольцевых оребренных трактах охлаждения камер сгорания. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2013, № 3, с. 111–121.
3. Афанасьев В.Н. Выступы в турбулентном пограничном слое/ Афанасьев В.Н., Трифонов В.Л., Гетья С.И., Кон Дехай // Машиностроение и компьютерные технологии. 2017. № 10. С 13-35.
4. Афанасьев В.Н. Численное и экспериментальное исследование структуры потока при турбулентном обтекании отрывной «траншеи» / Афанасьев В.Н., Недайвозов А.В., Семенёв П.А., , Конг Д. // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 02. С. 1–27.
5. Бойко А. В. Инженерное моделирование ламинарно-турбулентного перехода: достижения и проблемы / Бойко А. В., Кириловский С. В., Маслов А. А., Поплавская Т. В. // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, №5

© Манохина Э.С., Рейфшнейдер Д.П., Албычаков А.А.,  
Раменский Б.А., Иванов А.П., 2025

## ИСПЫТАНИЯ ПРОПЕЛЛЕРА ДЛЯ ХВОСТОВОЙ ЧАСТИ РАКЕТЫ

О. В. Крашенинникова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: olesya.krash@mail.ru

*В данной статье рассмотрено моделирование пропеллера хвостовой части ракеты. Целью моделирования в данном случае является создание пропеллера оптимальной конструкции, который будет работоспособен при различных внешних воздействиях, таких как ветер, турбулентность и изменения атмосферного давления.*

*В статье описаны основные характеристики, на которые необходимо обратить внимание при моделировании пропеллера хвостовой части ракеты. Разработка новых моделей и их оптимизация составляющих элементов хвостовой частью ракеты являются необходимыми шагами для улучшения эффективности полетов ракет.*

*Ключевые слова: проект, пропеллер, модель, хвостовая часть ракеты, 3D-моделирование, летательный аппарат.*

Создание различных отмасштабированных моделей реальных объектов всегда было актуальным [1], а с появлением аддитивных технологий [2] стало возможным реализация моделей в макеты [3]. «Компас 3D» - система автоматизированного проектирования (САПР) [4], разработанная компанией «АСКОН», позволяют обучающимся получить практические навыки моделирования. Кроме того, «Компас 3D» позволяет конвертировать смоделированные детали в STL файлы, которые нарезаются с помощью программ-слайсеров и переводятся в G-код.

Смоделируем пропеллер, создающий необходимый воздушный поток для подъема хвостовой части ракеты на необходимую высоту. Пропеллер состоит из определенного количества лопастей. Форма лопастей может варьироваться в зависимости от его предназначения и конструкции [5], но обычно он имеет следующие особенности:

- лопасти обычно имеют изогнутый профиль, что помогает им генерировать подъемную силу;
- форма лопасти может быть различной: пропеллеры могут иметь плоские, заостренные, закругленные или другие формы лопастей в зависимости от требуемых характеристик работы;
- на концах лопастей часто могут присутствовать закругления или другие угловые обработки для улучшения аэродинамических характеристик и снижения шума;
- некоторые пропеллеры могут иметь переменную форму лопастей, которая позволяет им адаптироваться к изменяющимся условиям работы и оптимизировать эффективность работы;

Для данного проекта были разработаны несколько 3D-моделей пропеллера. На рисунке 1 представлена модель, имеющая габаритные показатели 115x115x16 мм и изогнутые под углом наклона 73 градуса закругленные лопасти.

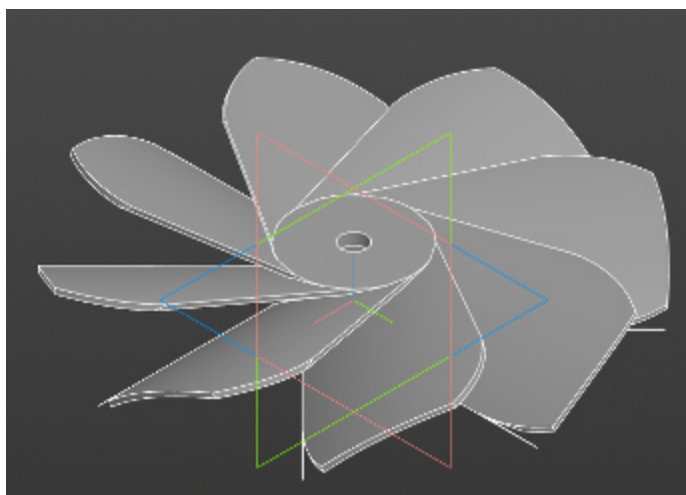


Рис. 1 – Модель пропеллера

Для проверки принятых в моделировании решений модели с разными характеристиками были распечатаны на 3D-принтере для дальнейших испытаний (рисунок 2).



Рис. 2 – Напечатанные на 3D-принтере макеты пропеллеров

В ходе испытаний пропеллер устанавливается на вал мотора в каркасе хвостовой части ракеты [6]. Мотор приводится в действие для измерения тяги и максимальных оборотов, при которых пропеллер не разлетится. Методика испытаний:

- электронные весы устанавливаются на ровной и устойчивой поверхности;
- пропеллер устанавливается на мотор, закрепленный в хвостовой части ракеты;
- хвостовая часть ракеты закрепляется на специальном стенде, который позволяет совершать движение только в одной плоскости (рисунок 3), так, чтобы поток создаваемый пропеллером был направлен в противоположную сторону от весов;

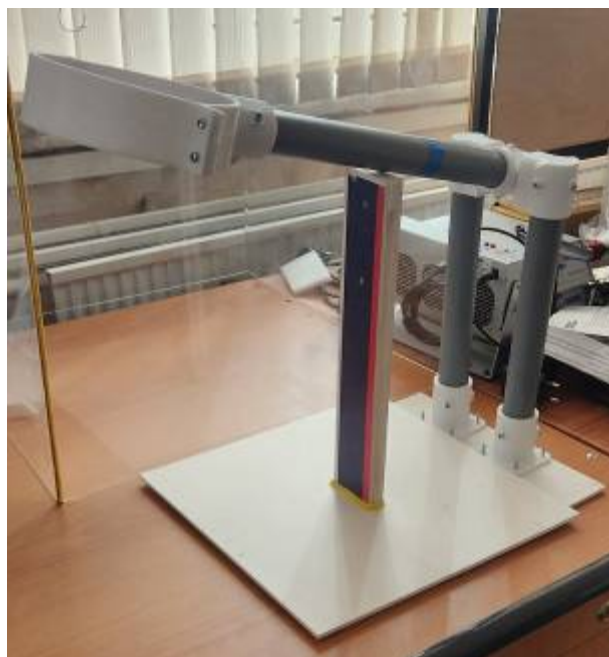


Рис. 3 – Стенд для проверки тяги мотора с разными пропеллерами

- включаются электронные весы;
- мотор приводится в действие с помощью дистанционного пульта управления;
- с помощью дистанционного пульта управления обороты пропеллера постепенно увеличивают, измеряя изменение веса на весах;
- записываются значения веса при разных оборотах пропеллера;

На этом же стенде можно провести акустические испытания. Методика которых описана ниже:

- пропеллер устанавливается на мотор, закрепленный в хвостовой части ракеты;
- хвостовая часть ракеты жестко закрепляется на стенде;
- включается датчик уровня звука и устанавливается как можно ближе к стенду;
- мотор приводится в действие с помощью дистанционного пульта управления,
- на разных режимах работы пропеллера (разные обороты и нагрузки) записываются данные о звуковых уровнях в различных частотных диапазонах (например, широкополосный шум).

- если результаты испытаний показывают превышение допустимых норм, могут быть проведены дополнительные исследования, направленные на оптимизацию формы и конструкции пропеллера.

Схема для проведения акустических испытаний представлена на рисунке 4.

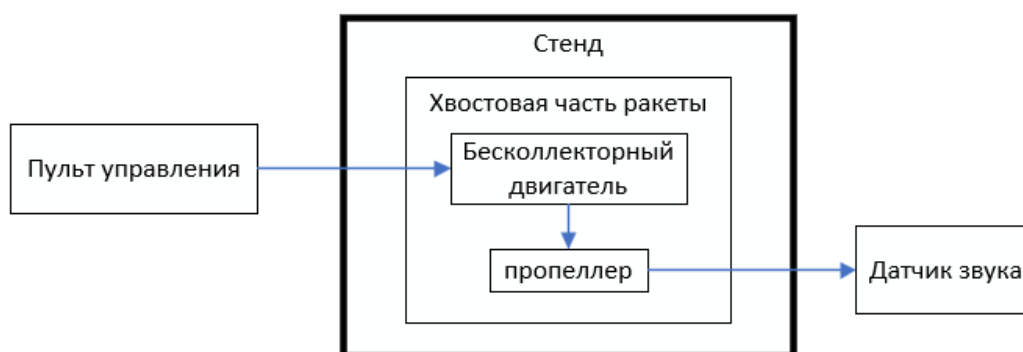


Рис. 4 – Схема проведения акустических испытаний



Такие испытания помогают определить оптимальную конструкцию и характеристики пропеллера для конкретных задач.

Ещё один метод – усталостные испытания лопастей пропеллера, при которых лопасти пропеллера подвергаются циклическим нагрузкам, имитирующим условия работы в реальных условиях. Это позволяет определить долговечность материалов и конструкции лопасти. Методика испытаний:

- образец из двух лопастей закрепляют на станине;
- создают на станине постоянную нагрузку путём приложения продольной растягивающей силы заданной величины и переменного изгибающего момента посредством возбуждения изгибных колебаний;
- проводится постоянный мониторинг состояния лопасти с помощью различных методов, таких как визуальный осмотр, термография, ультразвуковая дефектоскопия и другие;
- по завершении усталостных испытаний проводится анализ полученных данных для оценки прочности и долговечности лопасти пропеллера.
- по результатам анализа принимаются решения о дальнейших модификациях конструкции или материалов.

### Библиографические ссылки

1. Крашенинникова, О. В., В. Г. Сидоров. Применение 3D-моделей в педагогической практике технических вузов // XVII Королёвские чтения: Материалы Всероссийской молодёжной научной конференции с международным участием, посвящённой 35-летию со дня первого полёта МТКС "Энергия -Буран". В 2-х томах, Самара, 03–05 октября 2023 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 195-196. – EDN PHUBJQ.
2. Аддитивные технологии и их возможности [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/futurology/6284222d9a79472c8b9a67bc> (дата обращения 17.12.2024).
3. Крашенинникова, О. В. Применение 3D печати в машиностроении / О. В. Крашенинникова // 3D технологии в решении научно-практических задач: Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 28 мая 2024 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2024. – С. 29-31. – EDN GCGYXC.
4. Система автоматизированного проектирования [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/c/sistema-avtomatizirovannogo-proektirovaniia-82d30a> (дата обращения 12.01.2025).
5. Пропеллеры, виды, особенности, сферы применения [Электронный ресурс]. URL: <https://promexcut.ru/impelleryi> (дата обращения 13.01.2025).
6. Твёрдотельное моделирование каркаса хвостовой части ракеты в cad-системе компас-3D / Крашенинникова О.В., Сидоров В.Г. // журнал «Наука и бизнес: пути развития», 2024 №10 (160). С. 40–43.

© О. В. Крашенинникова, 2025

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАКЕТЫ С ПАССИВНОЙ СИСТЕМОЙ СПАСЕНИЯ

Е. Е. Смирнов

Научный руководитель М. С. Руденко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: [es9193047@gmail.com](mailto:es9193047@gmail.com)

*Предлагается схема экспериментальной модели ракеты, созданной с минимально возможной массой и максимальной высотой подъёма, обеспечивающей при этом плавное и безопасное возвращение на землю.*

*Ключевые слова: пассивная система спасения, композиционные материалы, проектирование модели ракеты, стабильность конструкции.*

Модели ракет активно используются в учебных заведениях для изучения базовых принципов аэродинамики, физики и инженерии, что значительно расширяет знания студентов и подготавливает их к будущей профессиональной деятельности. В профессиональной сфере они также имеют большое значение, так как моделирование и прототипирование являются ключевыми этапами в проектировании реальных изделий. На этих этапах можно отработать важные технические решения, исправить ошибки и провести анализ данных.

В данной работе рассмотрена модель ракеты с пассивной системой спасения, выполненная в среде SolidWorks, как показано на рис. 1.

В качестве основного конструкционного материала был выбран полимерный композит (стеклопластик), обладающий высокой прочностью и обеспечивающий отличную устойчивость на протяжении всего полета, а также потенциал для многократного использования. Корпус, головная часть и стабилизаторы изготовлены из стекловолокна с использованием связующего компонента — смолы ЭД-20 и отвердителя Этал-45, которые в своей совокупности демонстрируют более высокие прочностные характеристики по сравнению с классической системой на основе смолы и отвердителя ПЭПА.

Двигатель ракеты фиксируется на верхнем и нижнем шпангоуте, созданных с помощью 3D-принтера. Масса самого двигателя составляет 350 граммов. Такой конструктивный подход не только способствовал снижению общего веса ракеты до 581 грамма без учета двигателя, но и позволил увеличить скорость и ускорение при старте. Стабилизаторы размещены снаружи корпуса для обеспечения быстрого доступа к ним, а также для удобства замены креплений в случае неисправности.

Муфта в головной части была также распечатана на 3D-принтере и вклеена в конструкцию. Применение 3D-печати для некоторых компонентов, таких как шпангоуты и крепления для стабилизаторов, было обусловлено необходимостью повышения прочности, а также для создания большего пространства в головной части для размещения полезного груза. Расчет параметров парашюта был выполнен в программе Translatorscafe. Парашют надежно фиксировался на крепежах, которые приклеивались к корпусу с последующей шлифовкой. Такой метод крепления был обусловлен наличием плотного пыжа, созданного из трубки, наполненной композитом. В момент вылета из корпуса этот пыж мог оборвать стропы парашюта, что привело бы к неконтролируемому падению.

Расчеты полета проводились в программе Open Rocket, в результате чего центр тяжести был определен на расстоянии 61.7 см от верхней точки ракеты, тогда как центр давления располагался на расстоянии 69.7 см от верхней точки. Эти параметры обеспечили стабильность полета на уровне 2.11 калибра.

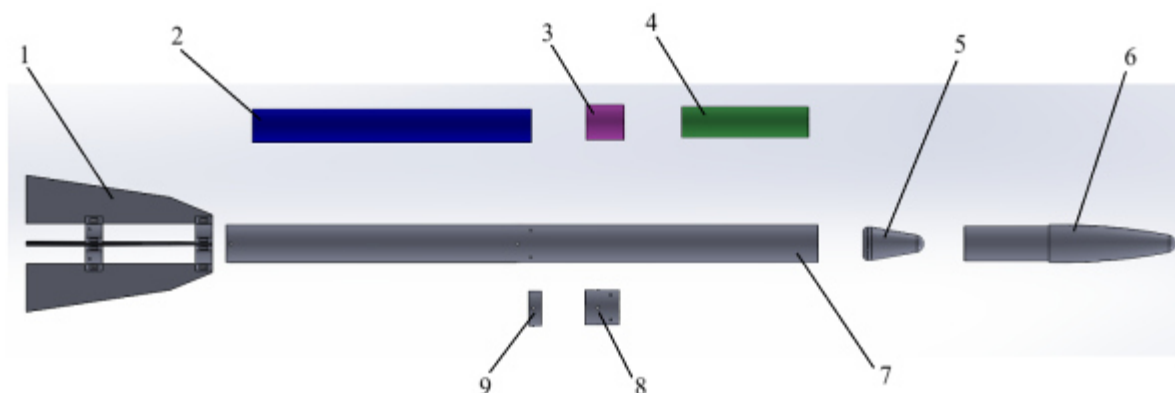


Рис. 1. Трёхмерная модель ракеты:

- 1 – система креплений стабилизаторов; 2 – двигатель; 3 – пышь; 4 – парашют;  
5 – полезный груз; 6 – обтекатель; 7 – корпус; 8 – верхний шпангоут;  
9 – нижний шпангоут

### Проблемы

К основным проблемам относилось крепление стабилизаторов и конструкция парашюта. Возможные ошибки и высокие нагрузки могли привести к выходу стабилизаторов из строя. Парашют имел стандартную купольную форму, но веревки, соединяющие его с корпусом, не крепились на кольцах для повышения надежности, а просто связывались с парашютом, в то время как на корпусе были установлены кольца. Также стоит отметить, что низкая масса ракеты была одновременно проблемой и преимуществом, так как это приводило к высоким перегрузкам при подъеме на высоту.

### Решение проблем

Для решения основных проблем, связанных с креплением стабилизаторов и конструкцией парашюта, необходимо было предпринять следующие шаги.

Во-первых, необходима разработка нового крепежа для стабилизаторов, который будет исключать вероятность их выхода из строя. Можно внедрить конструкции с дополнительной жесткостью, например, ребра жесткости или укрепляющие рельсы. Также стоит учитывать возможность регулировки натяжения креплений, что позволит адаптироваться к различным рабочим условиям.

Во-вторых, для повышения надежности парашюта следует изменить способ крепления веревок. Вместо простого связывания веревок с парашютом желательно использовать кольца или специальные крепежи, которые будут надежно фиксировать веревки и повышать устойчивость конструкции. Это обеспечит большее равномерное распределение нагрузки и снизит риск повреждения парашюта при раскрытии.

В-третьих, чтобы снизить перегрузки во время подъема, можно рассмотреть использование более тяжелых материалов в отдельных элементах конструкции, что поможет примерно сбалансировать массу. Альтернативно, можно переработать конструкцию с фокусом на распределение веса так, чтобы он не сосредотачивался в определенных точках и не приводил к перегрузкам.

Помимо этого, после внедрения всех изменений необходимо провести испытания, чтобы проверить эффективность предложенных решений. Можно использовать тестовые полеты с датчиками для мониторинга нагрузок и работы стабилизаторов и парашюта в

реальных условиях. Собранные данные помогут выявить возможные слабые места и доработать проект.

### **Библиографические ссылки**

1. Силовое сопротивление конструкций из композиционных материалов при высокотемпературном нагреве : учебное пособие / Боровских А. В., Фёдоров В. С. ; Московский ин-т коммунального хозяйства и строительства, Московский государственный ун-т путей сообщения. - М. : ИД Рusanова, 2001. - 213 с.
2. Композитные материалы. Механика и технология : учебник для вузов : пер. с англ. / Мэттьюс Ф., Ролингс Р. ; пер. Баженов С. Л. - М. : Техносфера, 2004. - 406 с.
3. Кротов И В. Модели ракет: Проектирование—М.: ДОСААФ, 1979. — 176 с.

© Е. Е. Смирнов, 2025

## **МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ МАЛОРАСХОДНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ**

В.В. Черненко, Д.В. Черненко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
e-mail: 2887722@mail.ru

*Аннотация: Исследования в области малорасходных насосов продолжают развиваться, и их цель — повысить эффективность и надёжность этих устройств. Это, в свою очередь, способствует улучшению работы авиационных и космических систем в целом. Оптимизация характеристик работы насосных установок может значительно повысить их эффективность, снизить потребление энергии и увеличить срок службы. Необходимо провести дополнительные исследования в этой области, чтобы разработать более эффективные насосные системы, соответствующие современным экологическим стандартам и требованиям к экономии ресурсов.*

*Ключевые слова: центробежный нагнетатель, малорасходный насос, рабочее колесо, напор, энергетические параметры, пространственный пограничный слой*

Развитие летательных аппаратов способствовало расширению предъявляемых требований к надёжности, а также по эксплуатационным характеристикам и энергетической эффективности. Это обусловлено необходимостью обеспечения эксплуатационной безопасности и значимостью решаемых военных, научно-прикладных и хозяйственных задач. Чтобы улучшить эксплуатационные характеристики летательных аппаратов, необходимо продолжать развивать теорию процессов, которые происходят в проточной части лопаточных нагнетателей. Это позволит улучшить качество проектирования, ускорить разработку и внедрение в эксплуатацию более совершенных систем ракетно-космической авиационной техники.

Совершенствование авиационно-космических программ обуславливает широкое применение центробежных лопаточных нагнетателей в системах подачи рабочего тела. Эти устройства применяются в механизмах, которые обеспечивают коррекцию и стыковку, а также в тормозных двигательных установках, бортовых источниках энергии, системах терморегулирования для поддержания жизнедеятельности космических аппаратов и т. д. В особенности остро стоит вопрос о теоретическом исследовании движения жидкости в каналах проточной части центробежных лопаточных нагнетателей. Эта задача представляет собой серьёзное препятствие, поскольку большинство таких каналов имеют изменяющуюся площадь и неправильную форму в поперечном сечении, а также изогнутую осевую линию.

Особенно сложной с точки зрения теоретической проработки является часть каналов, которая приходится на рабочее колесо. Эти каналы находятся в состоянии вращения, а поток, проходящий через них, взаимодействует с лопатками, увеличивая свою удельную энергию.

Понимание принципов работы центробежного насоса в различных его элементах позволит создать более точные методы анализа и разработки этих устройств. [1]

В настоящее время центробежные насосы стали неотъемлемой частью насосного оборудования, которое широко применяется в современных авиационных двигателях. С по-

мощью центробежного насоса осуществляется предварительное повышение давления топлива перед его поступлением в систему. Также он подаёт топливо в форсажную камеру сгорания.

В связи с тем, что критерии оптимизации, такие как эффективность использования энергии, надёжность и срок службы, зависят от множества геометрических характеристик проточной части насоса, а также из-за того, что расчёт параметров насоса с помощью методов вычислительной гидродинамики занимает много времени, универсальные методы оптимизации не всегда могут быть использованы для решения этой задачи. Алгоритм расчёта проточной части насоса, основанный на методах оптимизации, должен принимать во внимание тип проточной части, формулировку и количество параметров оптимизации. Он должен быть гибким и легко настраиваемым при добавлении новых условий. Его задача — обеспечить желаемый результат за минимальное время.

В настоящее время методы расчёта центробежных насосов базируются на относительно высоких показателях расхода. Это требует разработки алгоритма для определения конструктивных характеристик такого насоса. [2-7]

**Цель.** Разработать способ вычисления потока жидкости в межлопастном пространстве центробежного рабочего колеса с конечным количеством лопастей. По результатам расчётов построить энергетические параметры рабочего колеса и оптимизировать их в зависимости от количества лопастей.

**Метод.** Изучая данные, полученные в ходе эксперимента по визуализации течения в рабочем колесе, можно увидеть, что скорость жидкости, движущейся по окружности, отличается от скорости вращения ведущего диска в безнапорной части лопатки. Однако в напорной части эти скорости равны.

Учитывая, что в жидкости сила распространяется исключительно в виде продольной упругой волны, можно сделать вывод, что в каждый момент времени направление скорости жидкости должно совпадать с направлением распространения волны. Если не принимать во внимание потери энергии при движении и считать, что затухание волны в рассматриваемых масштабах не происходит, то можно предположить, что скорость жидкости остаётся постоянной вдоль линии упругого силового взаимодействия. Начальная точка этой линии находится на поверхности лопатки и определяет скорость жидкости вдоль неё. Следовательно, можно определить семейство характеристических линий, вдоль которых скорость постоянна.

На основании изложенного можно записать выражение для напора в каждой точке на выходе рабочего колеса для различных типов лопаток.

Схема расчёта колеса с прямыми лопастями, расположенными по касательной, представлена на рисунке 1.

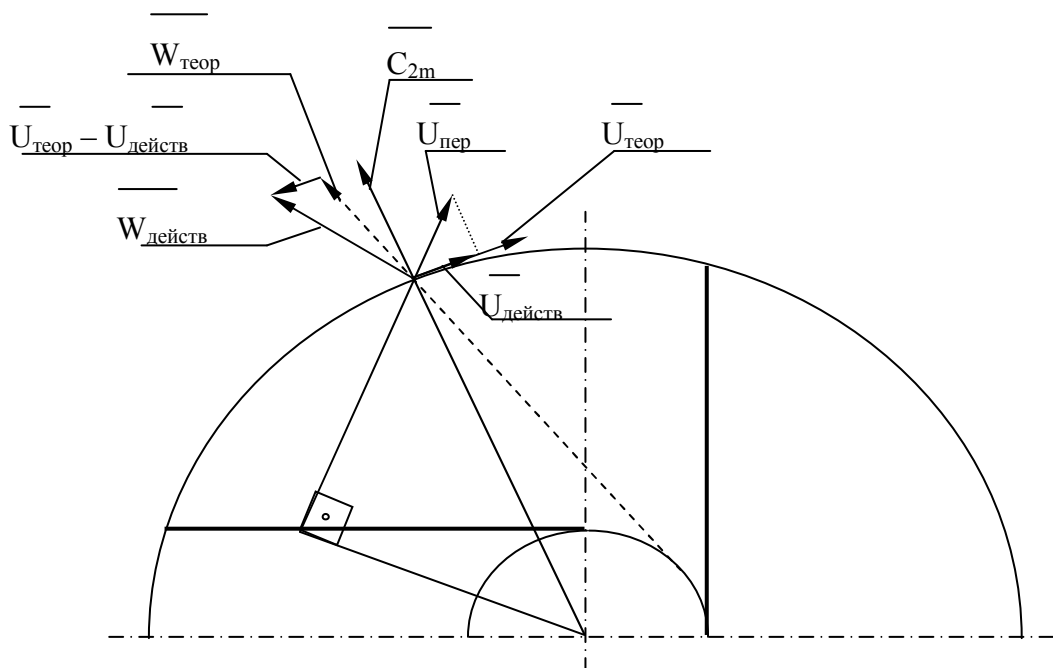


Рис. 1. Расчетная схема для колеса с прямыми тангенциальными лопатками

В такой ситуации формула для вычисления напора будет выглядеть следующим образом.

$$H_j = C_{2uj} \cdot U_2 = U_{пер} \cdot \cos \gamma \cdot U_2 = U_i \cdot \cos \gamma \cdot U_2. \quad (1)$$

Так как окружная скорость выражается формулой.:

$$U = R \cdot \omega \Rightarrow H_j = R_i \cdot R_2 \cdot \omega^2 \cdot \cos \gamma. \quad (2)$$

В любой точке лопатки радиус можно вычислить по формуле:

$$R_i = R_2 \cdot \cos \gamma. \quad (3)$$

Окончательно выражение для напора в точке j запишется в виде:

$$H_j = R_2^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2 \gamma \quad (4)$$

В случае, когда число лопаток конечно, то теоретический напор можно рассчитать, используя определённый метод.

На первом этапе необходимо задать приращение угла  $\gamma$ . Затем, используя формулу (4), можно вычислить значение напора в текущей точке.

Для получения окончательного результата необходимо усреднить все полученные значения напора: [7]

$$H_T = \frac{\sum_{j=1}^n H_j}{n}. \quad (5)$$

Коэффициент влияния конечного числа лопаток:

$$k_z = \frac{H_T}{H_{T\infty}}. \quad (6)$$

Величина теоретического напора при бесконечном числе лопаток определяется по классическому выражению струйной теории Эйлера [7].

Учитывая сложность вязких течений в решетках рабочих колес, действительные характеристики отличаются от теоретических на величину гидравлических потерь:

$$H = H_T - \Delta H = \eta_z H_T \quad (7)$$

Гидравлические потери определяются величиной и направлением относительных скоростей в проточной части решетки. Они рассчитываются как интеграл от напряжений трения по ограничивающим поверхностям, таким как цилиндрические поверхности лопаток и торцевые поверхности покрывных дисков.

В настоящее время определение реальных величин напора с учётом ключевых геометрических и режимных характеристик решётки в большинстве практических случаев осуществляется с помощью полуэмпирических формул, которые были выведены на основе обобщения и анализа результатов экспериментов. [8-14]

В исследовании описан метод расчёта гидравлических потерь, который заключается в интегрировании напряжений трения по поверхности, ограничивающей криволинейный канал. [1]. В процессе интегрирования конечно-разностных аналогов уравнений импульсов пространственного пограничного слоя на каждом этапе вычисляется величина потери импульса.  $\delta_{\varphi}^{**}$  и угол скоса донной линии тока –  $\varepsilon$ .

Полный перепад напора записывается как интеграл [14]

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} = \frac{1}{\rho} \int_s \tau_0 dS = \frac{1}{\rho} \int_s \tau_0 d\varphi d\psi ; \quad (8)$$

Если мы представим  $\tau_0$  в виде суммы проекций, то получим...

$$\tau_0 = \sqrt{\tau_{0\varphi}^2 + \tau_{0\psi}^2} ; \quad (9)$$

$$\Delta H = \frac{1}{\rho} \int_s \sqrt{\tau_{0\varphi}^2 + \tau_{0\psi}^2} \cdot d\varphi d\psi . \quad (10)$$

Учитывая, что  $\tau_{0\psi} = \varepsilon \tau_{0\varphi}$ , получим

$$\Delta H = \frac{1}{\rho} \int_s \sqrt{\tau_{0\varphi}^2 + \varepsilon^2 \tau_{0\varphi}^2} d\varphi d\psi = \frac{1}{\rho} \sqrt{(1 + \varepsilon^2)} \int_S \tau_{0\varphi} d\varphi d\psi . \quad (11)$$

В соответствии с законом трения [16]

$$\tau_{0\varphi} = 0,01256 \rho U^2 \left( \frac{U \delta_{\varphi}^{**}}{\nu} \right)^{-0.25} . \quad (12)$$

Подставив значение в формулу (11) мы получим выражение для расчёта потерь напора.

$$\Delta H = \frac{1}{\rho} \cdot \sqrt{(1 + \varepsilon^2)} \int_S \tau_{0\varphi} d\varphi d\psi = 0,01256 \cdot \sqrt{(1 + \varepsilon^2)} \int_S U^2 \cdot \left( \frac{U \delta_{\varphi}^{**}}{\nu} \right)^{-0.25} d\varphi d\psi . \quad (13)$$

Подставляя найденные значения  $\varepsilon$  и  $\delta_{\varphi}^{**}$ , получим значение потерь напора.

Предложенный метод вычисления пространственного пограничного слоя отличается простотой и наглядностью. Однако требуется дальнейшая доработка метода для его применения к расчёту трёхмерного течения рабочего тела в канале произвольной формы.

Важно подчеркнуть, что сопоставление данных, полученных с помощью вычислений и в ходе экспериментов, показывает, что характер течения в обоих случаях примерно одинаков. Это косвенно подтверждает корректность предположений и выводов, сделанных при разработке метода определения поля скорости в межлопаточном пространстве рабочего колеса. На основе теоретических исследований был создан алгоритм и программа, которые позволяют вычислять локальные значения параметров в зависимости от длины межлопаточного канала.

Для этого используются известные геометрические параметры колеса, угловая скорость и расход. Был проведён расчёт теоретического напора в рабочем колесе с прямыми



лопатками. На рисунке 2 показаны зависимости коэффициента влияния конечного числа лопаток, гидравлического КПД и параметра оптимизации от числа лопаток в колесе.

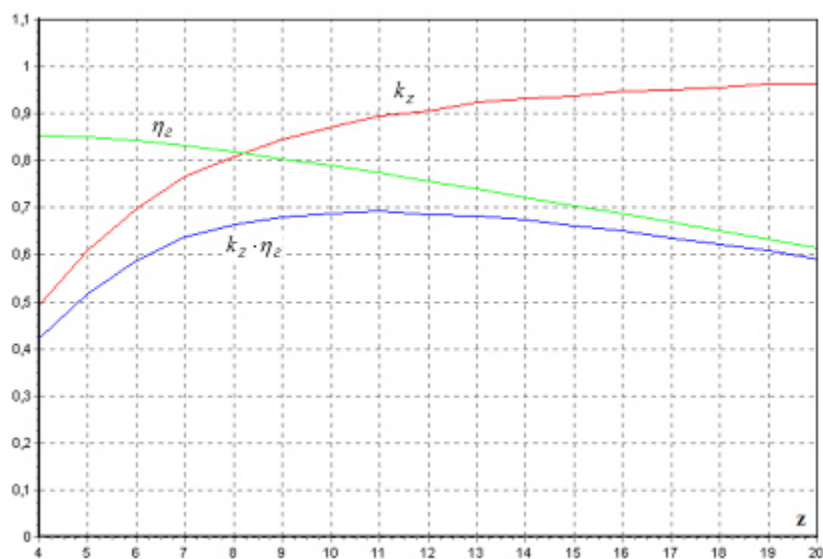


Рис. 2. Зависимость  $k_z$ ,  $\eta_z$  и  $(k_z \cdot \eta_z)$  от числа лопаток.

После проведения серии вычислений для разного количества лопастей, можно определить наилучший вариант, исходя из определённого критерия  $k_z \cdot \eta_z \rightarrow \max$

**Заключение.** В статье рассматривается методика расчёта движения жидкости в межлопастном пространстве центробежного рабочего колеса с ограниченным количеством лопастей. Также в статье представлены методы построения энергетических характеристик рабочего колеса и его оптимизации по количеству лопастей. С помощью предложенной методики был проведён расчёт, который включает в себя определение теоретического напора с учётом влияния ограниченного количества лопастей на основе анализа силового взаимодействия и расчёт гидравлических потерь в рабочем колесе путём интегрирования напряжений трения по ограничивающим поверхностям.

Результаты, полученные в ходе расчёта, позволяют использовать их для оптимизации количества лопастей в рабочем колесе насоса.

### Библиографические ссылки

1. Черненко Д. В. Гидродинамика центробежных лопаточных нагнетателей энергосиловых установок летательных аппаратов / Дисс. на соискание уч. степени к.т.н. Красноярск, 2005. 167 с.
2. В. В. Черненко, Д. В. Черненко Баллансовые испытания в методике исследования проточной части лопаточного нагнетателя // Испытания, диагностика, надёжность. Теория и практика : Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 27–28 февраля 2023 года. – Красноярск: «СибГУ имени академика М.Ф. Решетнева», 2023. – С. 157-159.
3. Бойко Л.Г., Е.С. Барышева, А.Е. Демин, О.Н. Дрынов / Расчетное исследование течения в осецентробежном компрессоре авиационного ГТД / Уфа, 2013, Вестник УГАТУ, Том 17 № 4 (57) (2013): Вестник УГАТУ
4. Пугачев П.В. Развитие методов расчета элементов проточной части шнеко-центробежных насосов на основе двухмерных и трехмерных моделей течения / Автореферат дисс. на соискание уч. степени к.т.н. Санкт-Петербург, 2012. 161 с.

5. Карабанова В.В., Ваяшов А.Д., Юша В.Л., Некоторые особенности, реализации расчетной модели высоконапорной центробежной компрессорной ступени с выходны направляющим аппаратом / Омский научный вестник. Сер. Авиационной- ракетное и энергетическое машиностроение, 2019. Т.3.,№2. С.62-70. DOI: 10/25206/2588-0373-2019-3-2-62-70
6. Протопопов А.А Расчёт оптимальных параметров полуоткрытого рабочего колеса центробежного малорасходного насоса / МГТУ им. Н.Э. Баумана Выпуск:Том 1, № 4 (2015) Страницы: 82-89
7. Билалов Р.А., Сулимова Д.А. Современные способы проектирования САУ авиационных двигателей на основе модельно-ориентированного подхода / International Conference on Aviation Motors – ICAM 2020 Moscow, Russia, 468 с.
8. Назаров, В. П. Модель течения в рабочем колесе центробежного насоса / В. П. Назаров, В. В. Черненко, Д. В. Черненко // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2021. – Т. 22, № 3. – С. 494-503. – DOI 10.31772/2712-8970-2021-22-3-494-503. – EDN AETXSM.
9. Кириллов И. И. Теория турбомашин. Л.: Машиностроение, 1972. 536 с.
10. Stodola A. Steam and gas turbines. New York: P.Smith, 1945. 736 с.
11. Эккерт Б. Осевые и центробежные компрессоры. М.: Машгиз, 1959. 680 с.Проскура Г. Ф. Гидродинамика турбомашин. М.: Машгиз, 1954. 417 с.
12. Пфлейдерер К. Л. Лопаточные машины для жидкостей и газов. М.: Гостехиздат, 1960. 684 с.
13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 744 с.
14. Степанов Г. Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М.: Физматгиз, 1962. 512 с.

© Черненко В.В., Черненко Д.В., 2025

## **ВЫБОР И ДИАГНОСТИКА ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ СВОДА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ**

К. В. Наумов\*, Р. Р. Файзуллин, М. В. Матвеев, Д. А. Васильева, Д. В. Рябков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: kirill20-05@mail.ru

*В работе анализируются различные виды двигательных установок для свода с орбиты малых космических аппаратов за счёт торможения. Разработаны предложения по созданию конструкции тормозных двигательных установок с использованием аддитивных технологий.*

*Ключевые слова:* Малые космические аппараты, двигатель, сила тяги, топливо.

Одной из современных тенденций развития мировой космонавтики является широкое применение малых космических аппаратов (МКА). Ежегодно на околоземные орбиты высотой от 300 км. до 700 км. выводятся сотни МКА массой от 100 кг. до 1000 кг., выполняющих разнообразные задачи мониторинга земной поверхности и окружающего космического пространства, обеспечивающих решение функциональных задач связи, телекоммуникации и т. д. Срок их активного существования обычно составляет 3-5 лет. При этом время естественного схода МКА с орбит занимает от 8 лет до 10 лет и более. В этот период они являются «космическим мусором» и представляют опасность для действующих на орбитах космических аппаратов и космических ракет-носителей. Известно, что российскому и зарубежному Центрам управления полетом Международной космической станции регулярно совместно приходится корректировать траекторию орбитального полета станции, чтобы избежать её столкновения с фрагментами отработавших МКА. Большинство таких МКА не имеют специальных средств для свода их с орбит и утилизации в плотных слоях атмосферы Земли.

Борьба с «космическим мусором» становится актуальной проблемой отечественных и зарубежных научных организаций и предприятий ракетно-космической отрасли. С этой целью имеется необходимость создания особого типа малогабаритных тормозных двигательных установок, предназначенных для уменьшения скорости движения МКА по круговым или эллиптическим орбитам.

При включении ТДУ первая космическая скорость МКА уменьшается со значений  $V_{1k} \approx 7,8...7,9$  км/с до значений  $V_k < V_{1k}$ , при которых сила земного притяжения будет превышать центробежную силу, обеспечивающую равновесие сил, действующих на МКА. Под действием силы земного притяжения МКА будет входить в плотные слои атмосферы Земли, где происходит его безвозвратная утилизация (сгорание).

В соответствии с программой исследовательской деятельности Студенческого технологического инкубатора и планом проектно-конструкторской работы Студенческого конструкторского бюро «Факел» создана инициативная группа студентов СибГУ, обучающихся по специальности «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», которые приступили к разработке проектных предложений и расчётно-аналитической работе по созданию модели тормозной двигательной установки для малых космических аппаратов с ориентацией на использование современных прогрессивных технологий производства. В процессе реализации проекта используются принципы групповой ко-

мандной научно-исследовательской, проектно-конструкторской и производственно-технологической работы студентов. Проводится формирование у обучающихся профессиональных компетенций и практических навыков инженерной деятельности.

Проектной командой выполнен анализ состояния научно-технологической проблемы, обзор научных публикаций по теме проекта. Рассмотрены эксплуатируемые в настоящее время отечественные и зарубежные ТДУ. Установлено, что электрические ракетные двигатели (ЭРД) имеют низкие показатели тяги и требуют значительной величины потребляемой электроэнергии. Жидкостные ракетные-тормозные ДУ могут обеспечить значение тяги в широком диапазоне параметров, однако обладают большой массой. Например, корректирующие-тормозная ДУ 11Д414 искусственного спутника Земли «Молния», разработанного под руководством М. Ф. Решетнева в заправленном топливом состоянии имеет массу 93 кг, что неприемлемо для малых КА. [1]

Проведены предварительные расчёты некоторых параметров ТДУ малых космических аппаратов массой 50,80,100,120,150 кг. Двигатель работает в одноимпульсном режиме, время импульса 60 секунд, скорость КА составляет на низкой орбите 7,8 км/с, для свода с орбиты скорость условно снижается до 6 км/с. Движение летательного аппарата можно рассматривать как сумму поступательного движения, определяемого движением центра массы аппарата и вращением аппарата около этой точки как неподвижного. [2] Движение центра массы летательного аппарата определяется уравнением Ньютона в дифференциальном виде:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} + \vec{P}$$

Результатом решения дифференциального уравнения является конечная формула:

$$\vec{P} = \frac{m(V_{1K} - V_{KT})}{t - t_0}$$

где:  $\vec{P}$  – сила тяги ТДУ;

$\vec{F}$  – инерционная сила;

m – масса МКА;

$V_{1K}$  – первая космическая скорость;

$V_{KT}$  – космическая скорость торможения;

t-t<sub>0</sub> – время работы ТДУ

Полученные результаты вычислений силы тяги представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Полученные результаты вычислений силы тяги**

| Масса КА, кг | Сила тяги, кН |
|--------------|---------------|
| 50           | 1.5           |
| 80           | 2.4           |
| 100          | 3             |
| 120          | 3.6           |
| 150          | 4.5           |

Предварительная расчётно-аналитическая оценка способов свода МКА с околоземных орбит позволяет сформулировать общие выводы о тактико-технических характеристиках, требованиях к технологии изготовления и эксплуатации предлагаемой к разработке ТДУ:

1. В двигателе используется газообразное экологически чистое топливо: кислород O<sub>2</sub> (окислитель) и метан CH<sub>4</sub> (горючее). Компоненты топлива до начала эксплуатации заправляются в шар-баллоны и находятся в них под давлением P=10...18 МПа (100...180 кг/см<sup>2</sup>). Тяга двигателя рассчитывается в зависимости от высоты орбиты и массогаба-

ритных параметров КА. Давление в камере сгорания принимается в диапазоне  $P_k=1...2$  МПа ( $10...20$  кг/см<sup>2</sup>).

2. Двигатель изготавливается по аддитивной технологии 3D-печати из жаростойкого сплава типа Инконель 718.

3. Охлаждение камеры внутреннее. Возможно нанесение на внутренние поверхности камеры теплозащитного покрытия  $ZrO_2$ .

4. ТДУ при эксплуатации не подлежит ремонту и регулированию режимов работы, поскольку предназначена для работы в космическом пространстве в экстремальных условиях (космический вакуум, невесомость, резкие перепады температуры и т. д.).

5. Срок пребывания в работоспособном состоянии (состояние готовности к включению) должен превышать срок активного состояния конкретного космического аппарата.

6. В наземных условиях (ТДУ-КА) должна храниться в специальном контейнере, в котором должен поддерживаться стандартных для изделий ракетно-космической техники температурно-влажностный режим. Попадание в контейнер влаги, пылевидных частиц органического и неорганического происхождения исключается.

7. Заправка компонентами топлива должна производиться на космодроме, непосредственно в процессе подготовки КА к запуску.

8. Требования к маркировке и транспортировке ТДУ на космодром устанавливается в соответствии с отраслевой документацией ракетно-космической промышленности и конкретной конструкторской документацией (ТУ, РД) на космический аппарат.

9. В связи с отсутствием отечественных аналогов стоимостные характеристики вырабатываются в процессе проектирования, изготовления и испытаний ТДУ.

К настоящему времени разработана методика расчета и проектирования камеры ракетного двигателя, работающего на газообразных компонентах топлива (метан  $CH_4$  + кислород  $O_2$ ).

Структура расчётной методики состоит из следующих разделов:

- термодинамический расчет рабочего процесса;
- расчет смесеобразования в камере сгорания;
- расчет внутреннего охлаждения;
- газодинамический расчет камеры;
- расчет прочности камеры.

Разработана конструкция камеры двигателя, соответствующая техническому заданию и назначению тормозного ракетного двигателя (ТРД). Проведена топологическая оптимизация конструкции с целью ее изготовления методом SLM-печати. Разработана цифровая 3D-модель камеры и чертежно-графическая документация ТРД. [3]

На рисунках 1 и 2 представлены основные детали камеры двигателя, изготовленные методом SLM-печати (3D-печати) на принтере ASTRA 420 промышленным партнёром ООО «Полихром».



Рис. 1. Корпус камеры



Рис. 2. Смесительная головка

Программой дальнейших работ по разработке проекта ТДУ МКА предусмотрено проведение стендовых огневых испытаний на полигоне «Установо» СибГУ.

### **Библиографические ссылки**

1. Ракетные двигатели космических аппаратов : учеб. пособие / В. П. Назаров, В. Ю. Журавлев, М. В. Краев, Е. М. Краева; под ред. В. П. Назарова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. — Красноярск, 2015. — 200 с.
2. Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1979. 83 с.
3. Акбулатов Э. Ш., Назаров В. П., Герасимов Е. В. Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 682–696. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-682-696.

© Наумов К. В., Файзуллин Р. Р., Матвеев М. В., Васильева Д. А., Рябков Д. В. 2025

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ИСПЫТАНИЯ ТОРМОЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. П. Назаров\*, К. В. Наумов, Д. А. Васильева, Д. В. Рябков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: nazarov@sibsau.ru

*Рассмотрены основные результаты реализации инициативного научно-образовательного проекта по созданию тормозного ракетного двигателя для свода с околоземных орбит малых космических аппаратов в определенном диапазоне массово-габаритных параметров. Показана возможность изготовления тормозных двигателей с использованием аддитивных технологий 3D-печати. Представлены некоторые результаты контроля качества и испытаний экспериментальных изделий.*

*Ключевые слова: тормозные ракетные двигатели, малые космические аппараты, аддитивные технологии 3D-печати, исследования, испытания.*

Создание тормозных двигательных установок (ТДУ) для свода с орбит и последующей утилизацией в плотных слоях атмосферы малых космических аппаратов (МКА) является актуальной научно-технической задачей в области ракетного двигателестроения. В студенческом конструкторском бюро «Факел» СибГУ имени М. Ф. Решетнева проводится работа по реализации инициативного научно-исследовательского проекта, направленного на выбор оптимальных вариантов и практическую разработку модельных образцов ТДУ для МКА определенного типоразмера. С целью разработки ТДУ с приемлемыми массово-габаритными и энергетическими характеристиками для свода с околоземных орбит в диапазоне высот от 200 км до 700 км малых КА массой от 100 кг до 800 кг проведен анализ применения прогрессивных аддитивных технологий SLM-печати в производстве отечественных и зарубежных ракетных двигателей. Сделан вывод о возможности и целесообразности проведения проектно-конструкторских и экспериментальных работ по созданию ТДУ для малых космических аппаратов с вышеуказанными тактико-техническими характеристиками и изготовлением камеры двигателя методом аддитивной технологии.

Таким образом в качестве предмета и объекта исследования рассматривается ракетный двигатель малой тяги (РДМТ), работающий на экологически безопасных компонентах топлива: газообразный кислород  $O_2$  (окислитель) и газообразный метан  $CH_4$  (горючее).

Известно, что создание РДМТ во многом базируется на результатах экспериментальной отработки опытных образцов двигателей и эмпирической интерпретации теоретических закономерностей гидрогазодинамики и химической кинетики. [1]

Проектирование, термодинамические и газодинамические расчеты камеры двигателя-демонстратора выполнялись студентами Шестовым Н. и Бривкальным П. по учебным методикам кафедры двигателей летательных аппаратов (ДЛА) СибГУ им М. Ф. Решетнева и рекомендациям АО «КБхиммаш им. А. М. Исаева» с применением прикладных программ SolidWorks, Mathcad.

Разработанный двигатель-демонстратор имеет следующие технические параметры:

Тяга  $P = 200$  Н;

Массовый расход окислителя  $\dot{m}_o = 0,04316$  кг/с;

Массовый расход горючего  $\dot{m}_f = 0,02439$  кг/с;

Давление в камере сгорания  $p_k = 1$  МПа;

Давление на срезе сопла  $p_a = 0,00085$  МПа;

Удельный импульс двигателя  $J_y = 2960$  м/с.

Конструкция камеры двигателя выполнена в виде двух моноблоков – смесительной головки и корпуса камеры, соединяемых между собой аргонодуговой сваркой. Возможности SLM-технологии позволили выполнить сложную конструкцию смесительной головки без выполнения сборочных единиц – форсунок, топологическая оптимизация которых обеспечила возможность их аддитивной печати в форме отверстий со струйным и тангенциальным (центробежным) подводом компонентов в зону распыливания и смешивания.

Изготовление двигателя по технологии 3D-печати выполнялось индустриальным партнером вуза ООО «Полихром» на принтере ASTRA 420, который был разработан и изготовлен на данном предприятии.

Особенностью принтера ASTRA 420 стала реализация инновационных решений в динамической модуляции лазерного пятна с возможностью корректировки мощности лазера, что позволяет достичь высоких скоростей построения деталей. 3D-принтер ASTRA 420 может быть использован для решения сложных производственных задач, при изготовлении 3D-деталей и проведении научно-исследовательских работ.

С целью повышения практической ориентации научно-образовательного проекта, приближения его к требованиям реального производства, основные проектно-конструкторские и производственно-технологические мероприятия проекта выполнялись с учетом рекомендаций «Системы технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий», которая принята в аэрокосмической отрасли. В частности, использовалась общая методология технологической подготовки производства, изложенная в ОСТ 92-4718-86 «Организация технологической отработки и постановки на производство новых изделий» и ОСТ 92-4928-90 «Основные положения по организации и управлению процессом технологической подготовки производства». [2]

В соответствии с вышеизложенной методологией проведена проверка технических возможностей принтера путем 3D-печати опытных образцов из модельного материала Силумин РС-300. В результате проведенных исследований установлено, что характеристики принтера обеспечивают реализацию инновационных решений и динамической модуляции лазерного пятна с возможностью корректировки мощности лазера, что позволяет достичь высоких скоростей построения деталей и, следовательно, приступить к печати камеры из жаростойкого высокопрочного материала.

Для изготовления корпуса камеры и смесительной головки РДМТ был выбран порошок Инконель 718 (Inconel 718). Известно, что данный материал разработан и запатентован в США автором Айзелштайном (Eiselstein) в 1962 г. [3] и в настоящее время широко используется в аэрокосмической и машиностроительной промышленности зарубежных стран. В отечественной промышленности для аддитивных технологий применяется порошок ПР-08ХН53БМТЮ ТУ 1479-704-5689-2016, который по своему химическому составу является аналогом сплава Инконель 718. Порошок изготавливают методом распыления расплава инертным газом – азотом высокого давления. Форма частиц порошка преимущественно сферическая. Изготовитель ООО «Гранком».

Предварительно была проведена исследовательская работа по изучению характеристик плавления данного порошка и подбору режимов печати. Подбирались режимы печати одиночных треков и сплошной печати образцов, а затем был отпечатан первый образец корпуса и смесительной головки РДМТ.

Испытание первого образца выявило наличие пористости и негерметичности в области критического сечения. Перед печатью второго образца была предпринята серия дополнительных опытов по подбору оптимального режима печати критического сечения в



отдельности. В результате, этот сегмент был ещё раз поделен на две равные части, которые печатались с двумя разными паттернами. Применение этого подхода при печати рабочего образца показало положительный результат. Пористость значительно уменьшилась по всему объёму образца.

Формообразование деталей камеры представляет собой начальный и вместе с тем наиболее ответственный этап общего технологического процесса изготовления РДМТ. По некоторым сведениям, основанным на опыте производства экспериментальных изделий ракетно-космической техники, в том числе опыте авторов настоящей статьи, расходы на послепечатную обработку могут составлять более одной трети общей суммы трудозатрат на изготовление 3D-печатных деталей и сборочных единиц.

Технология послепечатной обработки разрабатывается с учетом физико-химических, механических, технологических и других свойств исходного материала Инконель 718. [4]

Изготовителем порошкообразного материала рекомендована термическая обработка деталей, изготовленных методом 3D-печати, – закалка в вакууме с последующим охлаждением в печи с сохранением вакуумной среды и дальнейшей обдувкой аргоном. Термообработке подвергались отпечатанные корпуса камер, смесительные головки и пластинчатые образцы.

Термообработка проводилась в вакуумной печи SECO/WARWICK 10 VPT-4050/48 HV предприятия-партнера АО «Красмаш». Вакуумная печь сертифицирована и аттестована на выполнение аналогичных видов термообработки. Температура термообработки  $t = 1060\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдержка 60 мин.

После охлаждения деталей до стандартной комнатной температуры  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , они были подвергнуты абразивной обработке (пескоструйная обработка) с использованием искусственного абразива – электрокорунда F-120 при давлении воздушно-абразивной смеси  $P = 4\text{ кг/см}^2$  в течение 5–8 мин.

Проведено исследование влияния процесса 3D-печати на химический состав исходного материала. Исследованию подвергались нетермообработанные и прошедшие термообработку печатные образцы. Исследование проводилось в масс-спектрометрической лаборатории АО «Красмаш» на спектрометре 67A1053 HITACHI PMI-MASTER UVR. В результате исследований установлено, что химический состав образцов соответствует требованиям, заявленным изготовителем в сертификате материала Инконель 718, а также соответствует требованиям зарубежного стандарта AMS 5663M. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс селективного лазерного плавления и последующая высокотемпературная термообработка не оказывают влияния на химический состав материала, не приводят к изменению баланса легирующих элементов сплава.

С целью идентификации пространственных дефектов материала отпечатанных изделий проведен рентгенографический контроль корпусов камер двигателя. Исследования проводились на участках, доступных для контроля на рентгеновском аппарате YXLON MG-103. При этом в зоне сопла выявлены несплошности в виде отдельных точечных пустот размерами 0,3–1 мм и вытянутых вдоль слоев печати кольцевых несплошностей интенсивностью 0,1–0,2 мм с ухудшением качества печати в зоне критического сечения сопла и увеличением пористости на участках размерами 0,5–2 мм.

Контроль шероховатости внутренних и наружных поверхностей корпуса камеры проводился на приборе SurfTest SJ-201, имеющем свидетельство о поверке от государственного регионального центра стандартизации, метрологии и испытаний. В результате измерений получены фактические значения шероховатости в диапазоне  $Ra = 14,4\text{--}23,84\text{ мкм}$ , которые значительно превышают принятые в ракетном двигателестроении параметры шероховатости внутренних поверхностей камер жидкостных ракетных двигателей ( $Ra = 2,5\text{--}3,6\text{ мкм}$ ). Таким образом, следующей задачей разработки оптимальной

технологии послепечатной обработки камеры РДМТ становится выбор метода повышения качества поверхностей изделия.

Одним из эффективных и апробированных методов в серийном производстве оболочек камер ракетных двигателей является электрохимическое полирование (далее – электрополирование) которое основано на интенсивном растворении микровыступов шероховатостей поверхности и замедленном растворении впадин. Процесс обработки производился в катодно-анодной ванне с раствором серной кислоты ( $H_2SO_4$ ), фосфорной кислоты ( $H_3PO_4$ ) и хромового ангидрида ( $CrO_3$ ) в определенной концентрации каждого вещества.

В соответствии с программой исследований проведено определение физико-механических параметров и характеристик отпечатанных изделий (предел прочности  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , модуль упругости  $E$  и др.), замер твердости на образцах, виброиспытания, испытания на прочность и герметичность. Описание методик и анализ результатов данных исследований в настоящей статье не приводится. Отдельно следует отметить, что при испытаниях на герметичность первого из отпечатанных образцов корпуса камеры обнаружена негерметичность в зоне критического сечения. Это подтверждает выводы о развитой пористости материала данного образца при рентгенографическом контроле. Как показано в одном из предыдущих разделов статьи, проведена корректировка режимов печати, обеспечивающая герметичность изделий, печатавшихся далее.

В завершении технологического процесса послепечатной обработки проведена механическая подготовка стыковочных поверхностей и ручная аргонодуговая сварка корпуса камеры и смесительной головки. Сварка выполнялась неплавящимся вольфрамовым электродом с присадочной проволокой диаметром  $\varnothing 1,5$  мм, отпечатанной из порошка Inconel 718 на 3D-принтере. В связи с отсутствием рекомендаций в нормативно-технологической документации отрасли по сварке печатных деталей из данного материала, режимы сварки отрабатывались на печатных плоских и цилиндрических образцах-имитаторах.

При создании новых конструкций ракетных двигателей, разработке и внедрении инновационных технологий их промышленного производства проводятся стендовые огневые испытания, которые являются основным средством проверки обоснованности принятых конструкторских и технологических решений, контроля заданных проектных параметров и характеристик рабочего процесса, оценки работоспособности и надежности изделий [5].

С этой целью при реализации проекта разработан и изготовлен испытательный стендовый комплекс на территории загородного полигона «Установо» (Рис. 1).



Рис. 1. Общий вид рабочей зоны стендового испытательного комплекса

В состав испытательного стенда входят следующие системы:

- система подачи компонентов топлива. Состоит из двух частей: системы подачи окислителя и системы подачи горючего. Конструктивно данные системы выполнены раздельно в отсеках окислителя и горючего. К отсекам предъявляются требования по герметичности систем, применению материалов, не вступающих в реакцию с компонентами топлива и исключающих искрообразование в ходе работы стенда. В систему входят два баллона высокого давления с газообразным кислородом и газообразным метаном, магистрали для подвода компонентов топлива, выполненные из нержавеющей стали, и газовые редукторы;
- система зажигания компонентов топлива в камере сгорания. Состоит из блока электропитания и свечи зажигания 6213 NGK SILMAR9A9S;
- система измерений. Данная система является важнейшей при проведении стендовых испытаний, так как именно от результатов измерения широкой номенклатуры параметров двигательной установки определяются как условия проведения стендовых испытаний, так и работа двигателя. В неё входят тягоизмерительное устройство, датчики давления и расхода компонентов.
- система управления. Предназначена для автоматического запуска, изменения режимов работы и останова, автоматического контроля за некоторыми основными параметрами двигателя. При достижении критических значений подаёт сигнал, а также обеспечивает, в случае необходимости, аварийный останов, автоматическое управление клапанами магистралей и поддержание заданных давлений. При выполнении подготовительных и заключительных операций используется ручное управление элементами стенда;
- система безопасности. Взрыво- и пожаробезопасность стенда заключается в разделении стенда на отсеки камеры, баллонов с кислородом, баллонов с метаном, магистралей управления, оборудования пожаротушения, а также управления экстренным остановом.

В соответствии с разработанной и утвержденной циклограммой испытаний проведено пять включений продолжительностью рабочего цикла 1,5 с с последующей продувкой магистралей воздухом в течение 180–300 с. Зафиксировано устойчивое возникновение факела на срезе сопла, стабильная отсечка подачи компонентов топлива и прекращение горения смеси компонентов в камере сгорания. (Рис. 2)



Рис. 2. Огневые испытания РДМТ

Тягоизмерительным устройством проведено измерение тяги двигателя, которая приблизительно соответствует расчетному значению  $P = 200 \text{ Н}$  (20 кг). С целью гарантированного обеспечения безопасности персонала и стендового оборудования давление подачи газообразных компонентов на входе в двигатель было снижено на 35–40 % по сравнению с расчетным давлением в камере сгорания ( $p_k = 1 \text{ МПа}$ ). При этом достигну-

тое значение тяги при пониженном давлении следует объяснить работой сопла в режиме перерасширения, так как барометрическое давление окружающей среды (условно  $p_n = 0,1$  МПа) значительно превышает расчетное давление газового потока на срезе сопла ( $p_a = 0,00085$  МПа). [6]

После демонтажа был проведен визуальный контроль состояния поверхностей двигателя (визуальная дефектация изделия – по отраслевой терминологии). При внешнем осмотре наружных и внутренних поверхностей двигателя (в доступных местах) с использованием локальной подсветки и стандартной технической лупы четырехкратного увеличения не обнаружено повреждений поверхностей, препятствующих повторному проведению испытаний.

В процессе реализации научно-образовательного проекта выполнен значительный объем научно-исследовательских, опытно-конструкторских и учебно-лабораторных работ по изучению и практическому применению инновационных аддитивных технологий, обладающих большим потенциалом для ускоренного развития ракетно-космической промышленности. Показана принципиальная возможность создания тормозных ракетных двигателей малой тяги для свода с околоземных орбит космических аппаратов в определенном диапазоне массово-габаритных характеристик, относящихся по современной отраслевой классификации и малым беспилотным аппаратам.

Реализация научно-исследовательского проекта осуществляется при поддержке благотворительного фонда известного государственного и общественного деятеля, предпринимателя, почетного гражданина Красноярского края Х. М. Совмена, а также при поддержке и личном участии ректора СибГУ Э. Ш. Акбулатова.

#### Библиографические ссылки

4. Ракетные двигатели космических аппаратов : учеб. пособие / В. П. Назаров, В. Ю. Журавлев, М. В. Краев, Е. М. Краева; под ред. В. П. Назарова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. — Красноярск, 2015. — 200 с.
5. Акбулатов Э. Ш., Назаров В. П., Герасимов Е. В. Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 682–696. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-682-696.
6. Пат. 3046108A US. Age-hardenable nickel alloy / Eiselstein H. L. № US773702A; заявл. 13.11.1958 ; опубл. 24.07.1962. 10 с.
7. Логачева А. И. Аддитивные технологии изделий ракетно-космической техники: перспективы и проблемы применения // Технология легких сплавов. 2015, № 3. С. 39–44.
8. Яцуненко В. Г., Назаров В. П., Коломенцев А. И. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. 248 с.
9. Имитационное моделирование условий стендовых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги / В. П. Назаров, В. Ю. Пиунов, К. Ф. Голиковская, Л. П. Назарова // Решетневские чтения: материалы XXVI Международной научно-практической конференции. Красноярск, 2022. С. 191–192

© Назаров В. П., Наумов К. В., Васильева Д. А., Рябков Д. В., 2025

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ-ДЕМОНСТРАТОРА ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

В.И. Шестерня, В.О. Хоменко, Д.А. Троцкий\*, Е.Е. Захарова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: Sibgu2020@yandex.ru

*В работе представлены исходные данные двигателя, выбор материалов, геометрические параметры и особенности конструкции. Проведены расчёты теплообмена, численное моделирование и оптимизация конструкции для аддитивного производства. Особое внимание уделено анализу охлаждающей системы, минимизации массы и повышению эффективности печати методом селективного лазерного сплавления. Исследованы режимы работы двигателя в условиях перерасширения сопла, предложены конструктивные решения для улучшения его характеристик.*

*Ключевые слова: ракетный двигатель, камера сгорания, аддитивные технологии, теплообмен, численное моделирование, оптимизация конструкции, охлаждение, газодинамика.*

Развитие ракетно-космических технологий требует создания надежных и эффективных двигательных установок. Одним из ключевых этапов в проектировании новых двигателей является разработка и испытание их камер сгорания. Камера ракетного двигателя-демонстратора предназначена для экспериментальных стендовых испытаний, позволяющих исследовать процессы горения, теплообмена и прочностных характеристик конструкции. Исходные данные ракетного двигателя – демонстратора приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Исходные данные

|                   |                                                    |
|-------------------|----------------------------------------------------|
| Тяга              | $P = 200 \text{ Н}$                                |
| Окислитель        | $\text{O}_2$ – газ (кислород), $T = 298 \text{ К}$ |
| Горючее           | $\text{CH}_4$ – газ (метан), $T = 298 \text{ К}$   |
| Давление камере   | $p_k = 1 \text{ МПа}$                              |
| Давление на срезе | $p_a = 0,00085 \text{ МПа}$                        |
| Давление наружное | $p_n = 0,0005 \text{ МПа}$                         |

В качестве материала смесительной головки и камеры двигателя выбран материал Inconel 718. В результате проведения термодинамического расчета определены: геометрические размеры камеры двигателя, свойства продуктов сгорания, массовые расходы компонентов и иные, необходимые для дальнейшего расчета охлаждения, параметры, а также построен контур камеры двигателя.

Таблица 2 – Геометрические размеры камеры

|              |       |       |       |     |     |       |                |                    |
|--------------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|----------------|--------------------|
| Размер       | $D_k$ | $D^*$ | $D_a$ | $R$ | $r$ | $R_l$ | $L_{\text{ц}}$ | $L_{\text{св.зв}}$ |
| Значение, мм | 35    | 11,7  | 106   | 8,8 | 1,2 | 35    | 62             | 122                |

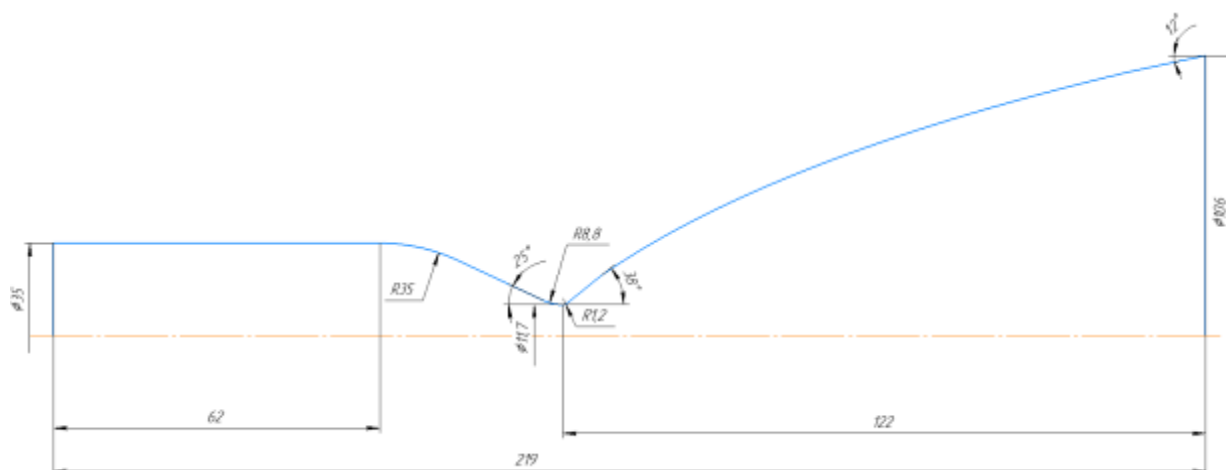


Рис. 1 – Газодинамический профиль камеры двигателя

В ходе расчета охлаждения определены коэффициенты теплоотдачи, тепловые потоки, распределение температуры охладителя и огневой стенки камеры, другие параметры. Помимо этого, для точности результатов проведено численное моделирование. Предельных значений температура стенки не достигает. Также в результате расчетов установлено, что суммарные потери давления при движении охладителя по тракту не превышают предельных значений.

В качестве основных форсунок смесительной головки была выбрана комбинированная схема, состоящая из центробежной форсунки горючего и струйной форсунки окислителя с коническим входом. Так же для обеспечения необходимого теплового режима были введены струйные форсунки горючего на создание пристеночного низкотемпературного слоя и струйные форсунки горючего для устранения высокотемпературных обратных токов.

На основании проведенных расчетов созданы 3D-модели деталей двигателя, которые удовлетворяют требованиям аддитивных технологий и условиям сборки. Проведена оптимизация конструкции для минимизации использования поддержек в процессе 3D-печати деталей двигателя, для получения более равномерной шероховатости в соответствии с максимальными углами печати. В разрабатываемой конструкции углы нависающей поверхности являются оптимальными для высокого качества печатаемой поверхности. Каналы спроектированы с минимальным количеством нависающей массы для печати без поддержек внутри охлаждающего тракта.

Так же при оптимизации конструкции следует использовать скосы, фаски или скругления на углах, а также по возможности провести топологическую оптимизацию с целью уменьшения веса и объема разрабатываемого изделия. На основании вышеперечисленных требований построены 3D-модели камеры двигателя и смесительной головки.

В ходе реализации проекта «Разработка, изготовление методом селективного лазерного сплавления и испытания ракетного двигателя малой тяги-демонстратора, работающего на экологически чистом топливе» проведены стендовые огневые испытания ракетного двигателя малой тяги, и установлено, что двигатель работал в режиме перерасширения, когда давление окружающей среды значительно превышает расчетное давление газового потока на срезе сопла [1]. При работе двигателя в режиме перерасширения происходит отрыв потока (рис. 2), вследствие чего сверхзвуковая часть сопла работает в нерасчетном режиме и не обеспечивает заданных энергетических параметров.





Рис. 2 – Работа РМДТ в режиме перерасширения

С целью адаптации параметров испытаний и предотвращения отрыва потока при проведении исследовательских испытаний в атмосферных условиях следует уменьшить длину сверхзвуковой части сопла камеры РМДТ. Проведено несколько исследований в программном пакете SolidWorks. На рисунке 3 представлен результат численного моделирования рабочего процесса разработанной камеры РМДТ со степенью расширения сопла  $F = 80$ . Результат численного моделирования совпадает с результатом натурных испытаний: в обоих случаях заметен отрыв потока [2].

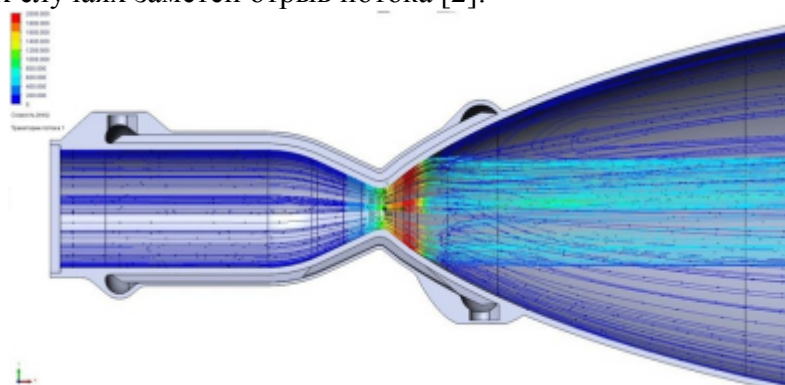


Рис. 3 – Траектория продуктов сгорания (образец с  $F = 80$ )

На рисунках 4-6 представлены результаты численного моделирования рабочего процесса камер со степенью расширения сопла  $F = 25$ ,  $F = 10$  и  $F = 5$  соответственно.

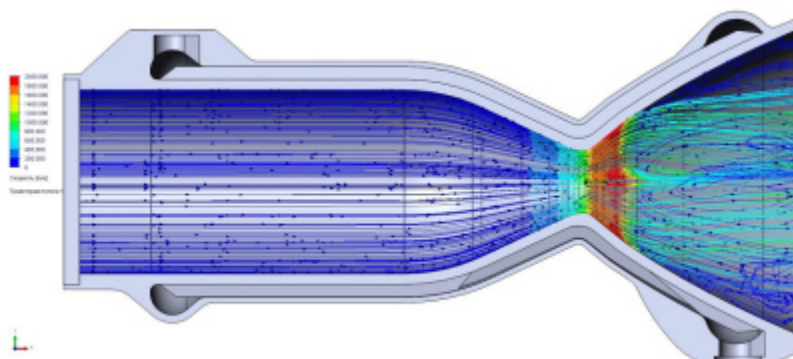


Рис. 4 – Траектория продуктов сгорания (образец с  $F = 25$ )

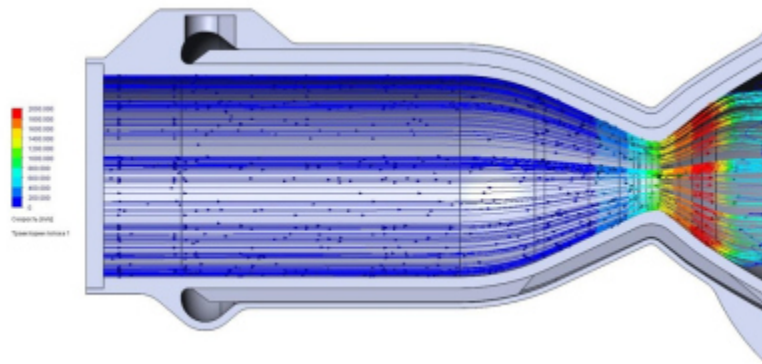


Рис. 5 – Траектория продуктов сгорания (образец с  $F = 10$ )

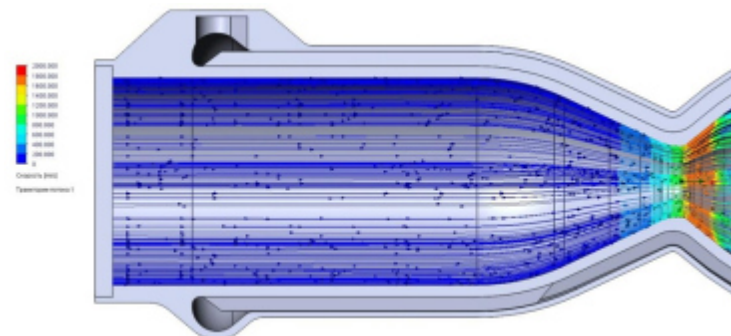


Рис. 6 – Траектория продуктов сгорания (образец с  $F = 5$ )

Отрыва потока не происходит при степени расширения сопла  $F = 5$ , следовательно, конструкция камеры (рис. 6) является оптимальным вариантом для проведения исследовательских испытаний в наземных условиях. Для проведения дополнительных исследований к печати планируется образец камеры РДМТ со степенью расширения  $F = 10$  [2]. На рисунке 7 представлен прототип камеры двигателя со степенью расширения сопла  $F = 10$ .

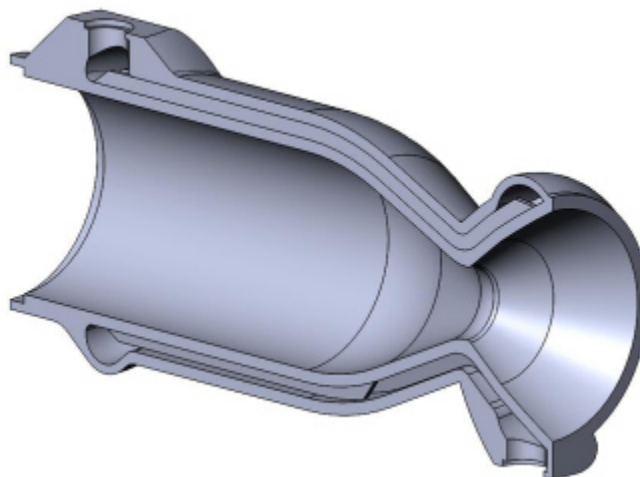


Рис. 7 – Прототип камеры двигателя ( $F = 10$ )

При проведении сравнительного анализа расчетов охлаждения для численного моделирования создавался образец камеры с диаметрально противоположными подводами охладителя, из-за чего распределение охлаждающего компонента в тракте охлаждения является неравномерным, что сказывается на результатах расчета теплового состояния стенки камеры двигателя. Для более равномерного распределения охладителя необхо-



димо сделать два подвода на одном коллекторе, либо изменить площадь самого коллектора. Так как первый вариант приведет к существенному увеличению массы изделия, выбран вариант с изменением площади коллектора. Для уменьшения массы двигателя изменена конструкция подводов охладителя. Оптимизация проведена в соответствии рекомендациям специалистов АО «КБхиммаш им. А.М. Исаева». На рисунке 8 представлена новая конструкция камеры двигателя. Для улучшения процесса теплоотдачи уменьшена толщина огневой стенки (см. рис. 9).

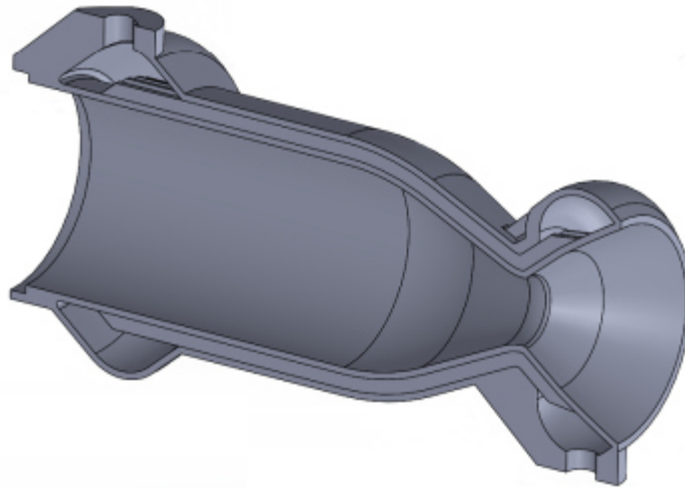


Рис. 8 – Новая конструкция камеры двигателя

С целью сокращения технологического процесса при производстве РДМТ планируется печать камеры двигателя вместе со смесительной головкой [3]. Для верификации результатов численного моделирования будут проведены стендовые огневые испытания.

#### **Библиографические ссылки**

1. Акбулатов Э. Ш., Назаров В. П., Герасимов Е. В. Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 682–696. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-682-696.
2. Шестерня В. И. Численное моделирование рабочего процесса образцов камеры РДМТ с различной степенью расширения сопла // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов X Международной научнопрактической конференции, посвященной Дню космонавтики. Красноярск, 2024. С. 274-276.
3. Алексеенко В. В., Кирюшкин Г. А. Анализ и выбор конструктивных схем охлаждения камеры ракетного двигателя малой тяги, для изготовления методом 3D-печати // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов X Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. Красноярск, 2024. С. 219-221.

© Шестерня В.И., Хоменко В.О., Троцкий Д.А., Захарова Е.Е., 2025

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ- ДЕМОНСТРАТОРА

В.П. Назаров, В.И. Шестерня, В.О. Хоменко, Д.А. Троцкий\*, Е.Е. Захарова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика  
М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: Sibgu2020@yandex.ru

*В работе рассматривается методика расчета автономной системы тепловой защиты экспериментальной камеры ракетного двигателя-демонстратора. Приведены основные аспекты термодинамического анализа, расчета теплообмена и выбора материалов для обеспечения надежной работы камеры двигателя в условиях высокотемпературных нагрузок.*

*Ключевые слова: тепловые потоки, теплообмен, температура огневой стенки, охладитель*

Разработка автономных систем тепловой защиты является одной из ключевых задач при проектировании ракетных двигателей малой тяги. Камера сгорания таких двигателей испытывает экстремальные тепловые нагрузки, что требует применения надежных и эффективных решений в области теплообмена. В данной работе представлена методика расчета автономной системы тепловой защиты для экспериментальной камеры ракетного двигателя – демонстратора, изготовленной методом селективного лазерного сплавления (SLM)[1].

В результате проведения термодинамического расчета определены: геометрические размеры камеры двигателя, свойства продуктов сгорания, массовые расходы компонентов и иные, необходимые для расчета охлаждения, параметры. Исходные данные приведены в таблице 1.

Исходные данные термодинамического расчета камеры двигателя

Таблица 1

| Название параметра                                                    | Обозначение   | Размерность |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------|-------------|
| Окислитель                                                            | $O_2$ -газ    | –           |
| Горючее                                                               | $CH_4$ -газ   | –           |
| Тяга двигателя / число камер                                          | $P/n$         | Н           |
| Давление в камере сгорания                                            | $P_k$         | МПа         |
| Давление на срезе сопла                                               | $P_a$         | МПа         |
| Давление окружающей среды                                             | $P_n$         | МПа         |
| Суммарный расход топлива                                              | $\dot{m}$     | кг/с        |
| Температура продуктов сгорания в камере сгорания (при $\alpha_{sr}$ ) | $T_k$         | К           |
| Коэффициент избытка окислителя в пристеночном слое                    | $\alpha_{pr}$ | –           |
| Температура газа в пристеночном слое                                  | $T_{pr}$      | К           |
| Кинематическая вязкость газа в пристеночном слое                      | $\mu_{pr}$    | мкПа·с      |

|                                                             |                             |                   |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Материал камеры двигателя                                   | Inconel 718                 |                   |
| Расход охладителя (вода)                                    | $\dot{m}_{ohl} (\dot{m}_g)$ | кг/с              |
| Допустимая температура огневой стенки со стороны газа       | $T_{st.g.max}$              | К                 |
| Допустимая температура огневой стенки со стороны охладителя | $T_{st.l.max}$              | К                 |
| Плотность компонента (при температуре 298К)                 | $\rho$                      | кг/м <sup>3</sup> |
| Коэффициент избытка окислителя средний                      | $\alpha_{sr}$               | —                 |

Методика расчета геометрических параметров камеры двигателя включает разбиение её контура на 24 сечения, одно из которых совпадает с критическим. Для каждого сечения вычисляются относительный диаметр  $D/D_{кр}$ , площадь  $F$  и её относительное значение  $F/F_{кр}$ , результаты заносятся в таблицу и используются для построения графика (рис. 1).

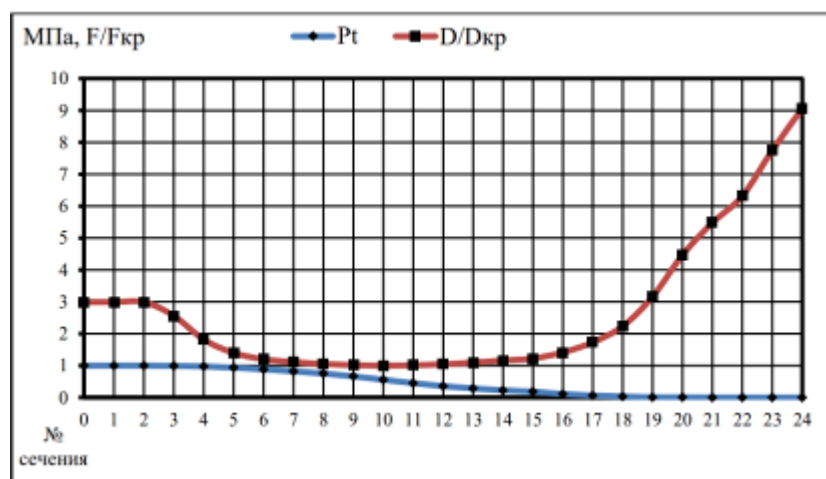


Рис. 1 – График изменения давления и относительного диаметра по длине камеры двигателя

Давление  $p_t$  определяется подбором в программном модуле [2], контролируя, чтобы скорость в докритической части сопла не превышала критическую  $U_{кр}$ .

Расчета оребрения включает задание исходных данных (толщина стенок  $\delta_{st}$ , высота  $h_r$  и шаг ребер  $t_N$ ), определение средних диаметров критического сечения  $D_{кр,ср}$ , расчет количества ребер  $n_{г,кр}$  и их удвоения при увеличении диаметра. Далее вычисляются параметры охлаждающего тракта: шаг оребрения  $t$ , площадь проходного сечения  $f$  и гидравлический диаметр  $d_g$ . После этого проверяется скорость охлаждающей жидкости  $U_{l,пр}$ , и при необходимости корректируются параметры. Расчет повторяется для всех сечений, результаты заносятся в таблицу.

Параметры продуктов сгорания вдоль камеры двигателя определяются с помощью программного модуля [2], где рассчитываются температура  $T$ , скорость  $U$  и теплоемкость  $C_p$  для каждого сечения на основе полного давления  $p_t$ . Температура торможения  $T_g$  вычисляется с учетом температуры продуктов сгорания. В случае, когда температура продуктов сгорания в текущем сечении  $T$  превышает значение ранее принятой температуры потока в пристеночном слое  $T_{пр}$ , то в дальнейших расчетах для данного сечения необходимо использовать температуру пристеночного слоя. Динамическая вязкость  $\mu_t$  определяется по температуре торможения продуктов сгорания  $T_g$  или температуре продуктов сгорания в пристеночном слое  $T_{пр}$ . Полученные данные заносятся в таблицу, а результаты визуализируются на графиках (рис. 2-3).

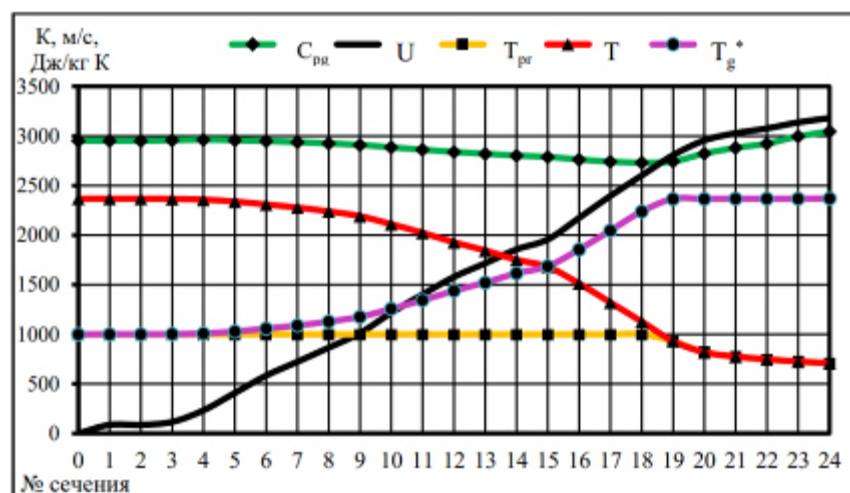


Рис. 2 – График изменения основных параметров продуктов сгорания

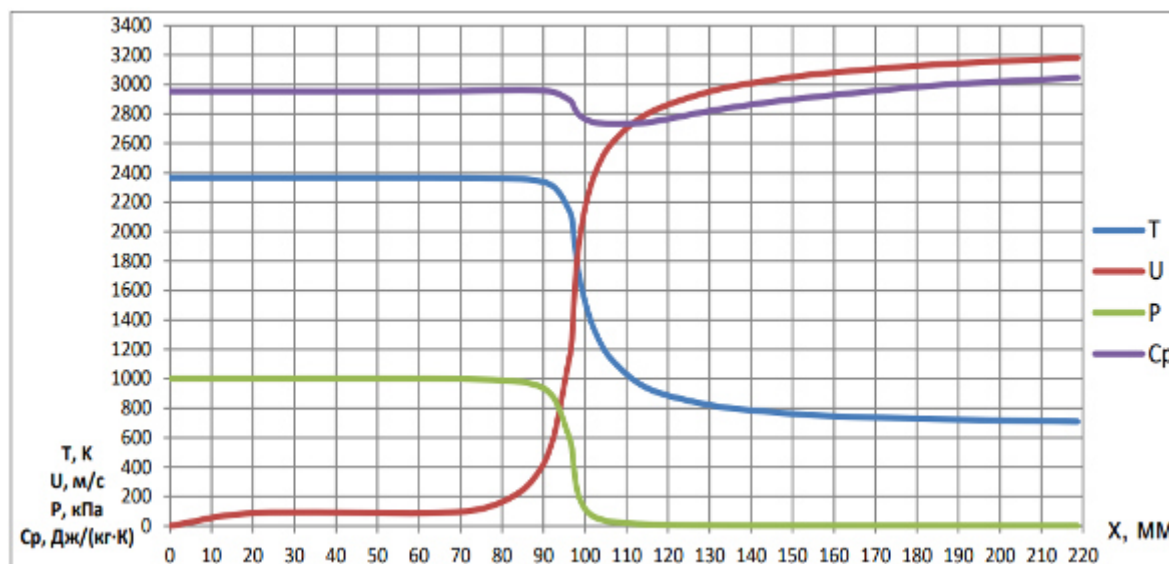


Рис. 3 – График изменения  $T$ ,  $U$ ,  $p$  и  $C_p$  по длине камеры двигателя

Для расчета конвективных тепловых потоков в камере двигателя сначала задается условная температура огневой стенки  $T_{st,y}$ , после чего вычисляется средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha_g$ , который используется для нахождения удельного конвективного теплового потока  $q_k$ . Этот поток определяется как произведение среднего коэффициента теплоотдачи  $\alpha_g$  и разницы температур газа  $T_g$  и стенки  $T_{st,y}$ . Для расчета лучистых тепловых потоков в камере сгорания определяют парциальное давление  $H_2O$  и  $CO_2$  [3], длину пути луча  $l_g$  для камеры, и излучательную способность водяного пара  $\epsilon_{h_2o}$  и продуктов сгорания  $\epsilon_g$ . Затем рассчитывают удельный лучистый тепловой поток  $q_l$ . Этот поток зависит от относительного диаметра камеры  $D/D_{кр}$  и различается для разных ее частей. Окончательные результаты заносятся в таблицу, после чего строится график изменения тепловых потоков по длине камеры двигателя (рис. 4).

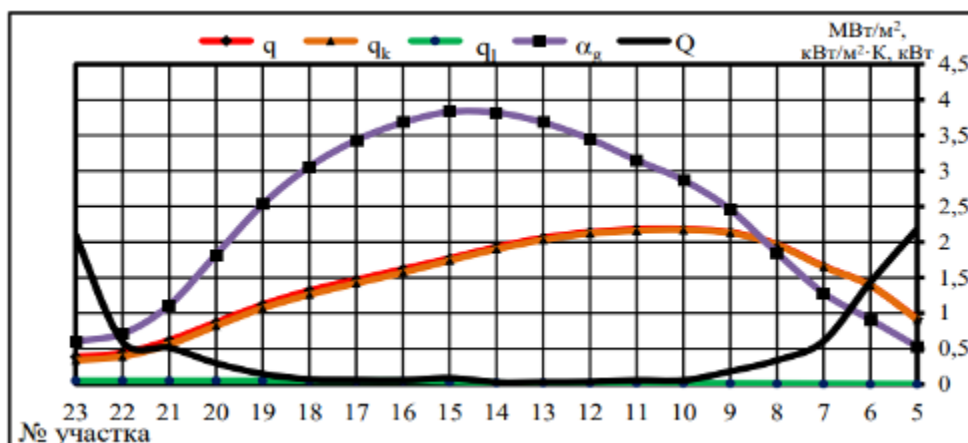


Рис. 4 – Изменение тепловых потоков по длине камеры двигателя

Расчет температуры охладителя начинается с первого участка (места подвода охладителя), для этого необходимо определить температуру на входе в систему проточного охлаждения [2]. В дальнейших расчетах температура на входе в участок, равна температуре на выходе из предыдущего участка. Температура на входе в первый участок задается 298 К. Определяется удельная теплоемкость охладителя  $C_{pl}$  и рассчитывается прирост температуры на участке  $\Delta T_1$ , используя удельную теплоемкость охладителя и тепловую нагрузку  $Q$ . Температура на выходе из участка  $T_{12}$  и средняя температура охладителя  $T_1$  рассчитываются итерационно для каждого участка, начиная с температуры на входе. Этот процесс повторяется для всех участков, что позволяет определить температурное распределение охладителя по всей длине камеры.

Для определения коэффициента теплоотдачи охладителя  $\alpha$ , сначала определяют его теплофизические свойства на участке: удельная теплоемкость  $C_{pl,sg}$ ; теплопроводность  $\lambda$ ; вязкость  $\mu$ ; плотность  $\rho$ . Затем вычисляют среднюю скорость охладителя на участке  $U_{l,pr}$ . На основе этих данных коэффициент теплоотдачи определяется с использованием уравнения, включающего теплофизические параметры и скорость охладителя.

Расчет коэффициента оребрения тракта охлаждения начинается с определения критерия БИО  $Bi$ , который представляет соотношение конвективной теплоотдачи и теплопроводности материала. Следующим шагом определяется теплогеометрический аргумент  $\psi$ , на основании которого находится показатель эффективности одиночного прямого ребра  $E$ . Коэффициент оребрения на участке  $\eta_r$  вычисляется с учетом эффективности одиночного прямого ребра и приводит к определению действительного коэффициента теплоотдачи к охладителю, скорректированного на оребрение. Окончательные результаты расчетов заносятся в таблицу и представляются в виде графика (рис. 5).

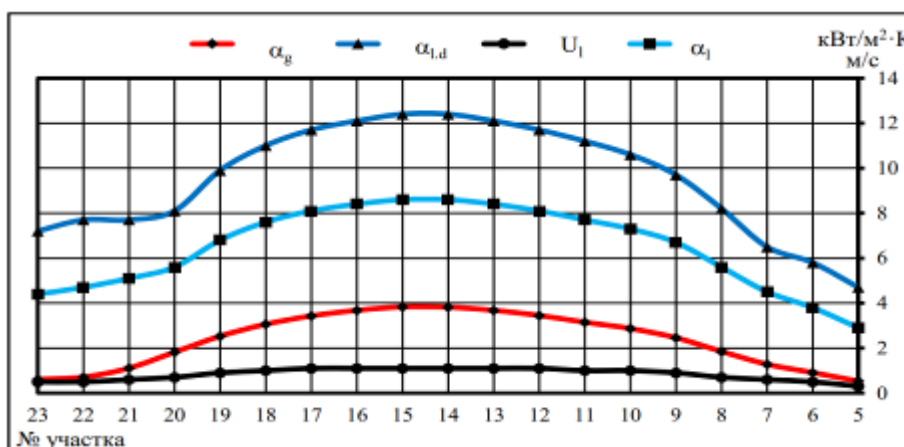


Рис. 5 – Изменение коэффициентов теплоотдачи по длине камеры двигателя

Методика расчета температуры огневой стенки основывается на равенстве тепловых потоков, воспринятых стенкой из камеры, и отданных стенкой. Температура огневой стенки определяется из системы уравнений, включающей коэффициент теплоотдачи  $\alpha_g$ , температуру газа  $T_g$  и стенки  $T_{st.g}$ , лучистый тепловой поток в стенку камеры  $Q_L$ . Эти уравнения решаются относительно температуры стенки  $T_{st.g}$ . Графическое решение представляется как точка пересечения графиков тепловых потоков. Важно учитывать относительное отклонение расчетной температуры от заданной, не превышающее 7%, и относительный запас  $\Delta T_{st.max}$  от максимально допустимой температуры стенки. После окончательного определения температуры огневой стенки со стороны ПС, вычисляется средняя по участку температура огневой стенки со стороны жидкости  $T_{st.l}$ . При необходимости принимаются дополнительные меры тепловой защиты или корректируется схема охлаждения. Окончательные результаты расчетов заносятся в таблицу и представляются в виде графика (рис. 6).

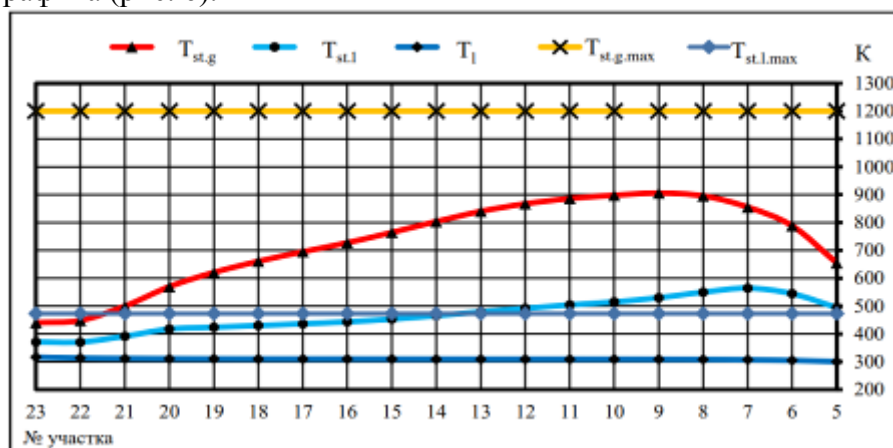


Рис. 6 – Изменение температурного состояния огневой стенки по длине камеры двигателя

Для расчета гидравлических потерь в тракте охлаждения необходимо определить число Рейнольдса  $Re$ , коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi$  в зависимости от режима течения охладителя (ламинарного или турбулентного), и затем рассчитать потери давления  $\Delta P$  на участке. Это делается с учетом шероховатости стенок и геометрии канала. Результирующие потери давления для всех участков суммируются, чтобы получить общие гидравлические потери в тракте охлаждения, которые не должны превышать допустимое значение. Результаты расчетов вносятся в таблицу, после чего строится график изменения гидравлических потерь по длине камеры двигателя (рис. 7).

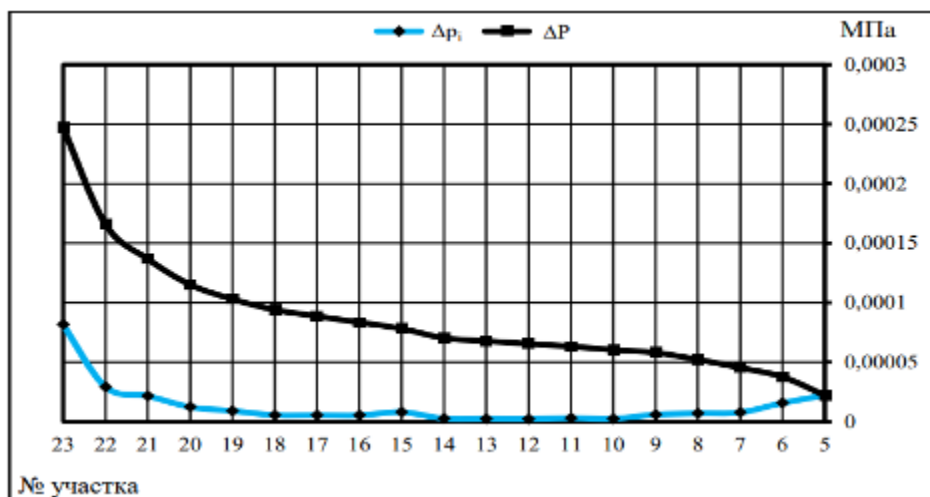


Рис. 7 – Значение потерь давления по участкам камеры двигателя

Методика расчета автономной системы тепловой защиты экспериментальной камеры ракетного двигателя-демонстратора включает детальный термодинамический анализ и расчет теплообмена, определение геометрических размеров камеры, свойств продуктов сгорания и массовых расходов компонентов, а также выбор материалов, для обеспечения эффективного охлаждения огневой стенки. В результате были рассчитаны параметры охлаждающего тракта, конвективных и лучистых тепловых потоков, коэффициента теплоотдачи охладителя и оребрения тракта охлаждения, что позволяет оптимизировать конструкцию камеры и систему охлаждения для надежной работы в условиях высокотемпературных нагрузок.

Представленная в данной статье расчетно-аналитическая методика выполнялась в рамках инициативного научно-исследовательского проекта, реализуемого в студенческом конструкторском бюро «Факел».

### **Библиографические ссылки**

1. Технологии и материалы 3D-печати: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. 98 с.
2. Толстопятов М. И. Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей. Расчет охлаждения камеры жидкостного ракетного двигателя: учеб. пособие. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2020. 88 с.
3. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 488 с.

© Назаров В.П., Шестерня В.И., Хоменко В.О., Троцкий Д.А. Захарова Е.Е., 2025

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОНСТРУКЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И.А. Максимов<sup>1,2</sup>, С.Г. Кочура<sup>1,2</sup>, В.Г. Сомов<sup>2</sup>, С.А. Ходенков<sup>2</sup>,  
Д.О. Малышев<sup>2</sup>, А.А. Демичева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М.Ф. Решетнёва»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: somov56@bk.ru

*В работе представлена методика проведения эксперимента для определения электромагнитных характеристик негерметичной конструкции космического аппарата. Описывается объект испытаний и результаты экспериментальных исследований напряженности электрического поля внутри приборного отсека. Приведена оценка полученных результатов.*

*Ключевые слова: космический аппарат, электромагнитное излучение, бортовая аппаратура, негерметичная конструкция КА, экспериментальные исследования.*

### Введение

Для проведения верификации предложенной методики оценки напряженности поля внутри приборного отсека космического аппарата (КА) [1], как объекта, подвергаемого облучению, необходимо наличие экспериментальных данных. Построение специальной модели приборного отсека в натуральную величину для верификации методики является весьма затратным и труднореализуемым. В статье описывается объект испытаний и приведены результаты испытаний.

### Описание эксперимента

Для определения электромагнитных характеристик негерметичной конструкции в основу эксперимента положено излучение электрического поля в заданном диапазоне частот с фиксированной мощностью на входе излучающей антенны. Напряженность электрического поля регистрировалась в точках наблюдения датчиком электрического поля.

В качестве объекта испытаний использовалась модель 07ТВИ КА «Глонасс-К». Приборный отсек модели 07ТВИ идентичен по конструкции КА «Глонасс-К» 11Л в части применяемых материалов, зазоров и технологических отверстий и имеет характерное строение для конструкции негерметичного приборного отсека. В приборном отсеке 07ТВИ установлены тепловые имитаторы бортовой аппаратуры (БА). Имитаторы представляют из себя металлические геометрические примитивы, что, в некоторой степени, имитирует наполнение приборного отсека бортовой аппаратурой. На плоскости х-у КА располагается технологическое отверстие, через которое производился доступ внутрь приборного отсека КА для установки регистрирующей аппаратуры.



Испытания проводились на испытательной площадке регионального центра связи (РЦС) для испытаний по требованиям электромагнитной совместимости (ЭМС) РЦС ЭМС АО «Решетнев». КА размещался на технологической подставке в горизонтальном положении плоскостью х-у параллельно полу. Вокруг КА, кроме пола, располагался поглотитель электромагнитных волн (ПЭВ) для исключения нежелательных отражений, способных повлиять на точность измерений. Антенной панелью КА был ориентирован в сторону плоскости заземления (стол высотой 90 см с металлической поверхностью). На столе размещалась излучающая антенна на диэлектрической подставке и испытательное оборудование. Подобная ориентация КА и излучающей антенны имитировала штатное направление облучения КА антеннами целевой аппаратуры.

Для проведения испытаний было определено несколько точек размещения регистрирующей аппаратуры и излучающей антенны. Каждой точке присваивалось обозначение в формате «Dz», где «z» – порядковый номер точки.

Размещение излучающих антенн и одного из положений датчика показано на рисунках 1, 2.



Рис.1. Размещение излучающих антенн

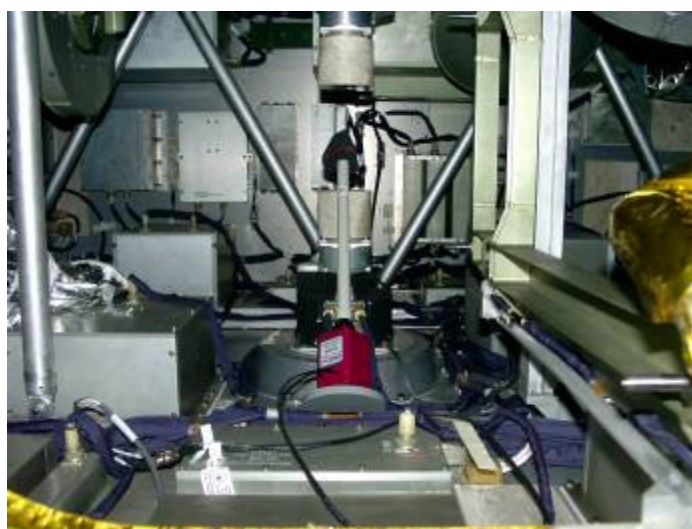


Рис. 2. Размещение датчика D1

В качестве излучающего и регистрирующего оборудования использовался испытательный комплекс испытаний БА на излучаемую ЭМС (ИК И-ЭМС) разработки Rohde&Schwarz на диапазон частот 1000-18000 МГц. Комплекс работает под управлением специализированного программного обеспечения (ПО) «EMC32-S» также разработки Rohde&Schwarz.

ПО «EMC32-S» позволяет в автоматическом режиме проводить сканирование заданного частотного диапазона с заданным шагом и фиксированным значением мощности на входе антенны. Кроме того, ПО проводит документирование необходимых параметров испытательного оборудования и фиксирует величину напряженности поля с датчика поля. Вид ПО «EMC32-S» показано на рисунке 3.

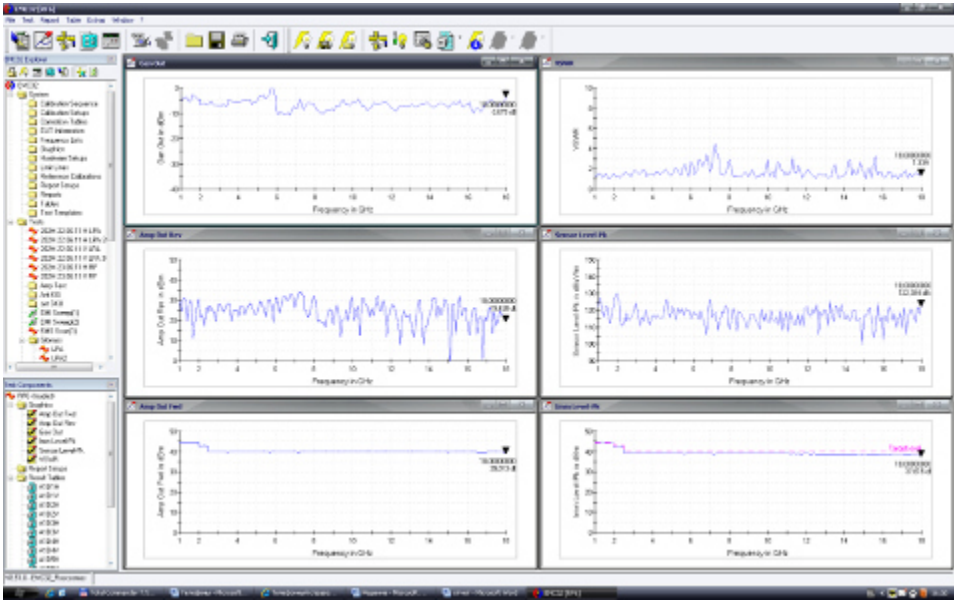


Рис. 3. Рабочее окно ПО «EMC32-S»

В процессе проведения испытаний документировались следующие параметры: выходная мощность генератора, мощность прямой волны на выходе усилителя, мощность обратной волны на выходе усилителя, коэффициент стоячей волны, мощность на входе антенны, показания датчика поля. Параметры сканирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры сканирования

| Диапазон, МГц | Используемая антенна | Мощность на выходе усилителя, Вт | Шаг               |
|---------------|----------------------|----------------------------------|-------------------|
| 1000-2000     | Ан1 ВВНА9120Е        | 30,2                             | Линейный, 100 МГц |
| 2000-2500     | Ан2 АТН2G10          | 20                               |                   |
| 2500-7500     | Ан2 АТН2G10          | 10                               |                   |
| 7500-18000    | Ан3 750-442ЕМ-NF     | 10                               |                   |

Все оборудование смонтировано в стойку и располагалось около излучающей антенны на плоскости заземления. Управление от персонального компьютера (ПК) проводилось по оптическому интерфейсу из-за пределов испытательной площадки. Регистрация поля датчиком также проводилась по оптическому интерфейсу непосредственно с ПК.

Зазоры и технологические отверстия приборного отсека модели КА были заклеены лентой ЛЭФС толщиной 20 мкм с электропроводящим липким слоем и материалом

ПЭТ-С-Ф толщиной 9 мкм в два слоя. Пример реализации комбинированной установки защиты представлен на рисунке 4.

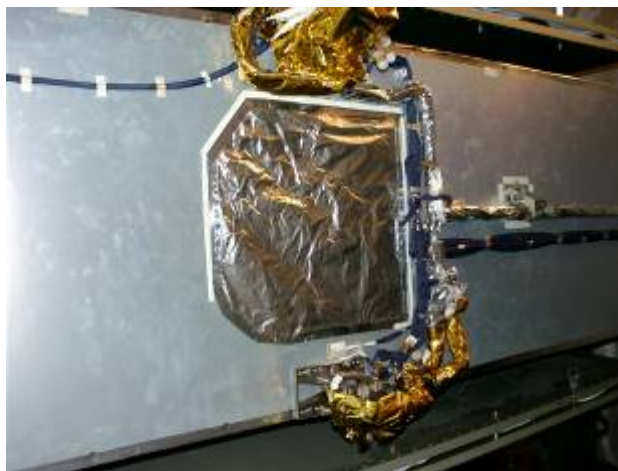


Рис. 4. Реализация комбинированного способа защиты на отверстии лентой ЛЭФС и материалом ПЭТ-С-Ф

### Предварительная обработка результатов

Приборный отсек КА представляет собой конструкцию, в основе которой используются материалы с высокой проводимостью, такие как алюминий, что приводит к эффективному отражению электромагнитных волн от внутренних стенок приборного отсека. Внутри приборного отсека, насыщенного БА, электромагнитная волна претерпевает многократное отражение. Взаимодействие различных мод может привести как к их сложению, так и к вычитанию. В итоге, частотная зависимость напряженности электрического поля внутри конструкции имеет высокую неравномерность, определяемой добротностью конструкции. Добротность конструкции зависит от геометрических размеров приборного отсека, насыщенностью отсека аппаратурой и поглощающих излучение материалов и является специфической для каждого типа КА. Так как задачей эксперимента является определение электромагнитных свойств конструкции как набора определенных конструктивных элементов, вносящих определенный вклад в общую характеристику, необходимо минимизировать влияние используемой модели КА на интерпретацию результатов.

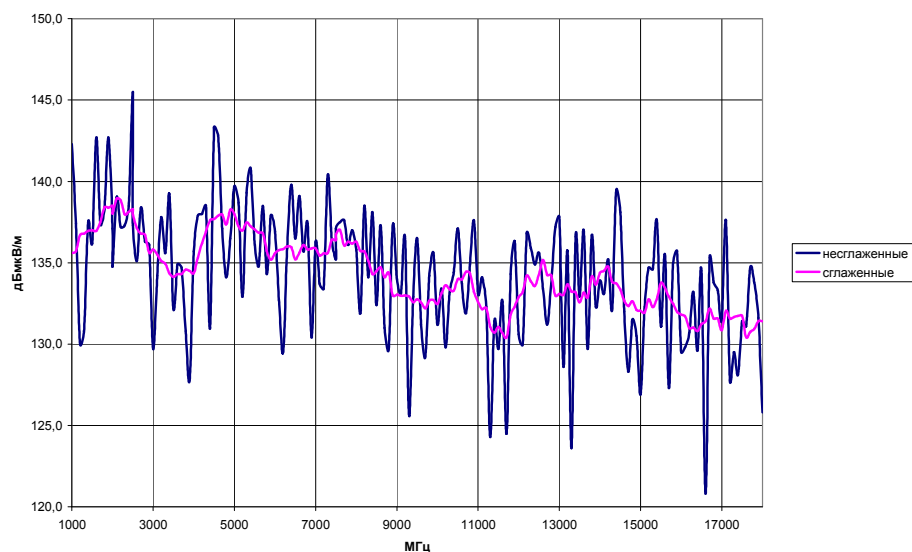


Рис. 5. Результат предварительной обработки данных

Проведена предварительная обработка результатов эксперимента методом «скользящего среднего». Суть метода заключается в замене величины напряженности поля в конкретной точке частотной характеристики на значение, полученное в результате вычисления среднего значения из ближайшего окружения точки. Опытным путем было принято усреднение по 9-ти точкам. Итоговые кривые получаются сглаженными, без резонансов, обусловленных внутренними отражениями. Пример сглаженных и несглаженных кривых приведен на рисунке 5.

### Результаты измерений напряженности электрического поля внутри приборного отсека

На рисунках 6 и 7 представлены результаты измерений напряженности поля в различных точках конструкции. Анализ результатов представленных на рисунках 6, 7 показал, что поле распределено внутри приборного отсека равномерно по частоте и напряженности. Отклонение измеренной напряженности поля в измерительных точках от среднего значения напряженности поля представлены на рисунках 8 и 9 и составляет 6-10 дБ от среднего значения.

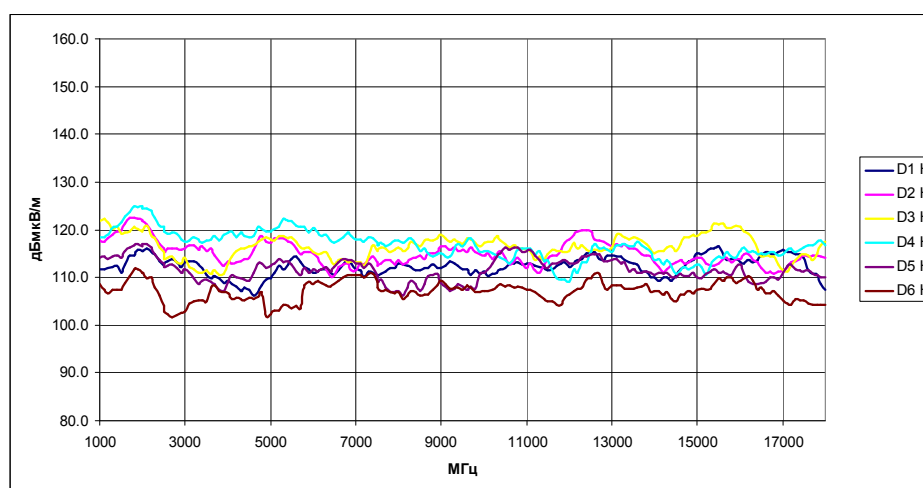


Рис. 6. Напряженность электрического поля внутри приборного отсека, горизонтальная поляризация

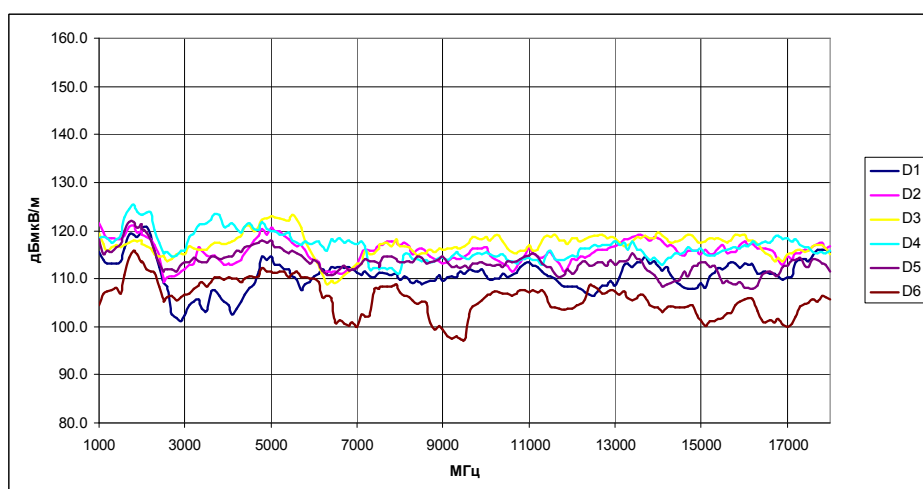


Рис. 7. Напряженность электрического поля внутри приборного отсека, вертикальная поляризация

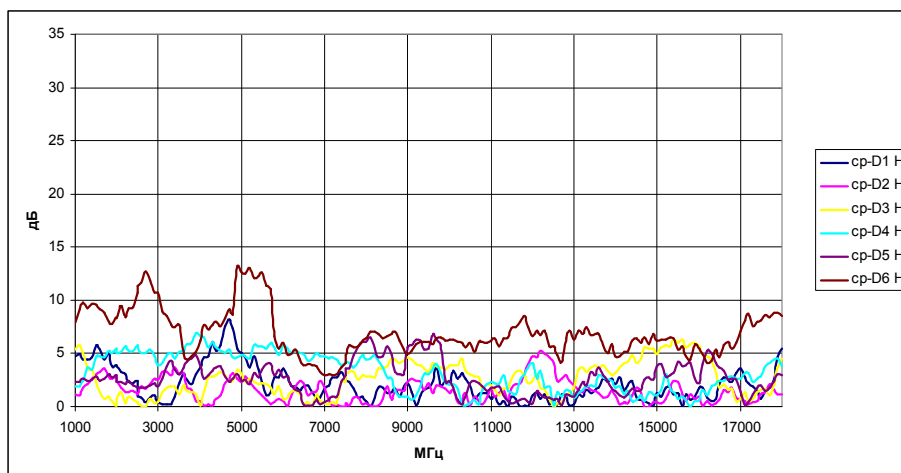


Рис. 8. Отклонение от средних значений, горизонтальная поляризация

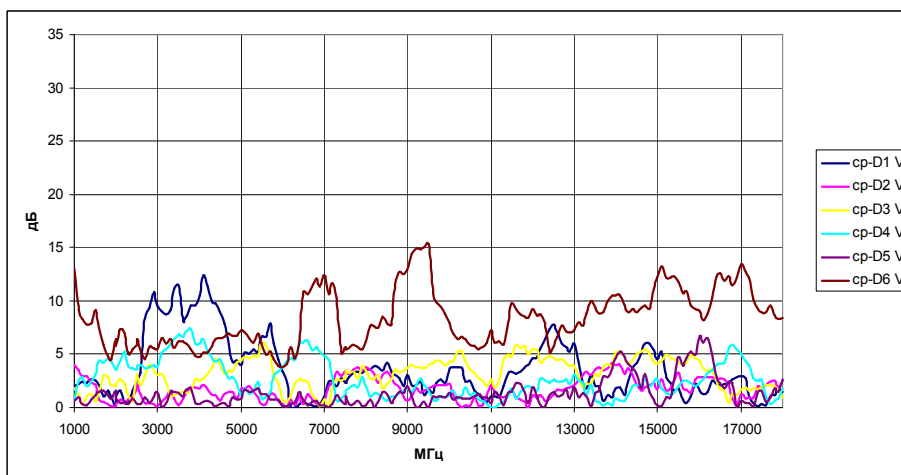


Рис. 9. Отклонение от средних значений, вертикальная поляризация

## Выводы

В результате проведенного эксперимента:

- измерены значения напряженности электрического поля внутри приборного отсека, среднее значение которого использовано для верификации модели оценки ослабления электромагнитного излучения негерметичной конструкцией КА;
- установлено, что поле внутри приборного отсека достаточно равномерно распределено по объему. Неравномерность поля внутри приборного отсека в большинстве значений лежит в пределах 6-10 дБ.

## Библиографические ссылки

1. Кочура, С. Г. Синтез метода оценки ослабления электромагнитного излучения негерметичной конструкцией космического аппарата / С. Г. Кочура, И. А. Максимов, В. Г. Сомов, и др. // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика [Электронный-ресурс] : сб. материалов V Всерос. науч.-практ. конф. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2024. – С. 92–97.
2. ECSS-E-HB-20-07A. Space engineering. Electromagnetic compatibility handbook, 5 september 2012.

3. Газизов, Т. Р. Основы электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие / Т. Р. Газизов ; Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 245 с.
4. Князев, А. Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечиев, Б. В. Петров : М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
5. Уайт, Дональд Р. Ж. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи : справ.-метод. пособие. Вып. 2. Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения / Дональд Р. Ж. Уайт ; М.: Сов. радио, 1978. – 272 с.
6. MIL-HDBK-1195. Military handbook. Radio frequency enclosures, 1988.
7. Principles of electromagnetic compatibility. 3<sup>rd</sup> edition. B. Keiser, 1987.
8. Topics of intersystem electromagnetic compatibility. Woodrow W. Everett, Jr., 1972.
9. Electromagnetic compatibility design guide for avionics and related ground support equipment. Ernest R. Freeman, M. Sachs, 1981.
10. Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding. XingcunColinTong, 2009.
11. Патент RU 2 319 646 C1 Российская Федерация, МПК B64G1/22(2006-01-01), B64G1/52(2006-01-01). Приборный отсек космического аппарата : № 2006122194/11 : заявл. 24.08.2006 : опубл. 20.03.2008 / Смирнов В. А., Максимов И. А., Иванов В. В., Кочура С. Г., Попов В. В., Жарков А. Ю. ; заявитель ФГУП ОПМ им. академика М.Ф. Решетнева. – 7 с.
12. GRASP9. Technical Description. Editor: Knud Pontoppidan. TICRA, September 2005.

© Максимов И. А., Кочура С. Г., Сомов В. Г., Ходенков С. А.,  
Малышев Д. О., Демичева А. А., 2025