



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

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



КРАСНОЯРСК 2024

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 VI Всероссийской научно-практической конференции
(28–29 февраля 2024 г., Красноярск)*

Электронное издание

Красноярск 2024

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2024

УДК 629.7
ББК 39.5
И88

Редакционная коллегия:

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

Под общей редакцией

кандидата технических наук, профессора В. П. НАЗАРОВА

Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика [Электронный И88 ресурс] : сб. материалов VI Всерос. науч.-практ. конф. (28–29 февраля 2024 г., Красноярск). – Электрон. текстовые дан. (1 файл, 3,74 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, 2024. – 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: 08.04.2024.
Объем 3,74 МБ. С 723/23.

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 | 7 |
|--------------------------------|---|

Секция

«Современные методы испытаний и диагностики изделий»

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Кишкин А. А., Шевченко Ю. Н., Абдуллаев М. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР НАГРУЗКИ В БАЛАНСИРНОМ КОРПУСЕ | 8 |
| Сугак Е. В. МЕТОДЫ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА | 13 |
| Санников Д. Н. СНЕГОПЕРЕДУВАЮЩИЙ МЕТОД КАК ВИД ЗАЩИТЫ АВТООМБИЛЬНЫХ ДОРОГ ОТ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ | 19 |
| Брунгардт А. В., Брунгардт М. В., Шатохин С. Н. ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЁТ ГЛАВНОГО ПРИВОДА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И ОПОРАМИ КАЧЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ | 22 |
| Кишкин А. А., Шевченко Ю. Н. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЧАСТИЧНО-БАЛАНСОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТИХОХОДНЫХ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНЫХ ТУРБИН | 31 |
| Дергунов В. В., Шепета Н. А. РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ЭЖЕКТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УЛАВЛИВАНИЯ ФАКЕЛЬНОГО ГАЗА | 37 |
| Черненко В. В., Черненко Д. В., Манохина Э. С. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В КАНАЛАХ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ | 42 |
| Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Тимофеев Е. Н. ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОПОРОШКА ГРАФИТА ДЛЯ ИОНИСТОРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ | 49 |
| Бразговка О. В., Сугак Е. В. ПРОБЛЕМЫ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ | 53 |
| Крашенинникова О. В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРМ-МАНИПУЛЯТОРОВ ИЗ РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ | 62 |

Секция

«Контроль и диагностика технологических процессов машиностроения»

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Иванов П. А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПОТОКА РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ КРИВОЛИНЕЙНЫХ КАНАЛОВ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК | 65 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Литовка О. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ..... | 71 |
| Матвиенко В. И., Литовка О. В., Левко В. А. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ | 75 |
| Петецкая А. Е., Сычев М. О. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СОПЛА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ | 80 |
| Алексеев В. В., Руденко М. С. МЕТОДИКА, ТЕХНОЛОГИЯ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА НАНЕСЕНИЯ ТЗП НА ПОВЕРХНОСТЬ КАМЕРЫ РДМТ, ИЗГОТОВЛЕННОГО СПОСОБОМ 3D ПЕЧАТИ..... | 87 |

Секция

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

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Кочура С. Г., Максимов И. А., Сомов В. Г., Ходенков С. А., Малышев Д. О. СИНТЕЗ МЕТОДА ОЦЕНКИ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕГЕРМЕТИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА..... | 92 |
| Максимов И. А., Кочура С. Г., Сомов В. Г. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН..... | 98 |
| Максимов И. А., Кочура С. Г., Сомов В. Г., Кузовников А. В., Дианова О. В. АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА БОРТОВУЮ АППАРАТУРУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА..... | 105 |
| Гринберг Г. М. НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ, ИСПЫТАНИЯХ И КОНТРОЛЕ ПРОИЗВОДИМОЙ ПРОДУКЦИИ | 111 |
| Харлашина С. В., Гуцин И. О. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВА И УВЕЛИЧЕНИЯ ЕГО ГАММА-ПРОЦЕНТНОЙ НАРАБОТКИ | 117 |

Секция

«Контроль и испытания ракетно-космической техники»

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Голованов С. М., Орлов В. И., Федосов В. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА КАК ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ .. | 124 |
| Бордачев В. А. ОРБИТАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ: КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ СПУТНИКОВОЙ ТЕХНИКИ | 134 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Шикарев М. А., Манохина Э. С. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ..... | 138 |
| Рожкова Е. А. РАССМОТРЕНИЕ ТЕНДЕНЦИЙ В АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЙ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ | 146 |
| Туранов Р. М., Назаров В. П. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ «БАРОКОМПЛЕКС» ПУТЕМ ПРОВЕДЕНИЯ РЕКУПЕРАЦИИ ГЕЛИЯ..... | 152 |
| Бордачев В.А., Рожкова Е. А. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ РАКЕТ | 155 |
| Манохина Э. С., Кудрявцев Н.А, Сычев М.О., Журавлев В. Ю., Шикарев М. А. МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ РДМТ, РАБОТАЮЩЕГО НА НОВЫХ КОМПОНЕНТАХ | 162 |
| Кирюшкин Г. А., Алексеенко В. В., Шестерня В. И. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ И ТЕХНОЛОГИИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ, ИЗГОТОВЛЕННОГО СПОСОБОМ SLM-ПЕЧАТИ.. | 167 |
| Евтифьев М. Д. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПЛАНЕРА ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ «БУРАН» В ПРОЦЕССЕ НАЗЕМНОЙ ПОДГОТОВКИ К ПЕРВОМУ ПОЛЕТУ | 170 |
| Шестерня В. И., Коваль Р. В., Кирюшкин Г. А. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ, РАБОТАЮЩЕГО НА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОМ ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ | 179 |
| Вотяков К. А., Назаров В. П., Надежин М. Н., Карабонцева М. В., Брижинская Н. В. МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОННОГО ЭТАЛОНИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ | 184 |
| Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Романов В. А. ПРИМЕНЕНИЕ ВОДЫ КАК РАБОЧЕГО ТЕЛА В ДВИГАТЕЛЯХ | 190 |
| Шамлицкий А. Я., Крашенинникова О. В. ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ | 193 |

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 производственников.

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 629.7

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР НАГРУЗКИ В БАЛАНСИРНОМ КОРПУСЕ

А. А. Кишкин, Ю. Н. Шевченко, Абдуллаев М. У.

Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Российской Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: spsp99@mail.ru

В настоящей работе приведены основные соотношения и описание конструкции стенда использующей двигатель-генератор в балансирном подвесе, позволяющие проводить энергетические испытания микротурбомашин малой быстроходности.

Ключевые слова: энергетическая характеристика турбомашин; полезная мощность; затраченная мощность; крутящий момент на выходе из турбины; реактивный момент на корпусе турбогенератора.

Для получения энергетических характеристик и подтверждения данных теоретических исследований и проведения верификации расчетного алгоритма был спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд.

Принципиальная схема экспериментального стенда для проведения испытаний микротурбины представлена на рис. 1. Стенд состоит из турбинного узла с набором сменных колес, рабочих и подводящих устройств генератора в балансирном подвесе, пульта управления расходом рабочего тела, ресивера, компрессора, системы измерений [1, 2, 3].

Принцип работы испытательного стенда следующий. Модельное рабочее тело подается в проточную часть турбины из ресивера 3 через пульт управления расходом с редуктором 4. Механическая энергия рабочего тела приводит во вращение ротор турбины, выполненный на одном валу с ротором генератора 2. Отработавшее рабочее тело выбрасывается из турбины в атмосферу. Расход рабочего тела задается редуктором 4 пульта.

Система измерений испытательного стенда позволяет контролировать параметры температуры, давления, расхода, крутящего момента на корпусе генератора, скорости вращения ротора. Все измеренные показатели системы измерений фиксируются измерительным комплексом 10.

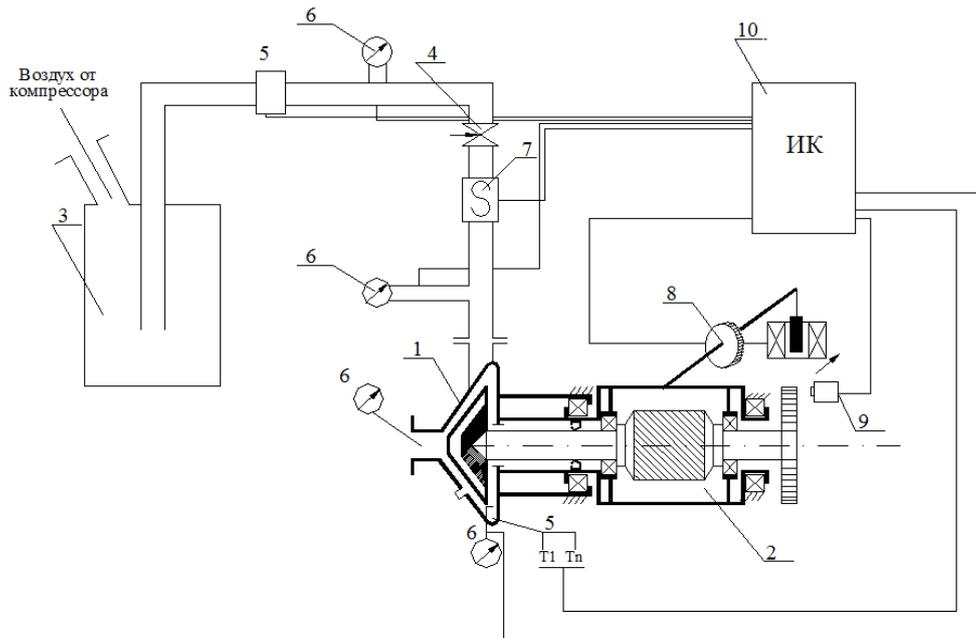


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

1 – турбинный узел; 2 – двигатель в балансирном подвесе; 3 – ресивер; 4 – редуктор управления расходом рабочего тела; 5 – датчик температуры; 6 – датчик давления; 7 – датчик расхода; 8 – датчик крутящего момента; 9 – датчик оборотов; 10 – измерительный комплекс
Измеряемые на стенде параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Измеряемые на стенде параметры

| № | Параметр | Обозначение |
|---|------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | Статическое и полное давление на входе в турбинный узел | $p_{вх}, p_{вх}^*, [Н/м^2]$ |
| 2 | Статическое и полное давление на выходе из турбинного узла | $p_{вых}, p_{вых}^*, [Н/м^2]$ |
| 3 | Статическое и полное давление в контрольных точках | $p, p^*, [Н/м^2]$ |
| 4 | Температуры в контрольных точках | $T, [^{\circ}K]$ |
| 5 | Скорость вращения ротора турбины | $n, [мин^{-1}]$ |
| 6 | Сила рычага двигателя в балансирном подвесе | $F, [Н \cdot м]$ |
| 7 | Расход модельного рабочего тела | $V, [м^3/с]$ |
| 8 | Показания напряжения и силы тока генератора | $U, I, [В, А]$ |

Основным элементом экспериментального стенда является двигатель-генератор в балансирном подвесе, позволяющий за счет упругого углового перемещения в специальных подшипниках измерять крутящий момент на корпусе двигатель-генератора, что адекватно значению крутящего момента на входе в генератор (или на выходе из турбины), откуда полезная мощность турбины определяется как произведения величины крутящего момента на угловую скорость вращения.

Установка генератор в балансирном корпусе предназначена для испытания различного типа микро-турбомашин, как микротурбин, так и микрокомпрессоров поскольку электрический генератор постоянного тока обращаем в электродвигатель. Конструкция представляет сложную сборку и включает в себя 29 элементов. Принципиальная схема установки показана на рис. 2.

На металлической платформе закреплен корпус генератора 1 с четырьмя проемами. Внутри корпуса находятся ротор 11 со статором 8. Свободный проворот ротора обес-

печиваются подшипниками 23 и 24. В контакте с ротором находится щеткодержатель 12.

Корпус генератора в состоянии – свободного проворота удерживаемый подшипником 22 и подшипником 25, установленным в передней крышке генератора 15. Подшипник 25 от перемещения фиксируется гайкой 19 и гайкой 20 в крышке корпуса 7 генератора.

Задняя крышка генератора 9, необходима для удержания по оси в корпусе 1. Имеет отверстие для вывода датчика оборотов. К задней крышке двигателя 9 присоединен рычаг 16 с толкателем, который давит на платформу весов и, таким образом, делается замер крутящего момента. Второй рычаг необходим для обеспечения противовеса.

Корпус генератора 1 соединяется крышкой корпуса 7 посредством четырех винтов М6 28. Еще четыре винта М6 28 используются для соединения корпуса турбины 4 с крышкой корпуса 7.

Экспериментальный корпус спроектирован для исследования подводящего устройства микротурбины. Принципиальная схема экспериментального корпуса показана на рис. 2. Корпус турбины 4 имеет штуцер для подвода воздуха и размещения приемников давления. В нем размещается турбина 6 с подводящим устройством 5. Турбина 6 располагается на переходном валу 14 и фиксируется втулкой 21 и гайкой 18. Подводящее устройство 5 поддерживается кольцом из оргстекла 3. Кольцо из оргстекла 3 уплотнено резиновым кольцом 26 и имеет 8 отверстий по периметру для крепления трубок 17 (приемников давления). Корпус 4 закрывается крышкой 2 при помощи 8 винтов. Общий вид генератора в балансирном подвесе представлен на рис. 3.

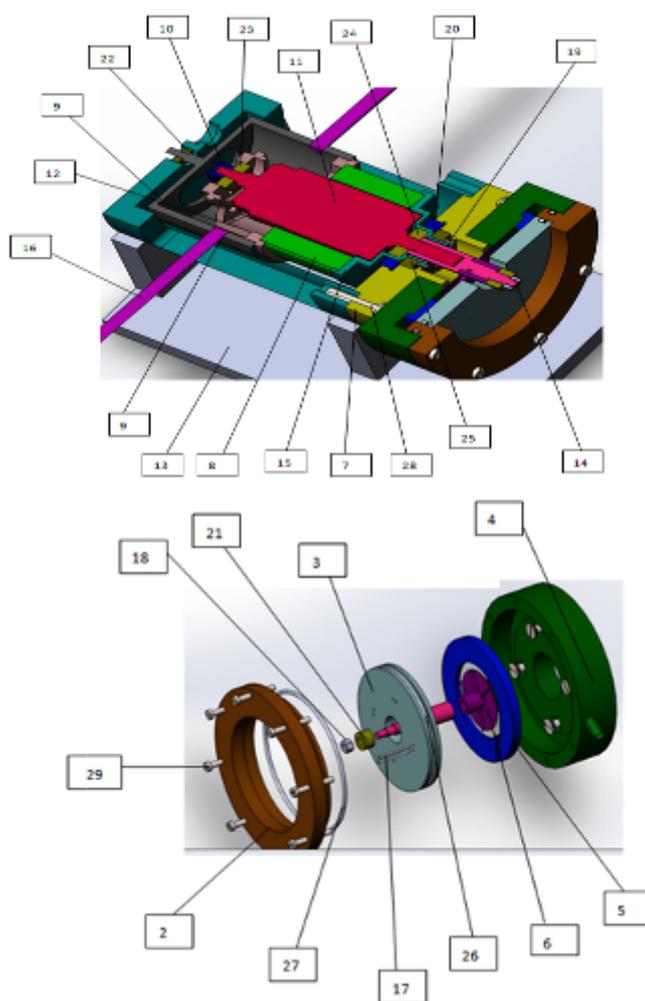


Рис. 2. Разрез общего вида установки

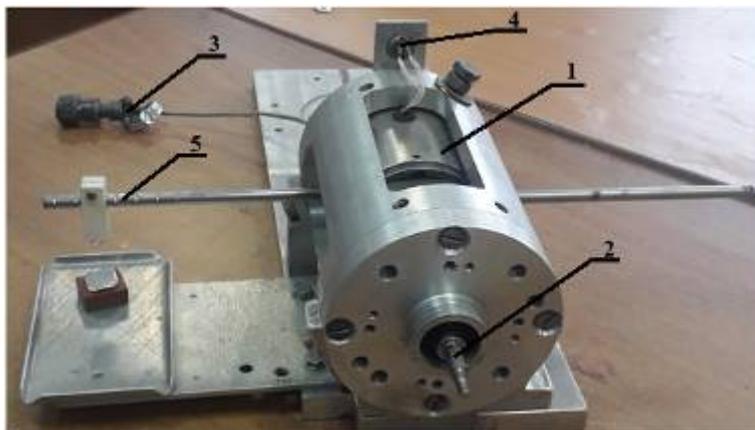


Рис. 3. Общий вид генератора в балансированном подвесе:

1 - генератор; 2 – вал; 3 - выход датчика оборотов (ДО); 4 - выход генератора; 5 - измерительная штанга датчика силы (крутящего момента).

На рис. 4 представлен общий вид экспериментальной установки, предназначенный для энергетических испытаний микротурбин с различными подводщими устройствами и экспериментального исследования радиально расходно-окружных течений.

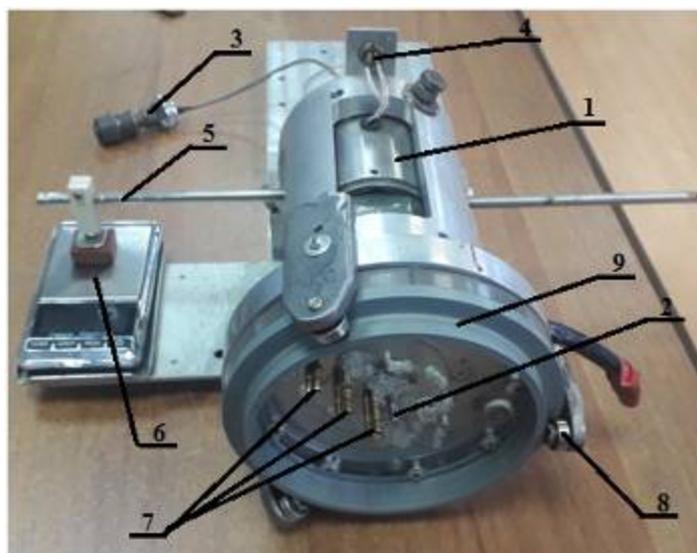


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки микротурбины в балансированном подвесе: 1-генератор; 2 – вал; 3 - выход датчика оборотов (ДО); 4 - выход генератора; 5 – измерительная штанга датчика силы (крутящего момента); 6 - датчик силы; 7 – три приемника давления по радиусу; 8 – подшипниковый прижим крышки 9; 9 - крышка

Часть алгоритма обработки данных по энергетике турбомашины связанная с технологией балансирного подвеса определяется:

Полезная работа на валу:

$$N_{пол} = M_z \cdot \omega,$$

ω - угловая скорость,

M_z - реактивный момент балансирном подвеса генератора.

$$M_z = P_{изм.} \cdot L_{изм.},$$

где $P_{изм.}$ показание датчика силы на плече $L_{изм.}$

Затраченная мощность:

$$N_{затр} = \dot{m} \cdot L_{ад},$$

где \dot{m} - массовый расход; $L_{ад}$ – адиабатная работа.

Полный КПД ступени:

$$\eta = \frac{N_{пол}}{N_{затр}}.$$

Предложенное техническое решение балансирного подвеса корпуса генератора и использованного в составе экспериментального стенда для энергетических испытаний микротурбомашин позволяет с минимально возможной погрешностью оценивать полезную мощность турбины малой быстроходности.

Библиографические ссылки

1. Кишкин А. А., Делков А. В., Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Павленко П. А. Особенности высокоточной градуировки термисторов платиновым термометром сопротивления на высокоинертной термической базе // в сборнике: материалов Всероссийской научно-практической конференции «Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика», г. Красноярск., 2021. С. 28-33
2. 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
3. Шевченко Ю.Н., Шилкин О.В., Чайкина К.А. Стенд для энергетических испытаний микротурбин. результаты сравнительных испытаний микротурбин с направляющим лопаточным аппаратом // в сборнике: материалов Всероссийской научно-практической конференции Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика, 24–26 февраля 2021 г., Красноярск. С. 28-34.

© Кишкин А. А., Шевченко Ю. Н., Абдуллаев М. У., 2024

МЕТОДЫ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА

Е. В. Сугак

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

Переход в обеспечении безопасности к концепции «приемлемого риска» определил возникновение нового направления теории надежности - прикладной теории надежности, связанной с анализом и обеспечением безопасности и, соответственно, приемлемого технического и техногенного риска. В статье приводится обоснование возможности и необходимости использования некоторых методов и показателей надежности для оценки безопасности и риска.

Ключевые слова: теория надежности, техносферная безопасность, концепция обеспечения безопасности, методы анализа риска.

Современное развитие фундаментальной теории безопасности обосновывает необходимость изменения действующих традиционных подходов к обеспечению безопасных условий эксплуатации потенциально опасных объектов техносферы, в основу которых должны быть положены нормируемые параметры рисков и безопасности по критериям прочности, ресурса, живучести и надежности [1-4]. При этом ключевым фактором в решении данной проблемы является использование концепции оценки и мониторинга рисков, основанной на контроле, диагностике и мониторинге базовых параметров эксплуатации объектов техносферы и анализе получаемых при этом результатов [1,3-7].

Соотношение основных базовых понятий теорий надежности, живучести и безопасности приведены в таблице 1 [8].

Основными методологическими принципами обоснования требований к безопасности технических систем являются [8]:

- обеспечение баланса показателей, характеризующих функциональную полезность, безопасность и стоимость технической системы;
- комплексный учет различных видов опасности, объективно присущих технической системе;
- учет вероятностной природы возникновения различных аварийных ситуаций с технической системой, причинно-следственных цепочек их развития и возможного ущерба от аварий;
- обоснование требований по безопасности технической системы в рамках природно-техногенной системы «техническая система - человек - окружающая среда»;
- обоснование требований безопасности технической системы с учетом возможных ограничений по социально приемлемым рискам от возможных аварий.

Обеспечение безопасности сложной техники в настоящее время является доминирующим фактором развития теории надежности, а методы теории надежности должны рассматриваться во взаимосвязи с методами теории безопасности и риска [7-12]. Именно такой системный анализ вопросов надежности (безотказности) и безопасности является отличительной особенностью современного состояния теории надежности [13].

Таблица 1

Соотношение основных понятий теорий надежности, живучести и безопасности

| Объект | Теория надежности | Теория живучести | Теория безопасности |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Условия эксплуатации | Регламентированные (нормальные) | Нерегламентированные (форс-мажорные) | Любые |
| Техническая система | Исправное состояние, работоспособное состояние | Состояние способности | Неопасное (безопасное) состояние |
| | Повреждение (нарушение исправности), неопасный отказ (потеря работоспособности) | Повреждение, вывод из строя, поражение | |
| | Опасный отказ (потеря работоспособности) | | Опасное состояние (потеря контроля, опасная ситуация, авария, катастрофа) |
| Элемент технической системы | Повреждение, дефект, неисправность | Повреждение | Иницирующее условие (дефект, неисправность, повреждение) |
| | Отказ | Поражение | Иницирующее условие (отказ, поражение) |
| | Безопасный отказ (резервируемые и локализуемые отказы с неограниченным восстановлением) | Поражение резервируемого элемента (неопасно для системы) | Иницирующее условие (отказы, повреждения, поражения, не влекущие опасного состояния) |
| | Аварийный отказ (приводит к потере работоспособности, происшествию) | Поражение элемента (влечет потерю способности) | |
| | Аварийный отказ (приводит к аварии) | Поражение элемента (приводит к аварии) | Иницирующее событие (поражение элемента реализует опасное состояние, приводит к аварии) |

Требования к безопасности технических систем неизбежно трансформируются в требования к их надежности [5,7]. Можно считать, что переход к концепции «приемлемого риска» определил возникновение нового направления теории надежности - при-

кладной теории надежности, связанной с анализом и обеспечением не только надежности, но и безопасности технических систем и, соответственно, приемлемого технического или техногенного риска [13-16].

Центральной задачей при определении качества любой технической системы (объекта) является обоснование и выбор системы критериев и показателей качества ее функционирования [17]. Такая система критериев и показателей должна быть представительной, непротиворечивой, чувствительной, взаимосогласованной с критериями и показателями более высокого и более низкого уровня, детерминированной, определяемой (вычисляемой) и наглядной, а также обладать рядом других свойств [8].

Показатель качества системы является количественной характеристикой совокупности «потребительских» свойств системы, то есть тех свойств (эффективности в соответствии с назначением, безопасности, надежности, технологичности, стоимости и других), которые необходимы для выполнения системой ее предназначения. В общем случае показатель качества отражает результат комплексной оценки технической системы, является функцией трех основных составляющих [8]: состояния и реакции системы на факторы окружающей (внешней) среды, суммарного эффекта, обусловленного системой, и суммарных затрат ресурсов на ее создание, эксплуатацию и ликвидацию (утилизацию).

Безопасность технических объектов - способность выполнять требуемую функцию в состоянии, при котором отсутствует недопустимый риск. Понятие «безопасность машин» включает в себя способность машины выполнять свою(и) функцию(и) в течение всего срока службы при адекватном (достаточном) снижении рисков [18]. То есть безопасность - отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью нанесения ущерба потребителю продукции [5]. Безопасность является наиболее важной характеристикой любых современных сложных технических систем [7].

Показатель безопасности - характеристика, определяющая свойства системы (объекта) по исключению возможности реализации присущих системе опасностей в заданных условиях [8].

Принципом выбора показателей безопасности является их соответствие цели, которая должна быть достигнута при обеспечении безопасности системы в целом. Такой целью является исключение или снижение до приемлемых уровней рисков проявления опасностей, присущих системе.

Хотя показатели безопасности непосредственно не относятся к показателям надежности, однако безотказность технических объектов в значительной степени определяется именно надежностью. Кроме того, в качестве показателей безопасности могут непосредственно использоваться некоторые показатели надежности, характеризующие аварийные (критические) отказы или переход объекта в предельное состояние, угрожающие безопасности, при котором дальнейшая эксплуатация системы невозможна, недопустима или нецелесообразна, либо восстановление ее работоспособного состояния невозможно либо нецелесообразно, - назначенный срок службы, назначенный ресурс, вероятность безотказной работы по отношению к критическим отказам, некоторые комплексные показатели надежности [8, 13, 19]. Критерии предельного состояния устанавливаются нормативной документацией. Такие состояния возникают вследствие исчерпания системой ресурса или в предаварийной ситуации [8].

В настоящее время риск определяется как произведение вероятности процесса и величины возможного ущерба от него, а менеджмент риска считается частью менеджмента надежности и методы анализа надежности могут использоваться для определения оценок вероятностных характеристик риска [4, 20-24].

Соответственно, основными показателями безопасности можно считать параметры, характеризующие различные виды техногенного риска, - сочетание вероятности события (в частности - отказа) и его последствий при эксплуатации технического объекта или его использовании по назначению [9, 12, 25, 26].

В качестве показателей безопасности могут также использоваться некоторые показатели надежности, характеризующие срок службы или технический ресурс, гарантирующие с заданной вероятностью безопасную эксплуатацию объекта (назначенный срок службы, назначенный ресурс и другие), а также некоторые показатели безотказности по отношению к аварийным (критическим) отказам (например, вероятность безотказной работы по отношению к критическим отказам) и комплексные показатели (например, коэффициент оперативной готовности), а также некоторые специальные показатели надежности (например, средняя доля отказов и параметр потока отказов, приводящих к поражению людей или недопустимому воздействию на окружающую среду) [13].

Например, в качестве основных показателей безопасности машин и оборудования используются [25]:

- показатели риска;
- назначенные показатели - назначенный срок службы, назначенный ресурс, назначенный срок хранения;
- показатели безотказности - вероятность безотказной работы в течение назначенного ресурса по отношению к критическим отказам, коэффициент оперативной готовности;
- показатели критического воздействия - механического, термического, химического, пожара, взрыва, радиационного, электрического, шума, вибрации.

Типовая номенклатура экологических показателей, показателей безопасности и надежности, которые непосредственно или косвенно определяют безопасность технической системы и используются при оценке качества большого класса изделий, включает [27, 28]:

- экологические показатели - содержание вредных примесей, выбрасываемых в окружающую среду, вероятность выбросов вредных частиц, газов или излучений при хранении, транспортировании, эксплуатации изделия;
- показатели безопасности - вероятность безопасной работы человека в течение определенного времени, время срабатывания защитных устройств, сопротивление изоляции токоведущих частей, электрическая прочность высоковольтных цепей, уровни звуковой мощности или звукового давления в октавных полосах частот, скорректированный уровень звуковой мощности или эквивалентный уровень звука, логарифмические уровни вибростойкости в октавных полосах частот, коэффициент безопасности;
- показатели надежности - вероятность безотказной работы, установленная безотказная наработка, средняя наработка на отказ, срок службы до капитального ремонта (установленный ресурс), среднее время восстановления работоспособного состояния, удельная суммарная продолжительность (трудоемкость) технического обслуживания (ремонтов), средний срок сохраняемости, коэффициент готовности, коэффициент технического использования, износостойкость рабочего инструмента машины.

Законодательными или нормативно-правовыми актами органов исполнительной власти и органами государственного надзора могут быть установлены и другие показатели (например, срок обязательного технического осмотра (назначенный срок службы, назначенный ресурс) или срок обязательного испытания (освидетельствования), без проведения которых эксплуатация запрещена) [25].

Процесс анализа и оценки риска методами анализа надежности включает в себя определение ограничений, налагаемых на объект, идентификацию опасностей, предварительную оценку риска и оценку возможности снижения риска [23]. Анализ и оценка риска, анализ опасностей, контроль (оценка, подтверждение) основных показателей безопасности проводятся на всех этапах жизненного цикла [8].

Если под безопасностью технических систем понимать их надежность по отношению к жизни и здоровью людей, состоянию окружающей среды, то обеспечение и оценка их безопасности – составная часть проблемы и расчета их надежности [10]. Поэтому в

теории и практике исследований безопасности технических систем и анализа риска находят широкое применение методы теории надежности [8, 13-16, 20, 23, 29-31]:

- методы, основанные на применении теории вероятности (метод перебора гипотез, метод минимальных путей и минимальных сечений, применение классических теорем теории вероятностей);

- методы, основанные на теории марковских процессов и методы теории массового обслуживания;

- методы, основанные на построении структурно-логических схем (графов) и деревьев событий или деревьев отказов;

- логико-вероятностные методы, использующие для структурно-логического описания систем деревья событий, графы связности и набор логических (булевых) операций;

- общий логико-вероятностный метод, использующий для структурно-логического описания схемы функциональной целостности и функционально полные наборы логических операций;

- топологические методы;

- методы интегральных уравнений;

- методы статистического моделирования и другие.

Таким образом, современное развитие фундаментальной теории безопасности обосновывает необходимость изменения традиционных подходов к обеспечению безопасности технических систем, в основу которых должны быть положены нормируемые параметры рисков и безопасности. В качестве показателей безопасности могут использоваться некоторые показатели надежности, а для их оценки - методы прикладной теории надежности.

Библиографические ссылки

1. Акимов В.А., Диденко С.Л., Смирнов А.С. Научные основы общей теории безопасности жизнедеятельности. - М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2019. - 252 с.

2. Махутов Н.А., Абросимов Н.В., Гаденин М.М. Обеспечение безопасности - приоритетное направление в области фундаментальных и прикладных исследований. - Экологические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз, 2013, № 3(27), с.46-71.

3. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. - Новосибирск: Наука, 2008. - 523 с.

4. Окладникова Е.Н., Сугак Е.В. Управление техническим состоянием потенциально опасных объектов. - Системы управления и информационные технологии, 2009, т.35, № 1-1, с. 192-196.

5. Сугак Е.В. Современные проблемы техносферной безопасности в России. - Инновационное развитие науки: фундаментальные и прикладные проблемы. - Петрозаводск: Новая наука, 2022, с. 5-85.

6. Гаденин М.М. Структура многоуровневого мониторинга параметров безопасности техносферы и окружающей среды. - Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2012, № 1, с. 93-102.

7. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности как методологическая основа оценки и обеспечения техносферной безопасности. - Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика: Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. - Красноярск, 2023, с. 51-59.

8. Гаенко В.П., Костюков В.Е., Фомченко В.Н. Безопасность технических систем. Методологические аспекты теории, методы анализа и управления безопасностью. - Саров: Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 2020. - 329 с.

9. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. - СПб.: Изд. С.-Петербур. ун-та, 2007. - 276 с.
10. Ветошкин А.Г., Марунин В.И. Надежность и безопасность технических систем. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. - 129 с.
11. Тимошенко С.П., Симонов Б.М., Горошко В.Н. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: Юрайт, 2024. - 502 с.
12. Шишмарёв В.Ю. Надежность технических систем. - М.: Юрайт, 2024. - 289 с.
13. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности. Часть 1: Основы теории. – СПб.: Лань, 2022. - 276 с.
14. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности. Часть 2: Надежность технических систем. – СПб.: Лань, 2022. - 240 с.
15. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности. Часть 3: Испытания и контроль. - СПб.: Лань, 2022. - 288 с.
16. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности. Практикум. – СПб.: Лань, 2022. - 312 с.
17. ГОСТ 22851-77. Выбор номенклатуры показателей качества промышленной продукции. Основные положения.
18. ГОСТ ISO 12100-2013. Безопасность машин. Основные принципы конструирования. Оценки риска и снижения риска.
19. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.
20. ГОСТ Р 51901.6-2005. Менеджмент риска. Программа повышения надежности.
21. Маринина Л.К., Васин А.Я., Торопов Н.И. и др. Безопасность труда в химической промышленности. - М.: Академия, 2006. - 528 с.
22. ГОСТ Р 51897-2011. Менеджмент риска. Термины и определения.
23. ГОСТ Р 51901.5-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.
24. Окладникова Е.Н., Сугак Е.В., Игнатъев Д.А. Оптимальное управление безопасностью промышленных объектов.- Вестник СибГАУ, Красноярск, 2007, вып.4, с. 43-47.
25. ГОСТ Р 54123-2010. Безопасность машин и оборудования. Термины, определения и основные показатели безопасности.
26. Чура Н.Н. Техногенный риск. - М.: КНОРУС, 2017. - 280 с.
27. ГОСТ Р 51333-99. Безопасность машин. Основные понятия, общие принципы конструирования. Термины, технические решения и технические условия.
28. ГОСТ Р 51344-99. Безопасность машин. Принципы оценки и определения риска.
29. ГОСТ Р 51901.3-2007. Менеджмент риска. Руководство по менеджменту надежности
30. ГОСТ Р 51901.16-2017. Менеджмент риска. Повышение надежности. Статистические критерии и методы оценки.
31. ГОСТ Р МЭК 31010-2021. Надежность в технике. Методы оценки риска.

© Сугак Е. В., 2024

СНЕГОПЕРЕДУВАЮЩИЙ МЕТОД КАК ВИД ЗАЩИТЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ОТ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ

Д. Н. Санников

Научный руководитель – В. В. Серватинский

Сибирский Федеральный Университет

Инженерно-строительный институт

Российская Федерация, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

E-mail: BrownGp2@yandex.ru

В данной статье рассмотрен метод защиты автомобильных дорог при использовании снегопередувающей конструкции. Метод позволит защитить автомобильные дороги от возникновения снежных заноса. Кроме этого, в статье показаны графические представления снегопередувающих конструкций и их показатели.

Снежные заносы могут значительно увеличить расходы на зимнее техническое обслуживание, а также создать серьезные угрозы безопасности, вызывая потерю контроля над транспортным средством, уменьшая дальность обзора на поворотах и перекрестках, закрывая знаки, способствуя образованию льда, уменьшая эффективную ширину дороги и делая защитные барьеры неэффективными.

Ключевые слова: снегопередувающие конструкции, снегозащитные конструкции, защита автомобильных дорог, снежные заносы, сдувание снега, снежные заносы, снежные отложения, зимнее содержание автомобильных дорог

В настоящее время действующие нормативные документы не содержат требований к проектированию и выбору снегоуборочного оборудования для автомобильных дорог. Проблема работоспособности снегоуборочной техники в условиях значительной ширины дорожного полотна, наличия разделительных полос и дорожных ограждений на обочинах, а также других элементов обустройства изучена недостаточно. [4]

Основная цель снегопередувающих ограждений состоит не в том, чтобы позволить снегу оседать на дорожном покрытии, а в том, чтобы перемещать его и откладывать за пределами дороги. Принцип действия такого ограждения основан на сжатии и ускорении потока воздушных масс вблизи места, где он переносится, что способствует перемещению снега по дорожному полотну. В нижней части снегозащитного ограждения используются передувальные отверстия в соотношении 25:75 по всей конструкции. Для обеспечения надлежащих аэродинамических характеристик снегопередувающего ограждения панели должны иметь 20–25% просветности. Общая высота композиции ограждения как правило составляет 5 м. [1]

Как правило, направление господствующего ветра, дующего со снегом, составляет 75–90°, для эффективного снегопередувания. Угол в 75° и менее градусов уже не будет иметь снегопередувающего эффекта. [2]

После серии физических экспериментов в программе Ansys была создана модель структуры для выдувания снега (рис. 1). Основными учитываемыми факторами являются следующие параметры: общая высота снегоотводящего ограждения, отношение верхней панели к нижнему зазору, угол наклона нижней секции обдува и угол наклона панели к горизонту.

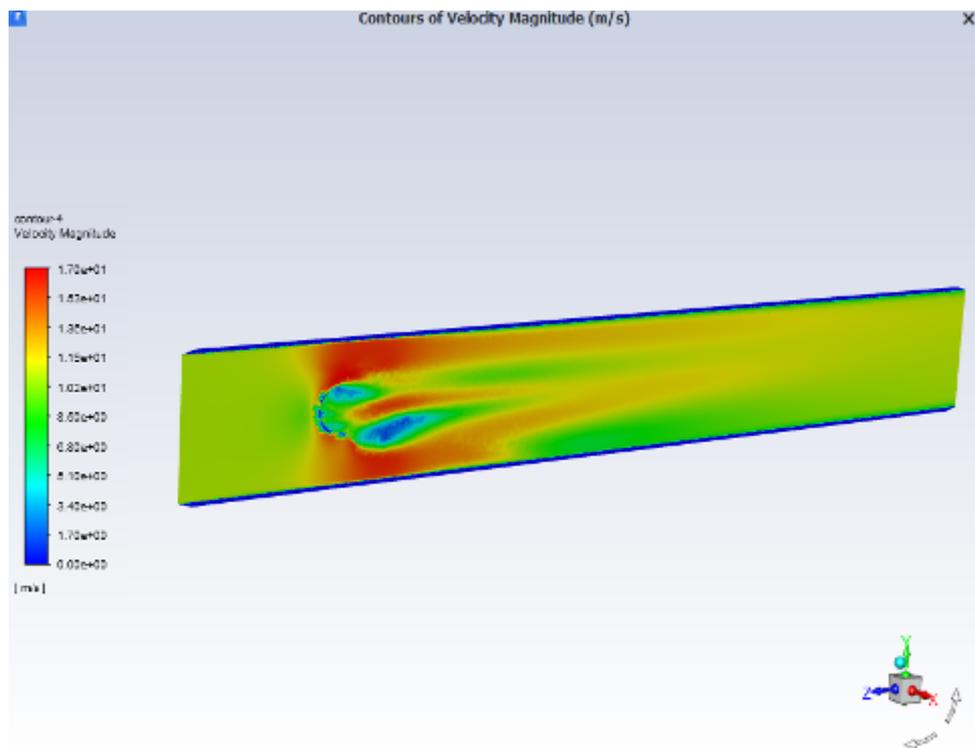


Рис. 1. Модель снегопередующего процесса в программе Ansys

В ходе моделирования использовалась конструкция снегопередующего типа в определённом масштабе. В качестве текущей среды для аэродинамического эффекта использовался воздух плотностью $1,225 \text{ кг/м}^3$. Температура воздушной среды составляла 255K и давление 101325Pa . Воздушный поток распределяли на всю поверхность снегопередующей конструкции со скоростью 10 м/с .

Ограждение представляет собой сборные конструкции, скрепленные элементами. Форма основной панели создана в виде вытянутой полусферы, такая форма максимально обеспечит обтекаемость воздушных потоков. Просветность составляет $0,2$ за счет двух отверстий. Добавлен элемент сверху в виде крыла и плавника, за счет такой формы обеспечивается увеличение скорости воздушного потока что в свою очередь будет способствовать перебросу снежной метели через дорогу. А также внесены изменения в нижнюю часть конструкции. По результатам моделирования, была определена необходимая форма нижнего зазора, который повторяет эффект сжатия воздушных потоков и тем самым увеличивая его скорость.

Внедрение верхнего способствует увеличению скорости воздушного потока с 10 м/с и до 18 м/с , шлейф воздушного потока с последующим уменьшением скорости протягивается на значительное расстояние от конструкции. Нижний элемент способствует более равномерному увеличению скорости по сравнению с верхним элементом, увеличение скорости наблюдается с 10 м/с до 18 м/с , что соответствует увеличению скорости на 80% от скорости изначального ветрового потока. За счет данных элементов снежная метель будет переноситься через дорожное полотно и откладываться на максимальном расстоянии от дороги, тем самым упрощая работ снегоуборочной техники и увеличивая безопасность движения транспортных средств.

Выводы. В работе рассматриваются вопросы, с моделирования снегопередующего ограждений для борьбы со снежными отложениями на дорожном полотне. В ходе моделирования оценили работу снегопередующей конструкции. Можно утверждать, что внедрение снегопередующих ограждений будет способствовать упрощению работы снегоуборочной технике. На основе полученных данных выявили следующие результаты:

- 1) По результатам моделирования получили возможное увеличение скорости воздушного потока за счет установки снегопередувающих ограждений;
- 2) Получили форму подветренной зоны выдувания;
- 3) Определили факторы, которые влияют на возможность передувания снега;

Библиографические ссылки

1. Бялобжеский, Г. В., Дюнин, А. К., Плакса, Л. Н., Рудаков, Л. М., Уткин, Б. В.; Под ред. Дюнина А. К Зимнее содержание автомобильных дорог -2-е изд., перераб. и доп. - М.: Транспорт, 1983. - 197 с.
2. Бабков, В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения. - М.: Транспорт, 1970. - 256с.
3. Васильев, АЛ. Состояние дорог и безопасность движения автомобилей в сложных погодных условиях. - М.: Транспорт, 1976. - 224с.
4. ГОСТ 50597–2017 Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля.
5. Building Research Department, Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization. Verification and improvement of snow control performance of wind-break fence // RESEARCH REPORT 2018. 3 (No. 389).
6. Tabler R. D. Controlling blowing and drifting snow with snow fence // Government Engineering, July-Aug. 2005, pp. 30-32.

© Санников Д. Н., 2024

ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЁТ ГЛАВНОГО ПРИВОДА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И ОПОРАМИ КАЧЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ

А.В. Брунгардт, М.В. Брунгардт, С.Н. Шатохин

Сибирский федеральный университет,
Российская федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26а

Представлена методика проектирования частотно-управляемого главного привода с опорами качения шпинделя для многоцелевых станков. Приведены аналитические уравнения и диаграммы для определения оптимальной жесткости и виброустойчивости главного привода.

Ключевые слова: частотно-управляемый главный привод, жесткость и виброустойчивость.

Актуальность темы. Совершенствование расчёта жесткости и виброустойчивости шпинделя главного привода многоцелевых станков для улучшения его параметрической надёжности, стойкости режущих инструментов и качества обработки особенно актуально для частотно-управляемого главного привода с асинхронным или синхронным электродвигателем и подшипниками качения шпинделя при скоростном точении и фрезеровании заготовок из лёгких сплавов и композитов, требующих скорости резания 1000 м/мин и более [1].

Конструктивные особенности главного привода. В первом поколении многоцелевых станков с ЧПУ использовали главный привод с неуправляемым трёхфазным асинхронным электродвигателем и автоматической коробкой скоростей. Станки второго поколения имели главный привод с бесступенчато управляемым электродвигателем постоянного тока без коробки скоростей. В третьем поколении станков в основном применяют главный привод с частотно-управляемыми асинхронными и синхронными электродвигателями переменного тока, позволяющих в широком диапазоне бесступенчато изменять скорость вращения с помощью программируемых инверторных преобразователей, которые получили широкое применение в конце XX века. Они позволяют уменьшать частоту переменного тока от номинального значения $f_n = 50 \text{ с}^{-1}$ практически до нуля, а также увеличивать её до 400 с^{-1} и более.

Нагрузочная характеристика трёхфазного асинхронного электродвигателя (рис. 1а) показывает, что при номинальном крутящем моменте M_n номинальная скорость вращения ротора n_n меньше скорости вращения магнитного поля статора $n_0 = 60f_n$, об/мин, где $f_n = 50, \text{ с}^{-1}$ – номинальная частота общепромышленного переменного тока. Значение относительного отставания (скольжения) ротора $s = (n_0 - n_n)/n_0 = 0.04 \div 0.06$ для неуправляемых и $s = 0.02$ для частотно-управляемых асинхронных электродвигателей [2].

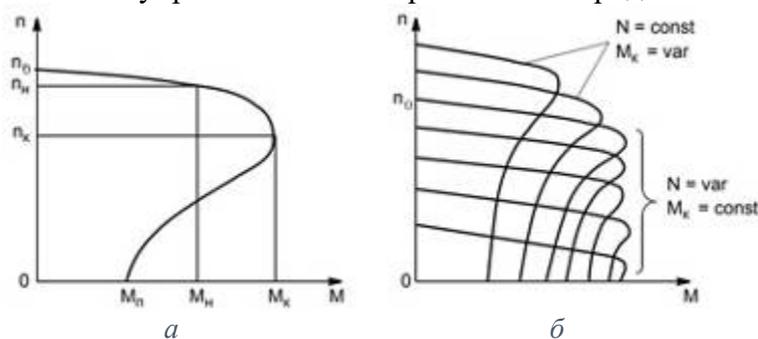


Рис. 1. Нагрузочная характеристика асинхронных электродвигателей
а – неуправляемых, б – частотно-управляемых

С увеличением частоты переменного тока от номинального значения $f_n = 50 \text{ с}^{-1}$ при сохранении номинальной мощности $N_n = M_n f_n$ уменьшается крутящий момент M частотно-управляемого асинхронного электродвигателя и снижается крутильная жесткость его нагрузочной характеристики $\varphi_s = 3000 N_n / (f_n f_{ш})$, где $f_{ш} = n_{ш} / 60 \text{ (с}^{-1}\text{)}$ – частота тока, необходимая при требуемой скорости вращения шпинделя $n_{ш} > n_n$, об/мин. Это повышает вероятность резонанса вынужденных и собственных крутильных колебаний шпинделя, особенно при скоростном фрезеровании. Резонанс увеличивает амплитуду крутильных колебаний привода, снижает долговечность подшипников качения электродвигателя и шпинделя, стойкость режущего инструмента и качество обработки.

В главном приводе высокоскоростных станков с ЧПУ применяют мотор-шпиндели с встроенным синхронным вентильным электродвигателем, который не имеет скольжения ротора и позволяет изменять напряжение в обмотках статора с 380 В на 220 В и обратно за счёт электронного изменения их коммутации на треугольник Δ или звезду Y .

Диапазон изменения скорости вращения то главного привода имеет три поддиапазона:

- поддиапазон R_1 позволяет уменьшением частоты тока от номинального значения $f_n = 50 \text{ с}^{-1}$ бесступенчато снижать скорость вращения ротора от номинального значения до необходимого минимального значения $n \ll n_n$ при сохранении номинального крутящего момента M_n и пропорциональном уменьшении мощности $N = N_n n / n_n$;

- поддиапазон R_2 позволяет повышением частоты тока от 50 с^{-1} до 300 с^{-1} бесступенчато увеличивать скорость вращения ротора n до первого максимума $n_1 \approx 6n_n$ об/мин при сохранении номинальной мощности N_n и пропорциональном снижении крутящего момента $M = M_n n_n / n$;

- поддиапазон R_3 в позволяет электронным переключением обмоток статора с треугольника Δ на звезду Y понизить напряжение трёхфазного переменного тока с 380 до 220 В, чтобы избежать перегрева мотор-шпинделя, и дальнейшим повышением частоты тока до 400 с^{-1} бесступенчато увеличивать скорость вращения ротора до второго максимума $n_2 \approx 8n_n$ при одновременном снижении мощности $N = 0,6N_n n / n_n$ и крутящего момента $M = 0,6M_n n_n / n$.

У шпинделей фрезерно-расточных станков, имеющих базирование инструментальной оправки по конусу 7:24 (рис. 2а), при скорости вращения более 10000 об/мин центробежные силы увеличивают диаметр конуса на 5÷10 мкм и механизм зажима инструментальной оправки дополнительно затягивает её в шпиндель. При этом на 20÷40 мкм изменяется осевое положение инструмента и значительно увеличивается усилие, необходимое для автоматической смены инструмента. Этот недостаток устранён в комбинированных соединениях, имеющих базирование инструментальной оправки по конусу и торцу шпинделя.

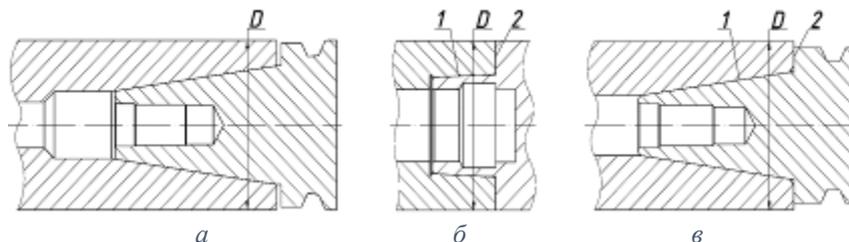


Рис. 2. Типы соединения шпинделя с инструментальной оправкой

Наибольшее применение получило комбинированное соединение HSK с базированием инструментальной оправки по короткому конусу 1:10 и торцу шпинделя (рис. 2.б), что повышает жесткость базирования в 3÷5 раз и не требует точного углового позиционирования шпинделя при автоматической смене инструментов, так как передаёт необходимый крутящий момент без торцевой шпонки шпинделя.

В комбинированном соединении BigPlus (BP) инструментальная оправка базируется в шпинделе по конусу 7:24 и торцу (рис. 2в). Для этого конус оправки имеет продольные разрезы и при затягивании в шпиндель упруго сжимается до замыкания торца. Жест-

кость соединения ВР на 30÷40 % больше, чем соединения с жестким конусом 7:24. Достоинством соединения ВР является возможность использования инструментальной оправки с жестким конусом 7:24, однако при этом между торцами шпинделя и оправки остается зазор.

Недостатком комбинированных соединений являются: высокие требования к точности базовых поверхностей шпинделя и инструментальной оправки, необходимость их обдува сжатым воздухом для удаления загрязнений при автоматической смене инструмента, вытягивание инструментальной оправки из шпинделя при большой радиальной нагрузке.

Более 90 % современных станков имеют шпиндели главного привода с роликовыми или шариковыми подшипниками качения, которые являются покупными изделиями, обеспечивают необходимую точность вращения, жесткость, быстроходность и удобство эксплуатации.

Показанные в таблице 2.2 компоновки шпиндельных подшипников качения учитывают, что: передняя опора больше задней влияет на жесткость и точность вращения; жесткость роликовых подшипников в 5÷8 раз больше шариковых; быстроходность шариковых подшипников в 2,5÷3 раза больше роликовых; осевую нагрузку шпинделя должна воспринимать передняя опора, а задняя должна быть плавающей для уменьшения влияния теплового удлинения шпинделя.

Таблица 1.

Основные компоновки шпиндельных опор с подшипниками качения

| № | Компоновка подшипников | | Тип подшипников | | Параметры компоновки |
|---|------------------------|----------------|-----------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|
| | Задняя опора | Передняя опора | Задняя опора | Передняя опора | |
| 1 | | | 4162900 | 697000 | $d_n = 60 \div 200$ мм $d_{II} n_{max} = 3 \cdot 10^5$ мм/мин |
| 2 | | | 3182100 | 3182100 178800 | $d_{II} = 40 \div 160$ мм $d_{II} n_{max} = 4 \cdot 10^5$ мм/мин |
| 3 | | | 3182100 | 46200 46100 | $d_{II} = 30 \div 120$ мм $d_{II} n_{max} = 6 \cdot 10^5$ мм/мин |
| 4 | | | 46100 | 46200 46100 | $d_{II} = 30 \div 100$ мм $d_{II} n_{max} = 7 \cdot 10^5$ мм/мин |
| 5 | | | 36100 | 36200 36100 | $d_{II} = 25 \div 80$ мм $d_{II} n_{max} = 9 \cdot 10^5$ мм/мин |

Внутренние кольца подшипников качения устанавливают на шпиндель по посадкам с натягом $k5$ и $k6$. Для станков класса точности Н и П допускается овальность и конусность опорных шеек шпинделя менее 1÷2 мкм, а для станков класса точности В и А менее 0,5 мкм. Наружные кольца подшипников устанавливают в корпус шпиндельного узла по переходным посадкам $H6$, $H7$, J_56 и J_57 . В передней опоре наружные кольца должны иметь осевую фиксацию, а в задней опоре иметь возможность осевого смещения для компенсации теплового удлинения шпинделя.

В высокоскоростных мотор-шпинделях применяют гибридные радиально-упорные подшипники, имеющие шарики из высокопрочной керамики (нитрид кремния Si_3N_4), плотность которой в 2,5 раза меньше, а модуль упругости в 1,5 раза больше подшипниковой стали, что

повышает быстроходность до $d_{II} n_{max} = 2 \cdot 10^6$ мм/мин.

Радиально-упорные шариковые подшипники устанавливают в опорах шпинделя комплектами: дуплекс-О (рис. 3а), дуплекс-Х (рис. 3б), дуплекс-тандем (рис. 3в) и триплекс-тандем-Х (рис. 3г). Комплект дуплекс-О увеличивает натяг подшипников

при тепловом удлинении шпинделя, что может привести к их заклиниванию. Комплект дуплекс-Х уменьшает натяг при тепловом удлинении шпинделя, что снижает его жесткость и виброустойчивость.

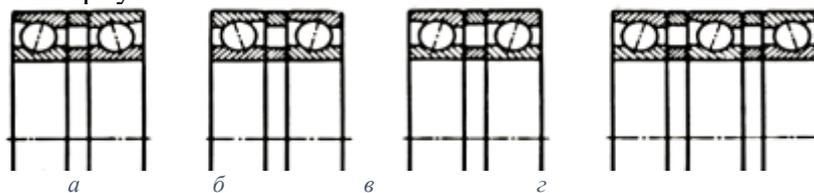


Рис. 3. Дуплексированные комплекты радиально-упорных шариковых подшипников качения, применяемые в опорах шпинделя

Предварительный натяг подшипников качения (до 5 % допустимой нагрузки) значительно улучшает точность вращения, жесткость и виброустойчивость шпинделя. Для натяга сначала выполняют одностороннюю ориентацию радиального биения подшипников передней и задней опоры, а затем притиркой обеспечивают пятно контакта посадочных поверхностей шпинделя не менее 80 %. Жесткий натяг радиально-упорных роликовых и шариковых подшипников обеспечивают дистанционные полукольца, устанавливаемые между наружными и внутренними кольцами при сборке шпиндельного узла. В высокоскоростных мотор-шпинделях между наружными кольцами радиально-упорных шариковых подшипников устанавливают дистанционные полукольца с пьезоприводом, толщину которых изменяют через ЧПУ станка с учетом нагрузки и скорости вращения шпинделя.

Смазывание подшипников качения создает защитную пленку, снижающую трение и износ. Недостаточное смазывание уменьшает долговечность подшипников, а избыточное смазывание увеличивает потери мощности и нагрев.

Смазывание пластичными смазками (мазями) применяют для подшипников каче-

ния вертикальных и наклонных шпинделей при $d_{ш}n_{max} < 6 \cdot 10^5$ мм/мин. Оптимальное

количество смазки в закрытый шариковый подшипник вводят при его изготовлении или монтаже шпинделя и периодически добавляют через специальные каналы.

Смазывание масляным туманом применяют при $d_{ш}n_{max} < 1,5 \cdot 10^6$ мм/мин и осуществляют нагнетанием воздуха под давлением $0,02 \div 0,04$ Н/мм² через маслораспылитель с расходом жидкой смазки $0,02 \div 0,04$ см³/мин на одну опору. Масляный туман хорошо охлаждает опоры и защищает их от проникновения СОТС и загрязнения, но такой станок должен иметь закрытое кабинетное ограждение с фильтрующей вентиляцией, так как масляный туман через зазоры бесконтактных уплотнений может распространяться до 30 м от станка.

Масловоздушное смазывание, не создающее аэрозоли, применяют для высокоскоростных шпинделей ($d_{ш}n_{max} > 10^6$ мм/мин) и осуществляют нагнетанием в межопорную зону шпинделя сжатого воздуха с давлением $0,02 \div 0,04$ Н/мм², в который капельно поступает жидкая смазка до 100 г/ч в одну опору.

Смазывание впрыскиванием осуществляют периодической подачей оптимального объема охлажденной жидкой смазки через специальные дозаторы непосредственно в зазор между сепаратором и внутренним кольцом подшипника, чтобы преодолеть воздушный барьер, возникающий при $d_{ш}n_{max} > 1,5 \cdot 10^6$ мм/мин.

В многоцелевых станках с ЧПУ применяют три основных компоновки главного привода с частотно-управляемым электродвигателем и опорами качения шпинделя:

– при скорости резания $V < 1000$ м/мин и быстроходности $d_{ш}n_{max} < (3 \div 6)10^5$ мм/мин привод может иметь асинхронный электродвигатель, соединенный со шпинделем муф-

той или ременной передачей, подшипники качения с пластичным смазыванием, комбинированную структуру и естественное охлаждение;

– при $V = (1 \div 3)10^3$ м/мин и $d_{ш}n_{max} = (0,6 \div 1,5)10^6$ мм/мин привод может иметь асинхронный электродвигатель с ременной передачей, шариковые подшипники, маслороздушное смазывание и принудительное охлаждение;

– при $V = (3 \div 10)10^3$ м/мин и $d_{ш}n_{max} = (1,5 \div 2,5)10^6$ мм/мин привод должен иметь гильзовую компоновку мотор-шпинделя с синхронным электродвигателем, гибридные подшипники с керамическими шариками, смазывание впрыскиванием и жидкостное охлаждение.

Проектный расчёт жёсткости. При проектном расчёте жёсткости (податливости) шпиндель прямого главного привода представляют двухконсольной цилиндрической балкой ступенчатой формы, которая установлена на двух упругих опорах и нагружена на конце передней консоли радиальной силой резания P . Шпиндель ременного главного привода дополнительно нагружен на задней консоли радиальной силой натяжения ремня $Q \approx k_Q P_{max}$, где: P_{max} – максимальная сила резания; $k_Q = 1,5$ для поликлинового ремня, $k_Q = 1,25$ для зубчатого ремня (рис. 4).

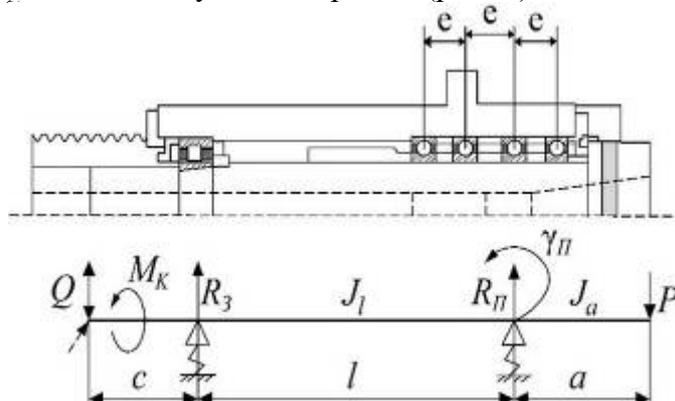


Рис. 4. Расчётная схема шпинделя

Ниже приведены аналитические функции податливости переднего конца шпинделя, полученные с использованием метода Верещагина и принципа суперпозиции [1]:

– функция радиальной податливости при действии только силы P

$$c_P = \frac{a^2}{3E} \left(\frac{a}{J_a} + \frac{l}{J_l} \right) + \frac{(a+l)^2}{j_n l^2} + \frac{a^2}{j_3 l^2} - \left(\frac{a}{3EJ_l} + \frac{a+l}{j_n l^2} + \frac{a}{j_3 l^2} \right)^2;$$

– функция радиальной податливости при действии только силы Q

$$c_Q \approx k_Q \left(\frac{alc}{6EJ_l} - \frac{(a+l)c}{j_n l^2} - \frac{a(l+c)}{j_3 l^2} \right);$$

– функции радиальной податливости при совместном действии сил P и Q , направленных одинаково, противоположно или ортогонально имеют вид:

$$c_{PQ} = c_P + c_Q, \quad c_{PQ} = c_P - c_Q, \quad c_{PQ} = \sqrt{c_P^2 + c_Q^2}.$$

В функциях c_P и c_Q обозначены: a, c – длина консольных участков шпинделя (м), принимаемая возможно малой; l – длина межопорного участка шпинделя (м), определяемая в результате расчёта; J_a и J_l – осевые моменты инерции поперечного сечения шпинделя (м⁴) на участках a и l ; j_n и j_3 – радиальная жёсткость передней и задней опоры шпинделя (Н/м), определяемая по левому графику рис. 5 с учетом числа подшипников в каждой опоре; $\gamma_n = j_p e^2 (k_p - 1) + j_o d_n^2 k_o / 8$ – угловая жёсткость передней опоры шпинделя (Нм/рад), где: e – среднее осевое расстояние между центрами подшипников опоры (м); j_o – осевая жёсткость каждого подшипника опоры (Н/м), опре-

деляемая по правому графику рис. 5; $k_0 = 1$ – при компоновке подшипников № 1, 2, 5 и $k_0 = 2$ – при компоновке № 3, 4 в табл. 1; $d_{\text{п}} \approx (1,4 \div 1,6)d_0$, м – диаметр шпинделя в передней опоре, где d_0 – наибольший внутренний диаметр центрального отверстия полого шпинделя (м). Диаметр шпинделя в задней опоре d_3 должен быть меньше $d_{\text{п}}$ на $5 \div 10$ мм по условиям сборки. Кроме того, $d_{\text{п}}$ и d_3 должны соответствовать диаметру подшипников качения [3, с.145-158].

Максимальная скорость вращения шпинделя $n_{\text{max}} \approx 1,3V_{\text{max}}/D_{\text{max}}$, об/мин, где: D_{max} , м – максимальный диаметр обрабатываемой поверхности (для токарных станков) или инструмента (для фрезерных, расточных и круглошлифовальных станков); V_{max} – максимальная скорость резания. Для конструкционных сталей принимают: при чистовом точении $V_{\text{max}} = 500 \div 1000$ м/мин, при скоростном фрезеровании $V_{\text{max}} = 1500 \div 2000$ м/мин. При обработке цветных сплавов и композитных материалов значения V_{max} увеличивают в $1,5 \div 2$ раза.

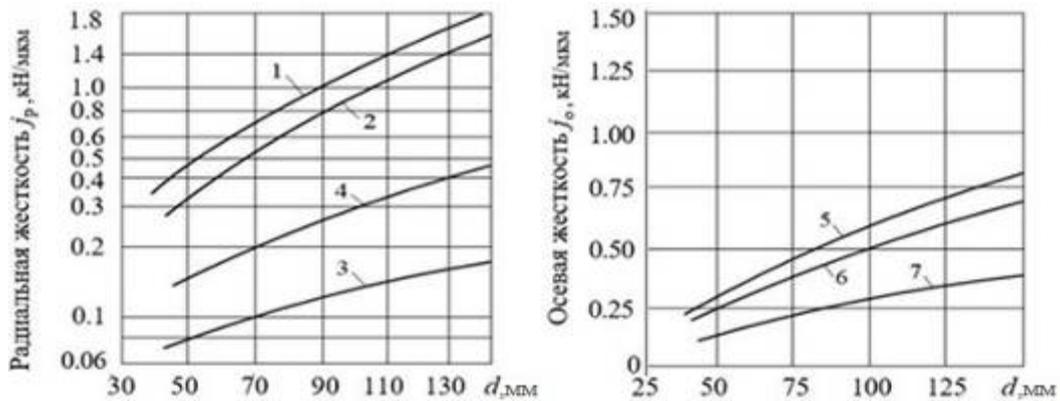


Рис. 5. Жесткость шпиндельных подшипников качения с учётом натяга [3]:

- 1 – радиальный с двумя рядами цилиндрических роликов и конусным отверстием внутреннего кольца, 2 и 5 – радиально-упорный с двумя рядами конических роликов,
- 3 и 7 – радиально-упорный шариковый, 4 – радиально-упорный с керамическими шариками, 6 – упорно-радиальный двухрядный шариковый.

На рис. 6 показана зависимость функций c_P , c_Q и c_{PQ} от изменения безразмерного па-

раметра $l/d_{\text{п}}$ при: $d_{\text{п}} = a = c = 0,065$, м; $j_{\text{п}} = 1,9 \cdot 10^8$, Н/м; $j_3 = 1,8 \cdot 10^8$, Н/м;

$\gamma_{\text{п}} = 1,33 \cdot 10^5$, Нм/рад; $k_Q = 1,25$. Графики 4 и 5 соответствуют функциям c_P и c_Q , графики

1, 2, 3 соответствуют функциям c_{PQ} при одинаковом, противоположном или ортогональном направлении сил P и Q . Видно, что при $l/d_{\text{п}} \approx 2,5$ и одинаковом направлении сил

значение функции $c_{PQ} \approx 0,5 \cdot 10^{-9}$ вдвое меньше значения функции $c_P \approx 0,9 \cdot 10^{-8}$ из-за вза-

имной компенсации упругих деформаций, создаваемых силами P и Q . Следовательно, рациональный выбор компоновки главного привода позволяет минимизировать податливость шпинделя.

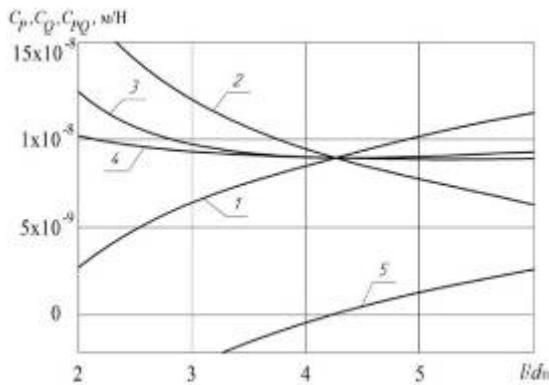


Рис. 6. Зависимость функций c_p , c_Q и c_{pQ} от безразмерного параметра l/d_n

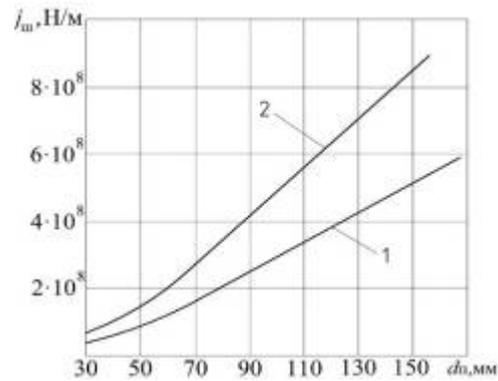


Рис. 7. Достигаемая жесткость шпинделей с опорами качения 1 – шариковыми, 2 – роликовыми

Для проверки расчёта сравнивается жесткость шпинделя с прямым приводом $j_{ш} = 1/c_p$, где c_p – минимальное значение функции на графике 4 рис. 6 с достигаемой в станкостроении жесткостью аналогичных шпинделей (рис. 7). Бóльшее или существенно меньшее значение рассчитанной жесткости указывает на ошибку или неоптимальный выбор параметров шпинделя.

Влияние оснастки шпинделя (патрон с заготовкой для токарных станков или инструментальная оправка для фрезерных и расточных станков) увеличивает суммарную податливость в зоне резания на 70 % и более. Считая, что 50% погрешности размерной обработки Δ_p зависит от суммарной податливости шпинделя с технологической оснасткой, определим допустимое значение максимальной силы резания $P_{max} < 0,3 \Delta_p / c_{pQ}$.

Проектный расчёт виброустойчивости. При проектном расчёте виброустойчивости главного привода определяют допустимые безрезонансные диапазоны крутильных и радиальных колебаний шпинделя, которые соответствуют условиям: $\omega_b < 0,7 \omega_k$ и $\omega_b < 0,7 \omega_p$ – для дорезонансного диапазона, или $\omega_b > 1,3 \omega_k$ и $\omega_b > 1,3 \omega_p$ – для зарезонансного диапазона, где ω_b – наибольшая частота вынужденных крутильных и радиальных колебаний шпинделя, ω_k – минимальная частота собственных крутильных колебаний шпинделя, ω_p – минимальная частота собственных радиальных колебаний шпинделя.

Максимальное значение частоты вынужденных крутильных и радиальных колебаний шпинделя $\omega_b = z_{ш} n_{ш} / 60$ (c^{-1}), где $n_{ш}$ – скорость вращения шпинделя (об/мин); $z_{ш}$ – число вынужденных колебаний за один оборот шпинделя. При фрезеровании $z_{ш}$ равно числу зубьев фрезы, при точении заготовки с дисбалансом $z_{ш} = 1$, при точении заготовки с периодическими некруглостями $z_{ш}$ равно числу некруглостей, при чистовом точении и растачивании $z_{ш} \approx 0,5 k_n$, где k_n – число тел качения в радиальном подшипнике опоры.

Минимальное значение собственной частоты крутильных колебаний шпинделя прямого главного привода с частотно-управляемым асинхронным электродвигателем (без учёта демпфирования) $\omega_k = \sqrt{\varphi_3 / J_{ш}} / (2\pi)$, где: $J_{ш} = \sum_1^i [m_i (d_{ni}^2 + d_{bi}^2) / 8]$ – центробежный момент инерции массы шпинделя ($Нмс^2$), где: m_i – масса каждой вращающейся части шпинделя ($Нс^2/м$), d_{ni} и d_{bi} – усреднённые значения наружного и внутреннего диаметра вращающихся частей шпинделя (м), i – число вращающихся частей шпинделя; $\varphi_3 = 3000 N_n / f_n f_{ш}$ и N_n – крутильная и номинальная жесткости электродвигателя ($Нмс$); $f_n = 50 c^{-1}$ – номинальная частота переменного тока; $f_{ш} = n_{ш} / 60$ – частота переменного тока (c^{-1}), необходимая для увеличения скорости вращения шпинделя. С учётом значения крутильной жесткости электродвигателя получено $\omega_k \approx 9 \sqrt{N_n / (J_{ш} f_n f_{ш})}$.

Минимальное значение собственной частоты радиальных колебаний шпинделя (без

учёта демпфирования) $\omega_p = \sqrt{j_{ш}/m_{пр}}/(2\pi)$, где: $m_{пр} = m_a m_i m_c / (m_a m_i + m_i m_c + m_a m_c)$ – приведённая масса шпинделя ($\text{Нс}^2/\text{м}$); m_i, m_a, m_c – масса межопорного и консольных участков шпинделя с учётом оснастки ($\text{Нс}^2/\text{м}$); $j_{ш}$ – радиальная жесткость шпинделя.

На рис. 8 приведена диаграмма виброустойчивости прямого главного привода с частотно-управляемым асинхронным электродвигателем и опорами качения, имеющего параметры: при: $N_n = 12 \cdot 10^3$ (Нм/с); $n_{\max} = 12000$ (об/мин); $d_n = 0,065$ (м); $l/d_n = 2,5$; $J_{ш} = 5,8 \cdot 10^{-3}$ Нмс^2 ; $j_{ш} = 1,24 \cdot 10^8$ Н/м ; $\gamma_{пр} = 1,23 \cdot 10^5$, Нм/рад ; $m_{пр} = 7,4$, $\text{Нс}^2/\text{м}$.

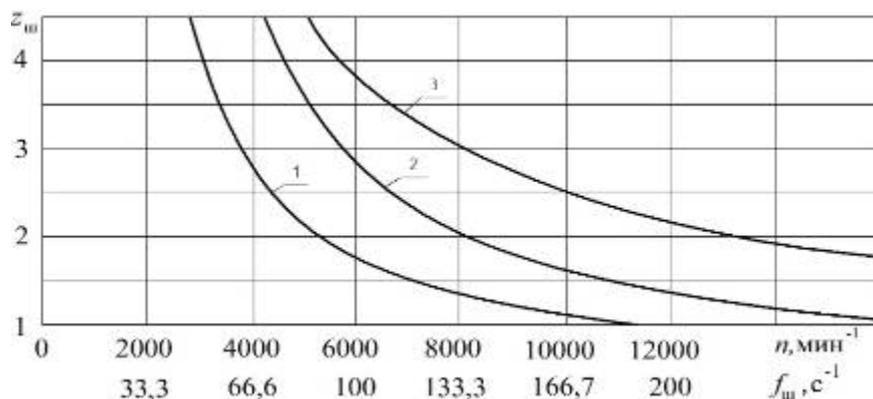


Рис. 8. Диаграмма виброустойчивости прямого главного привода с частотно-управляемым электродвигателем

Диаграмма соответствует следующим уравнениям, определяющим параметрические диапазоны дорезонансных, резонансных и зарезонансных колебаний шпинделя:

– уравнение $z_{ш} < 6\sqrt{N_n / (J_{ш} f_n f_{ш}^3)}$ определяет дорезонансный диапазон крутильных и радиальных колебаний шпинделя (ниже графика 1), который рекомендуется использовать при силовом точении и фрезеровании труднообрабатываемых материалов;

– уравнения $z_{ш} > 6\sqrt{N_n / (J_{ш} f_n f_{ш}^3)}$ и $z_{ш} < 11\sqrt{N_n / (J_{ш} f_n f_{ш}^3)}$ определяют резонансный диапазон крутильных колебаний шпинделя (между графиками 1 и 2), который не рекомендуется использовать для обработки;

– уравнения $z_{ш} > 10\sqrt{N_n / (J_{ш} f_n f_{ш}^3)}$ и $z_{ш} < 0,1\sqrt{j_{ш} / m_{пр}} / f_{ш}$ определяют диапазон зарезонансных крутильных и дорезонансных радиальных колебаний шпинделя (между графиками 2 и 3), который рекомендуется использовать для скоростного точения и фрезерования;

– уравнение $z_{ш} < 0,1\sqrt{j_{ш} / m_{пр}} / f_{ш}$ определяет резонансные и зарезонансные радиальные колебания шпинделя (выше графика 3), которые не рекомендуются для обработки.

Для ременного привода уравнения параметрических диапазонов крутильных и радиальных колебаний шпинделя, аналогичны рис. 8, если крутильная жесткость ременной передачи $\varphi_p \gg \varphi_3$. При $\varphi_p \approx \varphi_3$ допустимые значения $z_{ш}$ уменьшаются в 1,4 раза.

Для скоростного мотор-шпинделя с синхронным вентильным электродвигателем, который не имеет резонанса крутильных колебаний, параметрический диапазон дорезонансных радиальных колебаний шпинделя расположен ниже графика 3.

Заключение. Приведенная методика и результаты проектного расчёта жесткости и виброустойчивости главного привода многоцелевых станков с частотно-управляемым электродвигателем и опорами качения шпинделя позволяют сделать следующие выводы:

1. В наиболее известной методике проектного расчёта радиальной жесткости шпинделя с опорами качения [3] и [4] влияние защемляющего момента передней опоры при изгибе и

перекосе консольно нагруженного шпинделя учитывается эмпирическим коэффициентом, значение которого приближенно зависит от компоновки подшипников качения шпинделя. В уточнённой методике проектного расчёта аналитически определена угловая жесткость γ_{Π} передней опоры, влияние которой учитывает четвёртое слагаемое функции c_p .

2. Уравнения, определяющие параметрические диапазоны крутильных и радиальных колебаний шпинделя, необходимо использовать при программировании многоцелевых станков, чтобы обеспечить безрезонансную работу главного привода

3. В руководство по эксплуатации многоцелевых станков необходимо включать диаграмму виброустойчивости шпинделя главного привода, аналогичную рис. 5.

Библиографические ссылки

1. Шатохин, С.Н. Безрезонансное фрезерование на станках с ЧПУ / С.Н. Шатохин, М.В. Брунгардт, А.В. Брунгардт // М.: Технология машиностроения, 2023, №11. – С. 5-10.

2. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студентов высших учебных заведений / Г.Г. Соколовский // М.: Издательский центр Академия, 2006. – 272 с.

3. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов / Колл. авторов под ред. В.Э. Пуша // М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.

4. Кочергин, А.И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. Курсовое проектирование: учеб. пособие для вузов / А.И. Кочергин // Минск: Высшая школа, 1991. – 382 с.

© Брунгардт А.В., Брунгардт М.В., Шатохин С.Н., 2024

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЧАСТИЧНО-БАЛАНСОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТИХОХОДНЫХ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНЫХ ТУРБИН

А. А. Кишкин, Ю. Н. Шевченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: spsp99@mail.ru

В настоящей работе приведены основные соотношения, позволяющие построить алгоритм обработки данных по результатам испытаний машин и агрегатов, использующих газы и пары как рабочее тело, при оценке энергетических параметров в балансовых и энергетических испытаниях используются традиционные понятия, как в конструкционных, так и энергетических определениях.

Ключевые слова: уравнение энергии Бернулли, энтальпия, число Маха, уравнение состояния, относительные скорости, давления, температура, адиабатная работа, окружная мощность, полезная мощность, подводящее устройство (направляющий аппарат), рабочее колесо ступени.

Энергетические испытания проводятся с элементами балансовых испытаний, возможных на материальной части физического макета с дополнительной установкой измерительных (станций) постов:

p^* - полного давления; p – статического,

$T_{изм}$ - измеренной равновесной температуры.

Расположение постов (измерительных станций), с целью коррекции расчетного алгоритма, полностью совпадает с принятой расчетной схемой рис. 1.

Последовательность постов измерений соответствует:

- пост измерений перед входом в каналном подводе $p_{вх}^*$; $T_{вх}^* = T_{вх}$,

- в канале подводящего устройства p_0 ; p_0^* , $T_{0изм}$;

- на выходе из каналного подводящего устройства, на входе в рабочее колесо p_1 ; p_1^* , $T_{1изм}$ где p_1^* - измеряется в окружном направлении;

- на выходе из рабочего колеса на радиусе R_2 ; p_2 ; p_2^* , $T_{2изм}$.

Поскольку технически сложно разместить приемник полного давления на радиусе R_1 , продувка каналных подводящих устройств проводятся в специальном приспособлении, без рабочего колеса, на радиусе входе в рабочее колесо, при необходимости эти испытания согласуются по p_1 - статическому давлению при энергетических испытаниях.

Методика обработки результатов на участке /вх – о/

Измеряемое $p_{вх}^*$; $T_{вх}^*$; p_0 ; p_0^* , $T_{0изм}$:

Алгоритм обработки результатов сформирован по основным термо- и газодинамическим функциям [1, 2, 3, 4].

Исходные данные замеров:

p [Н/м²] – статическое давление;

p^* [Н/м²] - полное давление;

$T_{изм}$ (°K) - измеренная температура.

Расчетные параметры:

- число Маха:

$$M = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{p^*}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}; \quad (1)$$

- коэффициент восстановления температуры:

$$r = 0,9; \quad (2)$$

- статическая температура в сечении:

$$T = \frac{T_{изм}}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot r \cdot M^2}; \quad (3)$$

- относительная температура в сечении:

$$\tau_f = \frac{1}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2}; \quad (4)$$

- температура торможения:

$$T^* = \frac{T}{\tau_f}; \quad (5)$$

- плотность газа:

$$\rho = \frac{p}{RT}; \quad (6)$$

- скорость в сечении по первому способу:

$$C_{(1)} = M \sqrt{kRT}; \quad (7)$$

- скорость в сечении по второму способу:

$$C_{(1)} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot RT^* \left[1 - \left(\frac{p_1}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (8)$$

Примерный расчет: $R = 287,7$ [Дж/кг·K]; $k=1,4$ воздух.

Исходные данные: $p = 100000$ [Н/м²]; $p^* = 140000$ [Н/м²]; $T_{изм} = 293$ [K].

Расчетные данные:

- $M = 0,71$;

- $\tau_f = 0,714$;

- $r = 0,9$;

- $T = 268,7$ [°K];

- $\tau_f = 0,916$;

- $T^* = 293,3$ [°K];
 - $\rho = 1,296$ [кг/м³];
 - $\rho^* = 1,776$ [кг/м³];
 - $C_{(1)} = 234$ [м/с] - по первому способу;
 - $C_{(2)} = 233,6$ [м/с] - по второму способу.
- Уравнение Бернулли:

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{p^*}{\rho^*} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p}{\rho} + \frac{C^2}{2};$$

$$294648 \approx 297345 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right].$$

$M_0; T_0; \nu_{f0}; T_0^*; \rho_0; P_{ex}^*; C_0; P_0^*$.

Дополнительно рассчитывает массовый расход двумя способами для исключения промаха.

$$\square \quad m = \rho_0 \cdot C_0 \cdot F_0 = \rho_0 \cdot F_0 \cdot m \cdot q_{f0}; \quad (9)$$

$$\text{где } m = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \frac{1}{R}}; \quad (10)$$

$$q_{f0} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \frac{M_0}{\left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_0^2 \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}; \quad (11)$$

$F_0 = h_0 \cdot b_0$ – площадь проходного сечения канала подводящего устройств.

Коэффициент потерь ξ_{ex} рассчитывается:

$$\frac{2}{C_0} \cdot \frac{k}{(k-1)} \left(\frac{P_{ex}^*}{\rho_{ex}} - \frac{P_0^*}{\rho_0} \right) = \xi_{ex}. \quad (12)$$

Методика обработки результатов на участке /0 - 1/

Измеренные: $P_{10}^*; P_1; T_{1 \text{ изм}};$

Известны: $P_0^*; P_0; T_{0 \text{ изм}}.$

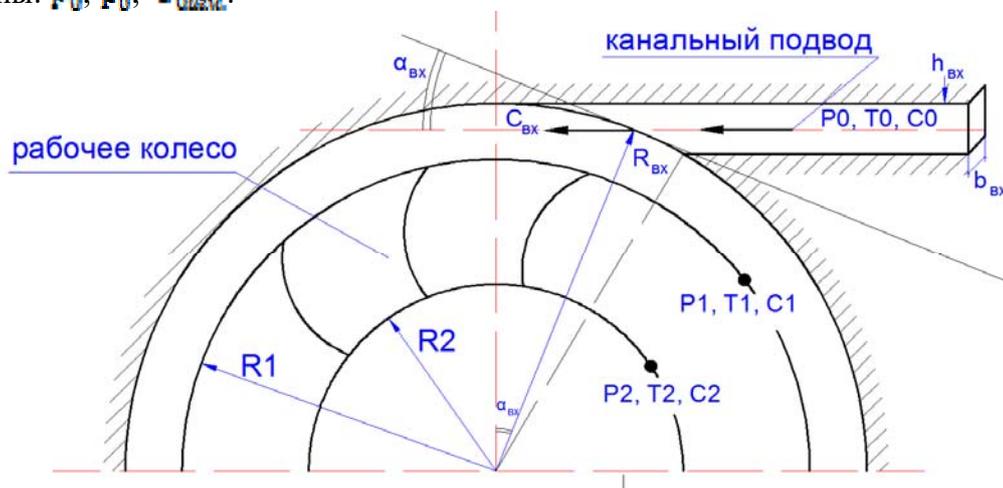


Рис. 1. Расчетная схема радиальной ступени

Рассчитываются по выражениям (2..8) для окружной составляющей C_{1u}

$$M_{1u}; T_{1u}; \tau_{f1}; T_{1u}; C_{1u}; p_u; \quad (13)$$

Параметры рассчитаны по окружной составляющей C_{1u} необходима коррекция:

$$C_1 = \sqrt{C_{1u}^2 + C_{1R}^2}; \quad (14)$$

где C_{1R} – радиальная составляющая абсолютной скорости на входе определяется в первом приближении $p_1 = p_{1u}$,

$$C_{1R} = \frac{\dot{m}}{\rho_1 \cdot F_2} = \frac{\dot{m}}{\rho_1 \cdot 2\pi R_1 \cdot b_1}, \quad (15)$$

где \dot{m} (9).

Корректируется полное давление:

$$p_1^* = p_1 + \frac{C_1^2}{2} \cdot \frac{k-1}{k}. \quad (16)$$

И совершается прогон (1..8) пока $\frac{C_{li+1} - C_{li}}{C_{li+1}} \leq 0,01$.

При известных C_{1i} ; C_{1u} ; C_{1R} рассчитывается угол абсолютной скорости:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{C_{1R}}{C_{1u}}; \quad (17)$$

Угол относительной скорости:

$$\beta_1 = \arctg \frac{C_{1R}}{C_{1u} - U_1} = \arctg \frac{C_{1R}}{(C_{1u} - \omega_1 \cdot R_1)}. \quad (18)$$

$$W_1 = \frac{|C_{1u} - U_1|}{\cos \beta_{1u}}.$$

Угол атаки:

$$i = \beta_{1u} - \beta_1, \quad (19)$$

где β_{1u} - конструктивный параметр.

Коэффициент потерь сопла (подводящего аппарата):

$$\zeta_{C_0} = \left(\frac{p_0^*}{\rho_0} - \frac{p_1^*}{\rho_1} \right) \cdot \frac{2}{C_0^2} \cdot \frac{k}{(k-1)}. \quad (20)$$

Методика обработки результатов на участке /1 - 2/

Измерение: p_{2u}^* ; p_2 ; $T_{2m \text{ изм}}$;

Известны: p_1^* ; p_1 ; T_1 .

В первом приближении C_{2u} рассчитываются по (1...8) по p_u^* .

Абсолютная скорость на входе:

$$C_2 = \sqrt{C_{2u}^2 + C_{2R}^2}; \quad (21)$$

где в первом приближении $p_u = p$.

$$C_{2R}^2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 \cdot F_2} = \frac{\dot{m}}{\rho_2 \cdot 2\pi \cdot R_2 \cdot b_2}, \quad (22)$$

где \dot{m} (9) – массовый расход.

Корректируется полное давление:

$$p_2^* = p_2 + \frac{C_1^2}{2} \cdot \frac{k-1}{k}. \quad (23)$$

И совершается прогон (1...8) до относительной точности 0,01.

В результате известны p_2^* ; C_2^* ; C_{2u} ; C_{2R} ; β_2^* ; p_2 . (24)

Если известно $p_2 = p_{атм}$; $P = P_{атм}$, то:

$$C_{2R} = \frac{\dot{m}}{\rho_2} \cdot \frac{1}{2\pi R_2 b_2}; \quad (25)$$

$$W_2 = \frac{C_{2R}}{\sin \beta_{2л}}; \quad (26)$$

где β_2 - задано конструктивно;

$$C_2 = \sqrt{W_2^2 + (\omega \cdot R_2)^2 - 2W_2 \cdot R_2 \cdot \omega \cdot \cos \beta_{2л}}, \quad (27)$$

$$\begin{aligned} C_{2u} &= U_2 - W_2 \cdot \cos \beta_{2л}, \\ U_2 &= \omega \cdot R_2. \end{aligned} \quad (28)$$

Составляющие скоростей для (25), рассчитываются по (26...29).

Коэффициент потерь для рабочего колеса рассчитывается:

$$\xi_k = \left[\left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} \right) \frac{k}{k-1} - \left(\frac{U_1^2 - U_2^2}{2} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2} \right) \right] \cdot \frac{2}{W_2^2}. \quad (29)$$

$$U_1 = R_1 \cdot \omega, \quad U_2 = R_2 \cdot \omega.$$

$$W_1 = \frac{C_{1u} - U}{\cos \beta_{1л}}. \quad (30)$$

W_2 берется из (27).

Энергетические характеристики ступени

Адиабатная работа:

$$L_{ад} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_0^*}{\rho_0^*} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (31)$$

Скорость адиабатного истечения:

$$C_{ад} = \sqrt{2L_{ад}}. \quad (32)$$

По значениям (15..18) отношения

$$\frac{U_1}{C_1} = \frac{\omega \cdot R_1}{C_1}. \quad (33)$$

Затраченная мощность:

$$N_{затр} = m \cdot L_{ад}, \quad (34)$$

где m берется из (9).

Полезная работа на валу:

$$N_{пол} = M_2 \cdot \omega, \quad (35)$$

ω - угловая скорость,

M_2 - реактивный момент балансирующего подвеса генератора.

$$M_2 = P_{изм.} \cdot L_{изм.}$$

Окружная мощность:

$$N_u = M_u \cdot \omega = L_u \cdot m (C_{1u} U_1 - C_{2u} U_2). \quad (36)$$

Окружной момент:

$$M_u = \frac{m}{\omega} (C_{1u} U_1 - C_{2u} U_2). \quad (37)$$

Окружной КПД ступени:

$$\eta_u = \frac{N_u}{N_{затр}}; \quad (38)$$

Полный КПД ступени:

$$\eta = \frac{N_{пол}}{N_{затр}}. \quad (39)$$

Экспериментальная продувка канальных подводящих устройств производилась в специальном приспособлении, имитирующем энергетическую установку [5] и позволяющую производить измерения по трем измерительным постам (0;1;2), согласно схеме (рис. 1).

Библиографические ссылки

1. Шевченко Ю.Н., Шилкин О.В., Кишкин А.А., Капуцак К.И., Келлер А.И. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В КОНТРОЛЬНОМ СЕЧЕНИИ ТУРБУЛЕНТНО-ГАЗОВОГО ПОТОКА // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика [Электронный ресурс] : сб. материалов V Всерос. науч.-практ. конф. (27–28 февраля 2023 г., Красноярск). СибГУ им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия. С.28-32.
2. Галеркин Ю.Б., Рекстин Ф.С. Методы исследования центробежных компрессорных машин. Издательство «Машстроение», Ленинград, 1969, 304 с.
3. Кутателадзе, С.С. Теплопередача при конденсации и кипении 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Машгиз, 1952. – 232 с.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Москва, Атомиздат, 1979г. – 416 с.
5. Органический цикл Ренкина в автономной теплоэнергетической системе : монография / А. А. Кишкин, О. В. Шилкин, А. В. Делков и др. ; под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Кишкина ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2019. – 234 с.

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ЭЖЕКТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УЛАВЛИВАНИЯ ФАКЕЛЬНОГО ГАЗА

В. В. Дергунов, Н. А. Шепета

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 82
E-mail: vova_dergunov@mail.ru

В данной статье рассмотрена разработка оптимальной конструкции эжектора путем программного моделирования. Приводятся основные данные по оценке наиболее эффективной формы, с помощью которой можно увеличить эффективность работы. Кроме этого, в статье показаны графические представления потоков рабочей среды, а также их параметры.

Ключевые слова: эжектор, сопло, винтовой рельеф, диффузор.

Факел – барометр нефтехимической промышленности. Комплексное использование факельного газа – одно из важных средств снижения стоимости производства и потребления. Технология извлечения и утилизации факельного газа (*FGRU*) использует факельный газ в качестве топлива или сырья для снижения выбросов факельного газа и повышения удельной производительности.

Самым распространенным в мире способом улавливания газа является использование компрессорных установок, при котором сжатие и сбор газа происходит с использованием жидкостнокольцевых компрессоров. Однако данный метод требует значительных затрат на энергопотребление. Для решения данной проблемы предлагается использование интегрированной установки газового эжектора вместо компрессора.

Эжекторы имеют простую геометрию и не имеют движущихся частей. Их работа не требует подводимой энергии на валу, поскольку они используют энергию существующего газового потока для захвата и сжатия факельных газов. Это значительно снижает массу оборудования и увеличивает надежность. Таким образом, газовые эжекторы идеально подходят для замены существующих компрессорных установок. Применение эжекторов оправдывается меньшими капитальными и эксплуатационными затратами. Кроме того, благодаря подпиточной роли потока природного газа в предлагаемой системе рекуперации для обеспечения приемлемого давления и состава газа, процесс физического разделения будет исключен, что дополнительно снижает удельные затраты. Также эжекторное сжатие потребляет практически в два раза меньше энергии на охлаждение, из-за более низкой температуры газа на выходе.

Обычная система улавливания факельного газа с компрессорной системой сжатия представлена на рисунке 1. Система рекуперации расположена в верхней части факела. При нормальной работе установки большая часть потока газа поступает в систему регенерации (поток 4), а поток с небольшим массовым расходом направляется на факел, чтобы поддерживать факельную систему в режиме ожидания (поток 2).

Замена компрессоров эжекторной системой может значительно снизить потребление электроэнергии почти на 90 %. Основным оборудованием, потребляющим электроэнергию в системе с эжектором, является насос, потребление которого несравнимо с компрессорами.

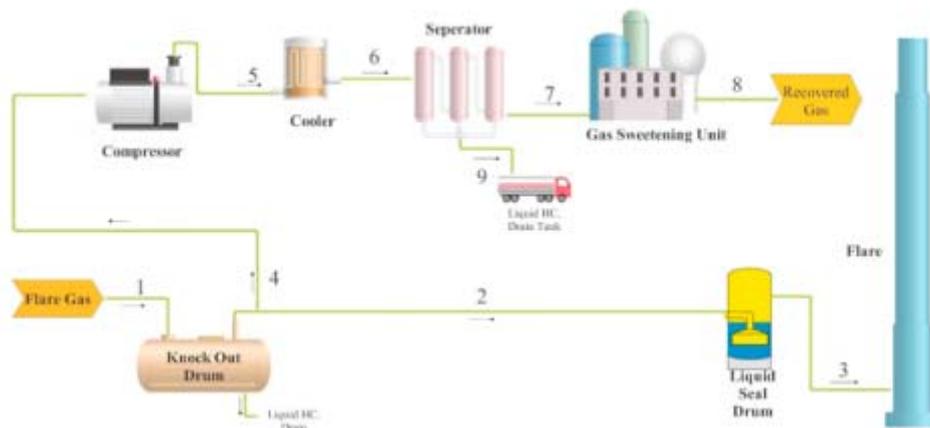


Рис. 1. Система улавливания факельного газа с компрессорной системой сжатия

Несмотря на то, что установка с эжекторной системой не может регенерировать весь газ, в отличие от компрессоров, примерно 90 % всего факельного газа может быть рекуперировано, что приемлемо.

Для увеличения процента улавливаемого газа проводится моделирование с оптимизацией геометрии для проведения сравнительного анализа разных исполнений.

В качестве исходных данных для моделирования использованы исходные данные из рабочих скоростей и давлений применяющихся в производстве компрессорных установок.

Скорость пассивного потока принимается 12 м/с, давление пассивного потока – 1 атмосфера, давление на выходе – 5,2 атмосферы. В процессе моделирования находится оптимальная скорость на входе, максимально возможный расход и скорость на выходе при различных геометрических характеристиках исследуемого эжекторного устройства.

Для стандартного варианта исполнения эжектора найдена скорость на входе (рис. 2) и построен график скорости газа (рис. 3). На основе полученных данных было рассчитано значения давлений в насосе (рис. 4).

Скорость на входе будет равна 22,25 м/с, а на выходе 22,72 м/с. Из результатов гидродинамического расчёта получаем, что давление на входе равняется 555 кПа.

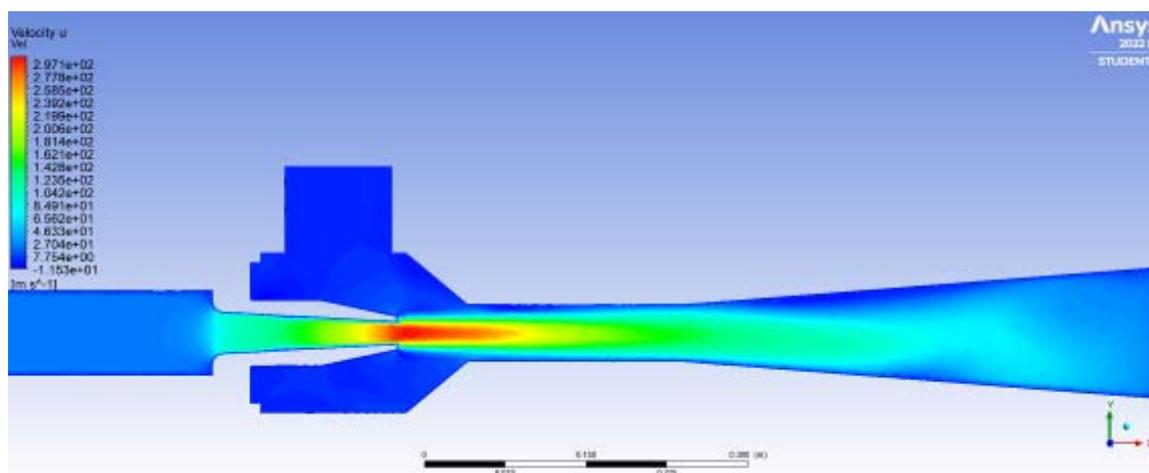


Рис. 2. Определение скоростей

Для увеличения найденных показателей была изменена конструкция эжектора путем добавления винтовой поверхности на внутреннюю поверхность сопла (рис. 5).

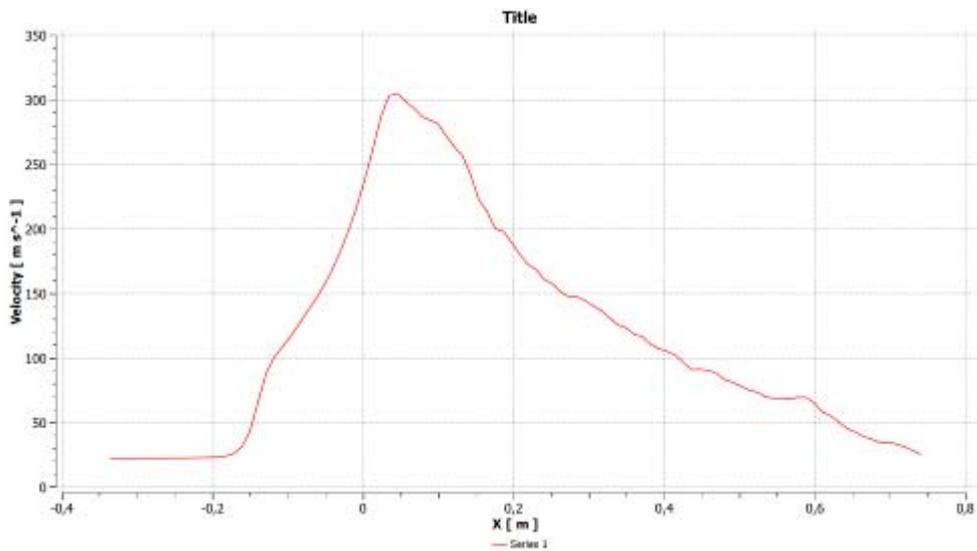


Рис. 3. График скорости стандартного исполнения эжектора

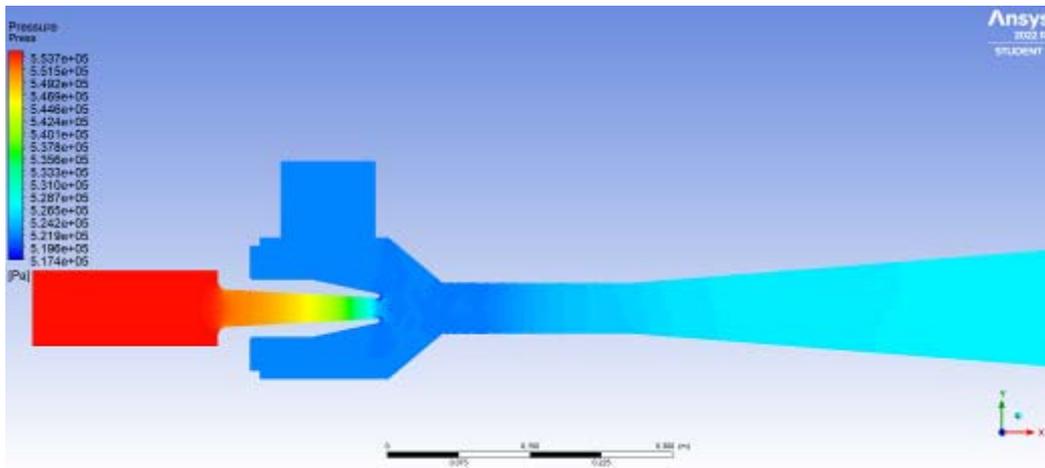


Рис. 4. Распределение давления

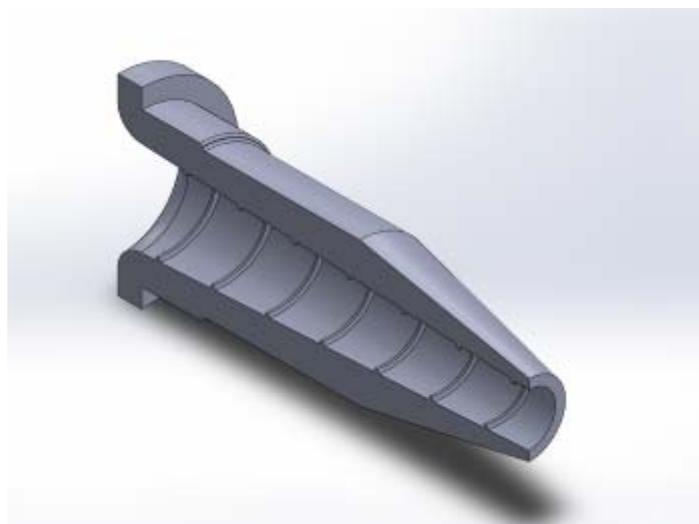


Рис. 5. Разрез сопла с нанесенной винтовой поверхностью

Винтовая поверхность должна повысить эффективность эжекционного процесса за счет снижения гидро-, газодинамических потерь при передаче энергии от активного потока пассивному путем подачи уменьшения турбулентного трения между потоками.

Это обуславливается тем, что винтовая поверхность сопла формирует закрученный, винтообразный активный поток, "проталкивающий" пассивный поток подобно шнеку или поршню. Этим исключают взаимное "проскальзывание" между потоками, а обмен энергиями потоков осуществляют за счет волн сжатия и разрежения, образующихся на границах потоков. Таким образом "проскальзывание" и турбулентное смешение заменяется на "проталкивание". В продольном направлении эжектора вдоль его оси образуют "квазипульсирующее" течение, в котором последовательно и поочередно движутся активный и пассивный потоки, взаимодействуя между собой.

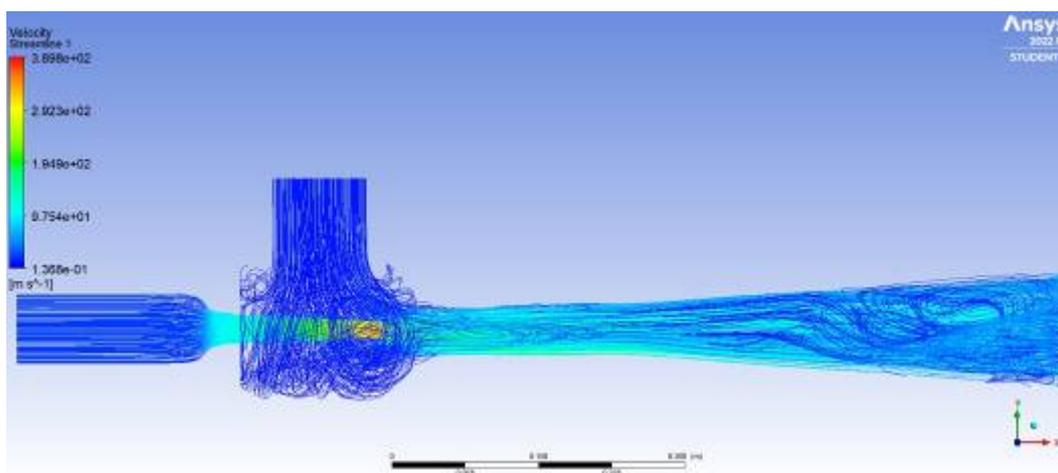


Рис. 6. Линии тока газа и скорость при винтовой поверхности сопла

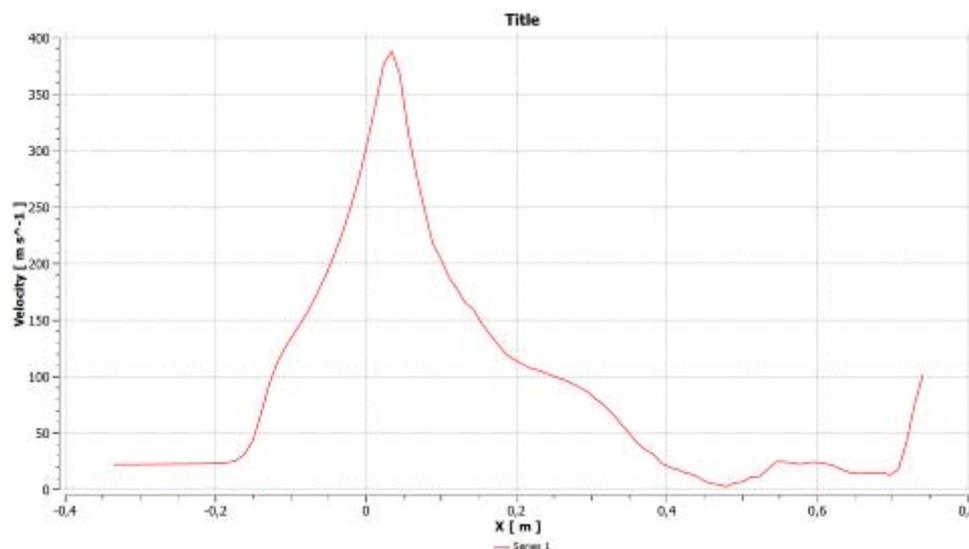


Рис. 7. График скорости при винтовой поверхности сопла

Картина линий тока рабочей жидкости показывает, что на входе в диффузор не возникают возмущения и завихрения потока, которые можно зачастую заметить в аналогичных конструкциях эжекторов, но из-за большей скорости, развиваемой на выходе из сопла потоки отталкиваются от стенок устройства и создают значительные завихрения в диффузоре, что не мешает развивать на выходе скорость, равную 66,76 м/с.

Полученные результаты показывают, что одним из решений существующей проблемы недостаточно эффективного использования факельного газа может послужить установка газоулавливающих конструкций (эжектора). При этом изменение формы сопла конструкции приводит к увеличению эффективности работы эжекторной установки. Моделирование входных и выходных параметров работы стандартной и модернизированной конструкций эжекторных установок позволяет сделать вывод, что изменение геометрии сопла (с нанесенной винтовой поверхностью) дает прирост в скорости потока на выходе, следовательно повышение процента улавливаемого газа.

Библиографические ссылки

1. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов – 2-е изд., перераб. – Москва : Машиностроение, 1982. 423 с.
2. Drewes J. E. Technical Assessment of Produced Water Treatment Technology // The Colorado School of Mines, Golden, CO, 2009. P. 158.
3. Bernoulli's principle // Wikipedia : официальный сайт. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bernoulli%27s_principle.
4. Venturi effect // Wikipedia : официальный сайт. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_effect.

© Дергунов В. В., Шепета Н. А., 2024

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В КАНАЛАХ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ

Черненко В.В., Черненко Д.В., Манохина Э.С.

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, Российская Федерация, Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31
e-mail: 2887722@mail.ru

Аннотация Современные технологии проектирования и создания изделий авиационно-космической техники включают в себя широкое использование компьютерных технологий и систем автоматизации проектирования, что позволяет ускорить процесс разработки и снизить вероятность ошибок. Особое внимание уделяется вопросам безопасности и надёжности создаваемых изделий, а также их соответствию требованиям международных стандартов и нормативных документов. Для этого используются различные методы и инструменты, например методы анализа рисков, испытаний и сертификации. В статье рассматривается методика расчета и анализа течения жидкости в межлопаточном канале центробежного рабочего колеса с конечным числом лопаток. Описаны особенности методики, включающие выражения для определения проекции градиента давления на продольную и поперечную оси. Были получены выражения для проекции градиента давления на продольную ось φ и для производной статического давления по координате. Результаты обеих частей используются для оптимизации числа лопаток в рабочем колесе насоса.

Ключевые слова: центробежный насос, рабочее колесо, напор, оптимизация, градиент скорости, градиент давления, баланс мощностей

Одним из ключевых аспектов в развитии новых ракетно-космических и авиационных систем является обеспечение высоких показателей в области энергетики, ресурсном обеспечении и степени надежности как для отдельных элементов конструкции, так и для всего аппарата в целом. При определении критериев, которым должны удовлетворять эти системы в процессе эксплуатации, необходимо последовательно учитывать следующие этапы: установление тактико-технических требований, разработку технического задания для научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проведение эскизного проектирования, разработку конструкторской и технической документации, а также проведение испытаний и организацию производства. Даже небольшие погрешности на ранних стадиях могут значительно повлиять на затраты на последующие этапы разработки или привести к прекращению проекта. Достижение оптимально высоких показателей энергетики центробежного лопаточного насоса во многом зависит от максимально эффективного преобразования энергии в канале между лопастями рабочего колеса. Соответствующие исследования и рекомендации по проектированию описаны в ряде классических и более современных работах [1-3].

Теплоэнергетические и двигательные установки летательных аппаратов являются ключевыми динамическими компонентами, в которых осуществляются тепломассо- и энергообменные процессы, и в значительной степени определяют эксплуатационные характеристики. Для обеспечения требуемого давления и расходных параметров рабочей среды применяются в основном центробежные насосные агрегаты, которые обладают высокой энергетической эффективностью при небольших массе и габаритах. В двигательных установках летательного аппарата центробежные насосы выполняют роль сис-

темы подачи топлива в камеру сгорания. Эти насосы могут приводиться в действие турбодвигателем, как в случае жидкостных ракетных ступеней, а также обладать электроприводом как в авиационных и космических системах. В гидравлических системах, отвечающих за управление вектором тяги и механизацию, центробежные насосы являются источником мощности [4].

Центробежные насосы нашли применение во многих отраслях промышленности, таких как нефтепромысловое производство, энергетика, фармацевтика, транспорт, пищевая промышленность, химическая промышленность, криогеника и другие. В этих областях существует постоянная потребность в снижении вибрации, пульсации давления и шума, и центробежные насосы способствуют решению этих проблем. Применение современных конструкций проточной части в насосах позволяет достичь значительного снижения указанных параметров [5].

Еще одним важным элементом является межлопаточный канал. В жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) применяются неохлаждаемые лопатки. В схемах без дожигания генераторного газа используются активные турбины, а в схемах с дожиганием - реактивные турбины. Для направления потока используются различные типы турбин - радиальные, осевые, диагональные - с различными профилями межлопаточных каналов. Повышение температуры рабочей среды также способствует увеличению адиабатической работы. Однако из-за конструктивных особенностей и используемых материалов существуют ограничения на рабочую температуру в неохлаждаемой турбине. Обычно для восстановительного газа она составляет 1000-1200 °С, а для окислительного газа 700-900 °С [6].

Действительно, наличие градиента давления в потоке, протекающем по межлопаточному каналу, является сложной вычислительной задачей, особенно в пограничном слое. Однако из-за практической значимости этого вопроса многие исследователи обратили на него внимание, и в настоящее время разрабатываются различные алгоритмические подходы для решения этой задачи.

Эти подходы основываются на приближенных предположениях и эмпирических данных. Исследователи разрабатывают модели, которые учитывают сложность гидродинамических процессов в межлопаточных каналах и позволяют описать движение потока и распределение давления. Данные модели основываются на численных методах, таких как метод конечных элементов. Они позволяют решить уравнения Навье-Стокса для потока в межлопаточном канале и получить приближенные результаты. Кроме того, для улучшения точности и достоверности результатов проводятся экспериментальные исследования, с целью получения эмпирических данных о движении потока в межлопаточных каналах и градиенте давления. Таким образом, с использованием приближенных значений, численных методов и эмпирических данных, исследователи работают над разработкой алгоритмических подходов для решения задачи движения потока в межлопаточных каналах с градиентом давления [6-10].

Научные исследования, посвященные свойствам турбулентного пограничного слоя, имеют важное значение для понимания его консервативных свойств. В этих исследованиях объясняются свойства пограничных турбулентных слоев и рассматривается проблема трения и теплообмена при движении рабочего тела (например, жидкости) в каналах и проточных частях. Исследования также включают анализ теоретических законов предельного трения и теплообмена на поверхностях тел. Особое внимание уделяется тому факту, что турбулентность потока в пристеночной области имеет незначительное влияние на внешние изменения нескольких осредненных параметров потока. В результате исследований были разработаны методы математического расчета, основанные на предельных законах относительного трения и теплообмена. Эти методы позволяют моделировать и предсказывать характеристики потока в турбулентном пограничном слое.

Таким образом, научные исследования в этой области способствуют более глубокому пониманию консервативных свойств пограничного слоя и разработке методов расчета, которые могут быть применены для анализа и проектирования различных систем и устройств, где турбулентность играет важную роль.

Одной из наиболее сложных частей исследования и математического описания является пограничный слой на криволинейной (сферической) поверхности, где возникает точка отрыва, высокий градиент давления и изменение знака производной скорости потока. Определение корректирующих параметров выполняется путем удовлетворения баланса импульса. [4,6,11-13,16,17-20].

Действительно, для расчета поля скорости в потоке необходимо также определить поле давления. Хотя уравнения для градиента давления представлены в неявном виде, параметр давления входит в основное уравнение количества движения. Если поле давления известно, то уравнение может быть решено. Однако, отсутствует прямой способ определения поля давления. Для определения поля давления можно использовать уравнение неразрывности. Поле давления должно быть определено таким образом, чтобы, при его использовании в уравнениях количества движения, полученное поле скорости удовлетворяло уравнению неразрывности. Для этой цели наиболее подходят дискретные аналоги уравнений количества движения и неразрывности. Они позволяют определить поле давления таким образом, чтобы удовлетворить физическим условиям и обеспечить согласованность с остальными уравнениями.

Из-за сложностей, связанных с прямым определением полей давления, были разработаны методы, которые выводят давление из системы определяющих уравнений. Эти методы позволяют определить поле давления, учитывая ограничения и условия системы, и обеспечивают согласованность с другими уравнениями и свойствами потока. Эти методы и подходы описаны в соответствующих исследованиях, включая указанный литературный источник [21].

Цель данной статьи - исследовать методику расчета и анализа течения жидкости в межлопаточном канале центробежного рабочего колеса с конечным числом лопаток. В статье описаны особенности методики, включающие выражения для определения проекции градиента давления на продольную и поперечную оси, производной продольной скорости в поперечном направлении, а также результаты численной и экспериментальной визуализации.

Методика исследования. Используя уравнения Навье-Стокса и уравнение неразрывности, производится расчет профиля скорости потока в межлопаточном канале. При этом учитывается влияние градиента давления на скорость потока, а также изменение скорости в поперечном направлении. Полученные результаты анализируются с помощью численных методов и экспериментальной визуализации.

Проекция градиента давления на продольную ось φ .

Продольная координатная линия φ по определению является проекцией предельной линии тока в ядре потока на ограничивающую поверхность, в нашем случае это внутренняя поверхность покрывного диска в конкретной точке криволинейной линии φ . Направление относительной скорости \vec{W} касательно к этой линии (рис. 1)

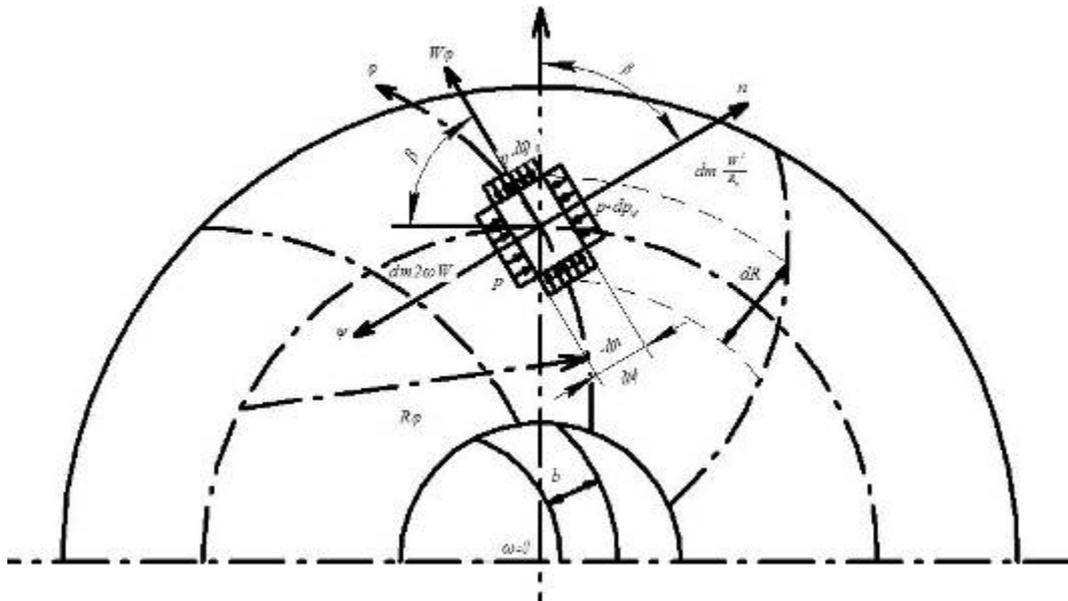


Рис. 1. Расчетная схема ядра потока

Для установившегося относительного движения без учета трения в ядре потока, уравнение движения приобретает вид уравнения Эйлера, которое в проекции на продольную координатную линию запишется в виде:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{W^2}{2} \right) = F_{\varphi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi},$$

где $\partial \varphi$ - элемент продольной координатной линии;

F_{φ} - проекция суммы инерционных сил на координату φ , отнесенная к единице массы, что соответствует инерционному ускорению, взятому с противоположным знаком.

При относительном движении во вращающемся межлопаточном канале рабочего колеса к инерционным силам относятся:

- центробежные силы инерции от вращения рабочего колеса - $\omega^2 R$;
- центробежная сила инерции из-за кривизны линии тока φ - $\frac{W^2}{R}$;
- кориолисова сила инерции - $2\omega W$.

Силой тяжести и внешними инерционными силами пренебрегаем.

Составляющая центробежной силы от вращения координат, связанных с рабочим колесом, равна:

$$\omega^2 R \sin \beta = \omega^2 R \frac{dR}{d\varphi},$$

где $\sin \beta = \frac{dR}{d\varphi}$, (см. рис. 1)

Проекция центробежной силы $\frac{W^2}{R_{\varphi}}$, возникающей из-за кривизны линии тока, и кориолисовой силы - $2\omega W$ на направление φ равны нулю, так как перпендикулярны относительной скорости. Тогда $F_{\varphi} = \sum F_{\text{ин}}$, запишется:

$$F_{\varphi} = \omega^2 R \frac{\partial R}{\partial \varphi}.$$

Подставляя (3) в (1), получим:

$$\frac{\partial \left(\frac{W^2}{2} \right)}{\partial \varphi} = \omega^2 R \frac{\partial R}{\partial \varphi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_\varphi}{\partial \varphi}.$$

Преобразовав в приращение кинетических энергий, получим:

$$\frac{\partial \left(\frac{W_\varphi^2}{2} \right)}{\partial \varphi} - \frac{\partial \left(\frac{U^2}{2} \right)}{\partial \varphi} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi}.$$

Получаем выражение для проекции градиента давления на продольную ось φ

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{U^2}{2} - \frac{W_\varphi^2}{2} \right).$$

где W_φ – скорость в относительном движении, касательная продольной координате φ ;
 $U = \omega R$ – переносная скорость в конкретной точке на линии тока, или:

$$\frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = W \frac{\partial W}{\partial \varphi} - \frac{\omega^2 R dR}{d\varphi}.$$

Проекция градиента давления на поперечную ось ψ .

Выделим в межлопаточном канале элементарный объем жидкости с массой $dm = \rho * b * d\psi d\varphi$, где b – ширина канала в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка (рис 1).

Рассмотрим равновесие элементарного объема жидкости в проекции на поперечную координатную ось ψ , противоположную нормали n к предельной линии тока в относительном движении. На выделенный объем действуют следующие составляющие сил (рис 1):

- поверхностные силы давления, суммарная составляющая которых равна:

$$\left(+\partial p_\varphi * b * d\varphi \right);$$

- составляющая центробежной силы инерции, возникающая из-за кривизны линии тока:

$$\left(-dm * \omega^2 R * \cos \beta = dm * \omega^2 \frac{R * \partial R}{\partial \varphi} \right);$$

- составляющая центробежной силы инерции, возникающая из-за кривизны линии тока:

$$\varphi: \left(-dm \frac{W^2}{R_\varphi} \right);$$

- составляющая кориолисовой силы инерции:

$$\left(+dm * 2\omega W \right).$$

Из условия равновесия сумма всех составляющих равна нулю:

$$+\partial p_\varphi * b * d\varphi - dm * \omega^2 \frac{R * \partial R}{\partial \varphi} - dm \frac{W^2}{R_\varphi} + dm * 2\omega W = 0.$$

Разделим и умножим первый член уравнения (4.5) на $\rho d\psi$ и сократим все члены на $dm = \rho * b * d\psi d\varphi$ и получим уравнение:

$$\frac{+\partial p}{\rho \partial \psi} - \frac{\omega^2 R_\varphi dR}{d\psi} - \frac{W^2}{R_\varphi} + 2\omega W = 0$$

или

$$\frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = -\omega^2 R * \cos \beta - \frac{W^2}{R_\varphi} + 2\omega W ;$$

– производная статического давления по координате ψ , где R_φ – радиус кривизны предельной линии тока, в нашем расчетном случае $R_\varphi = R_n = const$; лопаточный угол $\beta_n = f(\varphi)$.

Необходимо отметить следующее: направление нарастания (увеличения) статического давления совпадает с направлением инерционной силы (и противоположно инерционному ускорению элементарной массы жидкости).

Поперечные волны возникают из-за деформации формы, то есть малых вращательных движений частиц окружающей среды на плоскости, направленной в направлении распространения колебаний. Происходит локальная деформация прямоугольного элемента среды, не изменяя его объема. Таким образом, S-волна называется и волной движения. Поперечная волна распространяется со скоростью в зависимости от скорости. Поперечная волна не распространяется в жидкой и газовой среде, где слабое сцепление элементов вещества не позволяет передавать сдвиговые деформации.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы: были получены выражения для проекции градиента давления на продольную ось φ и для производной статического давления по координате.

Однако, необходимы дальнейшие исследования и проработка метода для его применения к трехмерному течению рабочего тела в канале произвольной формы. Это позволит расширить применимость метода и его точность.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки более эффективных и экономичных насосных агрегатов, что в свою очередь способствует повышению производительности и качества производства в различных отраслях промышленности. Таким образом, полученные выводы являются важным вкладом в разработку и проектирование центробежных насосов с учетом оптимального числа лопаток.

Библиографические ссылки

1. Филин Н.А., Мкртчян М.К. Малоизвестные факты истории создания турбонасосного агрегата в жидкостном ракетном двигателе // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 13 С. 63-73.
2. Назаров В.П., Яцуненко В.Г., Коломенцев А.И. Конструктивно-технологические факторы стабильности энергетических параметров турбонасосных агрегатов ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 101-105.
3. Зуев А.А., Арнольд А.А., Данилов Н.А. Баланс мощностей центробежных насосов энергетических систем летательных и космических аппаратов // Решетневские чтения. 2020. С. 132-133.
4. Назаров В.П., Черненко В.В., Черненко Д.В. Модель течения в рабочем колесе центробежного насоса // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т.22. №3. С. 494-503. DOI. 10.31772/2712-8970-2021-22-3-494-503.
5. Лаптев А.Г. Башаров М.М., Рунов Д.М. Определение коэффициентов теплоотдачи в каналах с элементами интенсификации // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований №3, 2015, С. 311-316.
6. Кишкин А.А., Зуев А.А., Делков А.В., Шевченко Ю. Н. Аналитический подход при исследовании уравнений импульсов пограничного слоя при течении в межлопаточном канале газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 45-60. DOI:10.34759/vst-2021-1-45-60.
7. Laptev, A. G. Dissipative mathematical model of heat transfer in channels with process intensifiers / A. G. Laptev, T. M. Farakhov, E. A. Lapteva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian

Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52045. – DOI 10.1088/1757-899X/919/5/052045.

8. D. A. Zhuikov, A. A. Zuev, V. P. Nazarov. Hydraulic losses in the initial section of a flow parts of at aggregates of liquid rocket engines / // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 22034. – DOI 10.1088/1757-899X/862/2/022034.

9. A. A. Zuev, A. A. Arngold, M. I. Tolstopyatov. Flow with heat transfer in a rotating cavity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019" / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 22026. – DOI 10.1088/1757-899X/537/2/022026.

10. Шкарбуль С.Н. Исследование пространственных течений вязкой жидкости в рабочих колесах центробежных компрессоров: Дисс. ... докт. техн. наук. – Л., 1973. – 398 с.

11. Черненко Д. В. Гидродинамика центробежных лопаточных нагнетателей энергосиловых установок летательных аппаратов // Дисс... канд.техн.наук. – Красноярск, СибГАУ, 2005. 167 с.

12. Chernenko V.V. and Chernenko D.V. Flow model in the impeller of a centrifugal pump // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MIP-III 2021) 29–30 April 2021, Krasnoyarsk, Russia) 2021. 1155 012065 DOI:10.1088/1757-899X/1155/1/012065

13. Кутателадзе С.С, Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоиздат, 1985. – 320с.

14. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Пер. с нем. Г.А. Вольперта; Под ред. Л.Г. Лойцянского. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

15. Лойцянский Л.Г. Ламинарный пограничный слой. – М.: Физматгиз, 1962. – 478 с.

16. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 940 с.

17. Лаптев А.Г. Математические модели и расчет гидродинамических характеристик пограничного слоя / А.Г. Лаптев, Т.М. Фарахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 08 (82). 710-744с. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/52.pdf>.

18. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепло-массообменных процессов. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007. – 500 с.

19. Лаптева Е.А., Фархатов Т.М. Математические модели и расчет тепло-массообменных характеристик аппаратов. Под ред. А.Г. Лаптева. – Казань. Отечество, 2013 –182с.

20. Корочинский В.В. Разработка трубчатых направляющих аппаратов в отводах высокооборотных центробежных насосов с целью снижения вибрации и увеличения ресурса работы // Дисс. ... канд.техн.наук., – Москва, МАИ, 2017. 119 с.

21. Елин В.И., Солдатов К.Н., Соколовский С.М. Насосы и компрессоры – Москва, Изд-во: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1960. – 373 с.

© Черненко В.В., Черненко Д.В., Манохина Э.С., 2024

ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОПОРОШКА ГРАФИТА ДЛЯ ИОНИСТОРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

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

Ионисторы – это приборы нового поколения для накопления и хранения электрической энергии. Ёмкость такого конденсатора можно увеличить путём увеличения площади поверхности электродов, представляющие собой мелкодисперсные частицы. Электрохимический способ позволяет получить графитовый микропорошок с удельной поверхностью 370 м²/кг.

Ключевые слова: ионисторы, графит, порошок, удельная поверхность

Ионистор – это новое поколение электрохимического прибора для накопления и хранения энергии. По энергетической плотности и скорости доступа к запасенной энергии, он занимает промежуточное положение между электролитическим конденсатором большой емкости и небольшим аккумулятором (рис. 1.).

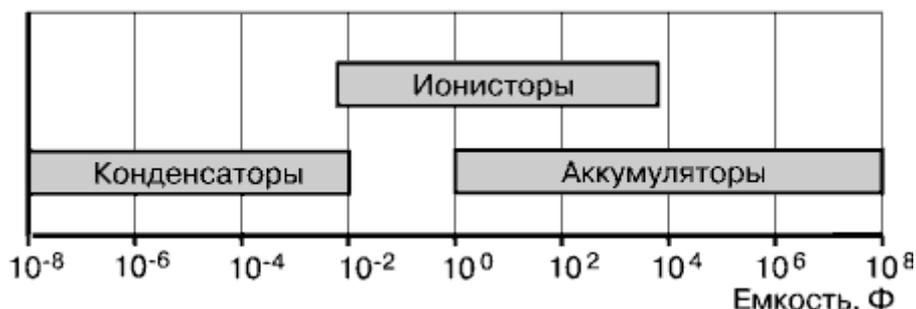


Рис. 1. Диапазон ёмкостей электролитических конденсаторов, ионисторов и аккумуляторов

В последние десятилетия существенный шаг осуществлён в создании и развитии производства мощных энергонакопительных конденсаторов с двойным электрическим слоем, а также их широкое применение в технике.

Некоторые из подобных конденсаторов способны накапливать удельную энергию более, чем 10 кДж/кг, а разряжаться на нагрузку с удельной мощностью порядка 1...10 кВт/кг [1].

Области применения ионисторов:

- телевизоры, СВЧ-печи: резервное питание таймера;
- видеокамеры, платы памяти (резервное питание запоминающего устройства во время смены батарей);
- музыкальные центры (питание микросхем памяти установок тюнера);
- телефоны (резервное питание микросхем памяти для хранения номеров абонентов);
- электронные счетчики электрической энергии;
- охранная сигнализация;

– электронные измерительные приборы и т.п.

Для увеличения ёмкости ионистора необходимо использовать электроды с высокой удельной поверхностью, т.к. ёмкость конденсатора прямо пропорциональна площади поверхности электрода

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}, \quad (1)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

d – толщина двойного электрического слоя (обычно 5...10 нм);

S – общая площадь поверхности электродов.

В качестве электродов в ионисторах чаще всего используют микропористые электронные проводники с высокой удельной поверхностью, например, активированные углеродные материалы [2, 3]. Они содержат большое количество пор с размерами порядка 10^{-9} м и имеют удельную поверхность более 10^6 м²/кг.

Электрохимический способ получения тонкодисперсного порошка из графита основан на свойстве графита диспергироваться в процессе электрохимического окисления [1–3].

В качестве материала анода выбран графит марки МПГ–6 с тонкодисперсной структурой без пор, в качестве электролита используются водные растворы хлоридов, нитратов и гидроксидов. Методика проведения опытов представлена в работах [4–6].

При прохождении электрического тока через анод, происходит реакция образования иона C^{4+} из атомов углерода:



Дальнейшее прохождение электрического тока через систему приводит к образованию молекулярного кислорода O_2 из гидроксид-ионов в околоанодном пространстве [7,8]:



Молекулярный кислород (O_2) вступает в реакцию с ионами углерода C^{4+} с образованием углекислого газа:



Вокруг части ионов C^{4+} формируется гидратная оболочка. Так как вода является сильным растворителем, то в электрическом поле ионов C^{4+} молекулы воды образуют регулярные структуры в соответствии с зарядом иона, и эта гидратная оболочка экранирует ионы C^{4+} от ионов противоположного заряда. И образовавшиеся гидратированные ионы остаются в воде в виде осадка [9]:



Таким образом, частицы графита осаждаются в электролите в ходе электрохимической реакции за счёт расслоения графитового анода, выделившимися в электролите ионами молекулярного кислорода.

Результаты лазерной дифракции показали, что частицы имеют размеры в диапазоне от 0,001 до 0,05 мкм при электролизе во всех используемых электролитах и способах расположения электродов. Результат анализа снимков СЭМ структуры полученных частиц показал схожую микроструктуру и форму частиц графита и отсутствие повреждений (либо незначительные повреждения) тонкодисперсного графитового порошка. Полученные частицы имеют форму равномерного куба, либо форму куба с округлыми сторонами или со скруглёнными углами.

Предположив, что измеренные размеры частиц – это большая гипотенуза куба, используя известные формулы, рассчитали удельную площадь поверхности частиц графита. Наибольшее значение удельной площади 370 м²/кг имеют частицы графита, полученные электролизом водного раствора хлорида натрия с коаксиальным расположением электродов при этом КПД процесса равен 52%.

Библиографические ссылки

1. Burke A. Key Issues for the Implementation and Marketing of Ultracapacitors in Vehicle Applications. University of California-Davis, 14th ISDLС.

2. Кузнецов В. П. и др. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство // Компоненты и технологии, №6, 2005. С. 12–16.

3. Кузнецов В.П., Панькина О.С., Мачковская Н.Н., Шувалов Е.В., Востриков И.Б. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): новые разработки // Электрическое питание, 2005. №2. С. 29–33.

4. Яковлева Е. В. Электрохимическое диспергирование графита в 58% азотной кислоте для получения многослойного оксида графена / Е. В. Яковлева, А. В. Яковлев, А. С. Мостовой, В. Н. Целуйкин, И. Н. Фролов // Изв. вузов. Химия и хим. технология, 2021, Т. 64, Вып. 3. С. 59–65. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216403.6324>

5. Смолин А. А. Электрохимическое окисление дисперсного графита в серной кислоте / А. А. Смолин, А. В. Яковлев, С. Л. Забудьков, Е. В. Яковлева, А. И. Финаенов // Изв. вузов. Химия и хим. технология, 2009, Т. 52, вып. 10. С. 122–124.

6. Афанасов И. М. Особенности электрохимически окисленного графита и материалов на его основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 02.00.21 / Афанасов Иван Михайлович. Москва, 2009. 25 с.

7. Купряшов А. В. Способ получения тонкодисперсного графитового порошка электросинтезом на переменном токе // XXV Туполевские чтения: Международная молодёжная научная конференция, 10–11 ноября 2021 года: Материалы конференции. Сборник докладов. В 6-ти томах; Т. 1. Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021. С. 447–452.

8. Купряшов, А. В. Получение тонкодисперсного графитового порошка электросинтезом на постоянном токе и двух электродах, для использования в качестве наполнителя многофункциональных покрытий авиационной и ракетно-космической техники // Сборник аннотаций конкурсных работ XIII Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». М.: Издательство Перо, 2021. С. 204–206.

9. Купряшов А. В. Получение мелкодисперсного графитового порошка электросинтезом на переменном токе / А. В. Купряшов, И. Я. Шестаков // Научно-технические технологии в машиностроении, 2021, № 6 (120). С. 42–48.

10. Гаркушин И. К. Электролиты для высокотемпературных химических источников тока: формирование и исследование систем, составы и свойства / И. К. Гаркушин, Т. В.

Губанова, Е. И. Фролов [и др.] // Электрохимическая энергетика, 2015, Т. 15, № 4. С. 180–195.

11. Gellings, P. J. Ion and mixed conducting oxides as catalysts / P. J. Gellings, H. J. M. Bouwmeester // Catalysis Today, 1992, Vol. 12, Is. 1. P. 1-101. [https://doi.org/10.1016/0920-5861\(92\)80046-P](https://doi.org/10.1016/0920-5861(92)80046-P)

Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Тимофеев Е. Н., 2024

ПРОБЛЕМЫ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

О. В. Бразговка, Е. В. Сугак

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

Правовое регулирование вопросов, касающихся отдельных видов безопасности, в Российской Федерации осуществляется на основании федеральных законов, указов Президента, постановлений Правительства и других подзаконных актов. Многие из них касаются частных угроз и порождают изолированные друг от друга и разрозненные массивы правовых норм, касающихся отдельных видов безопасности. Некоторые из правовых актов частично дублируют друг друга или даже противоречат друг другу, а по некоторым важнейшим направлениям отсутствуют необходимые федеральные законы и они регулируются подзаконными актами. В статье проведен анализ состояния нормативно-правового обеспечения безопасности, выявлены ее основные недостатки и предложены варианты их устранения.

Ключевые слова: безопасность, техническое регулирование, обязательные требования, контроль, надзор, регуляторная гильотина..

Безопасность в любой сфере жизнедеятельности является объектом правового регулирования и правовой защиты. Безопасность в России регламентируется множеством законов, кодексов, постановлений и иных нормативных правовых актов.

В последние годы в России было многое сделано в области обеспечения безопасности в государственном управлении и регулировании, нормативно-техническом регулировании, методическом и научно-техническом обеспечении [1-4]. Создана нормативно-правовая база по организационному, научному и методическому обеспечению комплексной безопасности в соответствии с национальными целями и прогнозами развития Российской Федерации, приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники, мерами по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры, перечнями национальных приоритетов, приоритетных научных направлений и критических технологий России [1-4].

Правовое регулирование вопросов, касающихся отдельных видов безопасности, в Российской Федерации осуществляется на основании более 70 федеральных законов, 200 указов Президента и около 500 постановлений Правительства, а также большого количества других подзаконных актов [4]. Однако большинство из них имеют частично-фрагментарный характер, касаются частных угроз и порождают локальные (изолированные друг от друга) и разрозненные массивы правовых норм, касающиеся отдельных видов безопасности и относящиеся к различным отраслям права [5]. Некоторые из правовых актов частично дублируют друг друга, в некоторых случаях – противоречат друг другу. В то же время по некоторым важнейшим направлениям отсутствуют необходимые федеральные законы и они регулируются подзаконными нормативно-правовыми актами [3-6].

Кроме того, переход в обеспечении безопасности к концепции «приемлемого риска» требует развития новых научных направлений и решения новых задач обеспечения безопасности на основе фундаментальных, поисковых и прикладных исследований в междисциплинарной постановке с использованием количественных критериев риска возникновения и развития новых опасностей, угроз, вызовов, кризисов и катастроф [4]. Причем наряду с организационными и научно-техническими проблемами необходимо одновременно решать проблему слабой правовой урегулированности отношений в этой сфере [6-8]. Отсутствие четких юридических предписаний как в понятийном аппарате, так и в регламентации порядка принятия правоохранительных мер, процессуальных решений и ведомственных актов, касающихся безопасности, способствует криминализации внутригосударственных и международных отношений [6].

Таким образом, анализ законодательных основ обеспечения безопасности показывает, что сегодня возрастает актуальность разработки и принятия новых нормативно-правовых актов высшей юридической силы.

Правовые основы безопасности в Российской Федерации заложены в Конституции Российской Федерации, Федеральном законе «О безопасности» и «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации», а также в ряде других нормативно-правовых и нормативно-технических документах [9-11].

Впервые на законодательном уровне понятие «безопасность» было установлено в 1992 году Законом РФ «О безопасности» как «состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества, государства от внутренних и внешних угроз» [12]. Под жизненно важными интересами в законе понималась «совокупность потребностей, удовлетворение которых надежно обеспечивает существование и возможности прогрессивного развития личности, общества и государства», а к основным объектам безопасности были отнесены личность (ее права и свободы), общество (его материальные и духовные ценности) и государство (его конституционный строй, суверенитет и территориальная целостность).

Однако в 2010 году закон утратил свою силу в связи с принятием нового Федерального закона «О безопасности», в котором понятие безопасности не установлено, а безопасность определена через предмет регулирования, основные принципы и содержание деятельности по обеспечению безопасности государства, личности, общественной, экологической и иных видов безопасности [9]. Таким образом, законодатель, по сути, предложил решать вопрос о понятии «безопасность» с помощью отраслевых правовых актов. Фактически новый закон представляет собой не закон о безопасности, а закон об органах, обеспечивающих безопасность, и определяет основные принципы и содержание деятельности по обеспечению безопасности [13].

Только в 2021 году в «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» понятие национальной безопасности вновь определено как «состояние защищенности национальных интересов Российской Федерации от внешних и внутренних угроз, при котором обеспечиваются реализация конституционных прав и свобод граждан, достойные качество и уровень их жизни, гражданский мир и согласие в стране, охрана суверенитета Российской Федерации, ее независимости и государственной целостности, социально-экономическое развитие страны» [10]. При этом под национальными интересами понимается «объективно значимые потребности личности, общества и государства в безопасности и устойчивом развитии».

Правовая неопределенность в сфере обеспечения безопасности, а также некоторые другие политические и экономические мотивы привели к необходимости проведения первой реформы системы технического регулирования [8].

Начало реформе положил Федеральный закон «О техническом регулировании», установивший новую для России категорию документов – технические регламенты [14].

Закон был подготовлен Росстандартом РФ совместно с Министерством экономического развития и торговли РФ. Основные положения Закона базируются на положениях «Соглашения о технических барьерах в торговле» Всемирной торговой организации (ВТО) 1995 года и Директиве Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 98/34/ЕС от 22 июня 1998 года «О процедуре предоставления информации в области технических стандартов и регламентов, а также правил оказания услуг в информационном обществе» и в полной мере отвечал мировым тенденциям, направленным на либерализацию торговых отношений.

Закон должен был изменить всю систему технического регулирования – снизить административное и экономическое давление на производителей, устранить технические барьеры в торговле, повысить эффективность защиты рынка от опасной продукции [8]. Закон устанавливал базовые правила в сфере нормативного регулирования и применения технических регламентов с учетом степени риска причинения вреда, устанавливающие минимально необходимые требования, обеспечивающие безопасность.

По оценкам идеологов реформы предполагалась разработка в течение семи лет к 2010 году более 560 технических регламентов, содержащих требования к десяткам тысяч объектов технического регулирования [8]. Однако первые технические регламенты были приняты лишь в 2008 году, а к 2010 году было принято только 7 технических регламентов в форме федерального закона и 9 – в форме постановлений Правительства Российской Федерации [16].

С 2011 года технические регламенты принимались в рамках Таможенного союза (ТР ТС), начиная с 2014 года принимаются Технические регламенты Евразийского экономического союза (ТР ЕАЭС).

В 2011 году был утвержден «Единый перечень продукции, в отношении которой устанавливаются обязательные требования в рамках Таможенного союза», содержащий в последней редакции 67 позиции, в 2019 году - «Перечень технических регламентов Евразийского экономического союза (технических регламентов Таможенного союза)», включающий 47 регламентов, в 2021 году - «План разработки технических регламентов Евразийского экономического союза и внесения в них изменений».

О недостатках и даже опасности закона «О техническом регулировании», который отменил обязательность требований стандартов, специалисты предупреждали, начиная с момента его принятия [8, 15-21]. Отмечались противоречия внутри самого закона, отсутствие четкой методической базы разработки технических регламентов, значительные расхождения с международными и европейскими подходами к установлению обязательных требований, а также игнорирование самого важного инструмента технического регулирования – стандартизации. Более того, разные законодательные акты, принятые в процессе реформы, наполняют термин «техническое регулирование» различным содержанием и видами деятельности в различных областях [21].

Кроме того, практически сразу или вскоре после принятия очередного технического регламента утверждался перечень стандартов, содержащих правила и методы исследований, необходимые для применения и исполнения регламента, а также перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента [8].

Так, например, в 2011 году был принят технический регламент Таможенного союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования». Одновременно утверждены «Перечень стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования», содержащий 1300 документов, и «Перечень международных и региональных (межгосударственных) стандартов, а в случае их отсутствия - национальных (государственных) стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для

применения и исполнения требований технического регламента таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» (ТР ТС 010/2011) и осуществления оценки соответствия объектов технического регулирования», содержащий 1149 документов.

Таким образом, в результате реформы снижение административной нагрузки на производителя не произошло, а к существующим нормативным документам добавились новые – технические регламенты, обязательные к исполнению, с целым шлейфом стандартов, «в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента».

Более того, количество принимаемых органами исполнительной власти нормативно-правовых актов к 2015 году возросло в 5 раз по сравнению с 2002 годом и достигло 24 000 в год, то есть ежедневно принималось около 65 регулирующих документов [22]. В результате был сформирован огромный массив нормативных и нормативных правовых актов и документов - всего более 160 тысяч по состоянию на 2016 год [3].

С принятием Федерального Закона «О техническом регулировании» государственные стандарты были заменены на технические регламенты, изменив при этом их традиционное назначение. В итоге реформа системы технического регулирования и «гармонизация» национальных стандартов с европейскими нормами привела к полной деградации системы стандартизации в целом [8, 16, 20, 23].

Несмотря на многочисленные изменения закона (более 30 за 20 лет) и то, что Правительство РФ неоднократно рассматривало состояние дел по реализации закона «О техническом регулировании» остается серьезным тормозом развития промышленности, торговли и реализации национальных проектов. Многие специалисты высказывают мнение о том, что необходимость в этом законе в настоящее время отпала, так как решение основных вопросов технического регулирования в сфере разработки технических регламентов, аккредитации, подтверждения соответствия в настоящее время осуществляется в рамках Договора о ЕАЭС [16].

После провала реформы технического регулирования второй попыткой или новым витком реформы стала реформа контрольно-надзорной деятельности «регуляторная гильотина», запущенная в 2016 году.

Основной целью «регуляторной гильотины» является сокращение административной нагрузки на бизнес, повышение уровня безопасности и устранение избыточной административной нагрузки на субъекты предпринимательской деятельности. Она проводится с помощью отмены неактуальных нормативных актов в сфере надзора и контроля, а также построения новой эффективной системы государственного контроля (надзора), направленной на снижение социально значимых рисков.

Задача «гильотины» – создание в сферах регулирования новой системы понятных и четких требований к хозяйствующим субъектам, снятие избыточной административной нагрузки на субъекты предпринимательской деятельности, снижение рисков причинения вреда (ущерба) охраняемым ценностям [24].

Реформа контрольно-надзорной деятельности с применением риск-ориентированного подхода при осуществлении проверок в отношении хозяйствующих субъектов нацелена на повышение уровня безопасности и устранение избыточной административной нагрузки на субъекты предпринимательской деятельности через отмену всех существующих нормативных актов в сфере надзора и контроля и построение новой, современной, эффективной системы государственного контроля (надзора), направленной на снижение социально значимых рисков [24].

Целями реформы являются [25]:

– снижение уровня ущерба охраняемым законом ценностям (снижение количества смертельных случаев по контролируемым видам рисков, снижение числа заболеваний и отравлений, пострадавших и травмированных по контролируемым видам рисков) – на 15% от уровня 2015 года к концу 2018 года и на 50% к концу 2025 года;

– снижение уровня материального ущерба по контролируемым видам рисков – на 10% от уровня 2015 года к концу 2018 года и на 30% к концу 2025 года;

– снижение при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля административной нагрузки на организации и граждан, осуществляющих предпринимательскую и иные виды деятельности, – не менее чем на 20% по сравнению с 2016 годом к концу 2018 года и на 50% к концу 2025 года;

– рост индекса качества администрирования контрольно-надзорных функций, включая оптимизацию использования трудовых, материальных и финансовых ресурсов, используемых при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля, – в 2 раза к концу 2025 года [26].

Первыми Федеральными законами, принятыми в рамках реформы, стали Федеральные законы «Об обязательных требованиях» и «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации», принятые в июле 2020 года [26, 27].

В контексте реформы к концу 2020 года были упразднены более 12 тысяч правовых актов (более 90% всех актов, содержащих обязательные требования).

С 1 июля 2021 года установлены новые правила контроля и надзора, в 2021-23 гг. внесены изменения в отдельные законодательные акты, в том числе более 130 федеральных законов. Утверждены также «Перечень видов государственного контроля (надзора)», включающий 132 вида контроля (надзора), и «Перечень федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих функции по нормативно-правовому регулированию в сферах осуществления государственного контроля (надзора)», включающий 21 орган, осуществляющий функции по нормативно-правовому регулированию, и 33 органа, осуществляющих контрольно-надзорные функции.

Реформирование законодательства затронуло всю существующую систему контрольно-надзорной деятельности. Приоритет при проведении контрольно-надзорной деятельности направлен в сторону превентивных мер предупреждения нарушений и предоставление гарантий субъектам экономики при взаимодействии с органами исполнительной власти.

Для каждого отдельного вида государственного контроля (надзора) применяются категории риска либо классы опасности. Критерии отнесения деятельности к определенной категории риска либо определенному классу (категории) опасности определяются Правительством Российской Федерации, если такие критерии не установлены федеральным законом.

Перечень категорий риска или классов опасности, а также перечень индикаторов риска нарушения обязательных требований по видам контроля утверждается соответствующими нормативными правовыми актами. В течение 2021-23 гг. были утверждены перечни индикаторов риска нарушения обязательных требований по отдельным видам контроля (надзора).

В 2022 году закон о контроле вступил в полную силу для всех уровней власти, и ожидалось, что годовая практика его применения позволит в полной мере оценить новые инструменты системы контроля. Однако из-за санкционного давления на бизнес в марте 2022 года принято решение о пакете мер по поддержке бизнеса, в том числе дополнительном снижении административной нагрузки, создаваемой контрольной деятельностью, – моратории на все плановые неналоговые проверки бизнеса до конца 2022 года. Впервые мораторий коснулся всего бизнеса, а не только субъектов малого и среднего предпринимательства.

Была предусмотрена возможность проведения плановых проверок только в отношении объектов контроля, отнесенных к категориям чрезвычайно высокого и высокого риска причинения вреда, а также опасных производственных объектов II класса опасно-

сти и гидротехнических сооружений II класса. Контролирующие органы по своему усмотрению могут заменить проверку на профилактический визит.

Внеплановые проверки не отменили – ведомства могли их проводить в определенных случаях, например, после жалобы клиента, при угрозе жизни и здоровью граждан, безопасности страны по согласованию с прокуратурой либо по поручению Президента или правительства.

В октябре 2022 года правительство ввело новые ограничения плановых неналоговых проверок на 2023 год, в конце 2023 года – на 2024 год.

Реформа контрольно-надзорной деятельности продолжается и ее окончательные итоги еще не подведены. Но текущие результаты показывают, что существенного снижения административного давления на бизнес достичь пока не удалось. Например, по данным Ростехнадзора и сайта «КонсультантПлюс» перечень правил и инструкций по охране труда в различных отраслях содержит около 400 документов, норм и правил пожарной безопасности – более 350, перечень федеральных норм и правил в области промышленной безопасности и атомной энергии – около 450 позиций, в том числе нормативных правовых актов и административных регламентов Ростехнадзора – более 280. Сокращения числа контрольно-надзорных органов также не произошло, хотя количество плановых проверок хозяйствующих субъектов существенно сократилось - в результате введения указанных мер в 2022 году было отменено порядка 240 тысяч проверок [28].

Следует также отметить, что «регуляторная гильотина» не коснулась технических регламентов и нормативов на их основе, как и самого Федерального закона «О техническом регулировании». Соответственно, в арсенале Ростехнадзора, например, стали появляться нормативы, ориентированные на оба Федеральных закона – «О техническом регулировании» и «Об обязательных требованиях в Российской Федерации».

Таким образом, анализ существующего массива нормативно-правовых документов в области безопасности, а также текущих итогов реформ технического регулирования и контрольно-надзорной деятельности показывает следующее.

1. В настоящее время национальная безопасность Российской Федерации обеспечивается Федеральным законом "О безопасности", федеральными конституционными законами о чрезвычайных правовых режимах («О чрезвычайном положении», «О военном положении»), "Стратегией национальной безопасности Российской Федерации" и большим количеством других подзаконных актов. Некоторые из них дублируют друг друга или даже противоречат друг другу, хотя по некоторым важнейшим направлениям безопасности отсутствуют необходимые федеральные законы и они регулируются подзаконными нормативно-правовыми актами - указами Президента и постановлениями Правительства.

Для создания единой системы нормативного обеспечения безопасности созрела необходимость в федеральном конституционном законе «О национальной безопасности», в котором должны быть нормативно определены как само понятие «безопасность», так и все виды и направления обеспечения безопасности, сформулированы их цели и задачи. В перспективе все эти и другие законодательные акты могли бы быть объединены в кодекс законов о национальной безопасности.

2. Необходимо отменить Федеральный закон «О техническом регулировании», который в настоящее время стал серьезным тормозом развития промышленности, торговли и реализации национальных проектов, и практически все основные политические и экономические мотивы, по которым этот закон принимался, потеряли актуальность.

Решение основных вопросов технического регулирования в сфере разработки технических регламентов, аккредитации, подтверждения соответствия в настоящее время в значительной мере осуществляется в рамках Договора о ЕАЭС.

3. Необходимо вернуть национальным и межгосударственным стандартам статус обязательных для исполнения. При этом многие действующие в настоящее время стан-

дарты, «гармонизированные» с соответствующими европейскими нормативами в рамках «вестернизации» необходимо пересмотреть или отменить и заменить новыми.

4. Для обеспечения единого подхода к контрольно-надзорной деятельности и формированию ее нормативной базы необходимо объединить функции всех контрольно-надзорных органов в едином централизованном федеральном контрольно-надзорном органе (агентстве), независимом от отраслевых министерств и госкорпораций.

5. Провал реформ системы технического регулирования и контрольно-надзорной деятельности во многом объясняется тем, что их основными идеологами, организаторами и разработчиками были Министерство экономического развития и Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ). Разработкой проектов нормативов во всех сферах безопасности, технического регулирования и контрольно-надзорной деятельности должен заниматься единый централизованный федеральный контрольно-надзорный орган (агентство) с привлечением специалистов (экспертов) в соответствующей области.

6. Среди принятых индикаторов риска по отдельным видам контроля (надзора) отсутствуют показатели, действительно характеризующие вероятность реализации негативных сценариев, ущерб или последствия для окружающей среды, жизни и здоровья людей. То есть индикаторы риска, принятые для реализации риск-ориентированного подхода, не соответствуют нормативно установленным или общепринятым определениям риска и не ориентированы на обеспечение приемлемого (допустимого) риска [29-35].

Для успешной реализации реформы контрольно-надзорной деятельности с применением риск-ориентированного подхода необходимо разработать систему понятных и практически значимых индикаторов, непосредственно связанных с нормативно установленным или общепринятым понятием риска и его составляющих – техногенного, технического, экологического, социального и других видов риска. Для их оценки можно использовать как стандартные и рекомендуемые методы [36-43 и др.], так и научно обоснованные современные методы и технологии оценки и прогнозирования рисков, в том числе – с использованием информационных технологий и систем искусственного интеллекта [44-49].

Библиографические ссылки

1. Подберёзкин А.И. Современная стратегия национальной безопасности России. - М.: Международные отношения, 2023. – 1594 с.

2. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность. – М.: Знание, 2018. – 1016 с.

3. Федорец А.Г. Менеджмент техносферной безопасности. – М.: Институт безопасности труда, 2016. - 596 с.

4. Сугак Е.В. Современные проблемы техносферной безопасности в России. - Инновационное развитие науки: фундаментальные и прикладные проблемы. – Петрозаводск: Новая наука, 2022, с. 5-85.

5. Актуальные проблемы национальной безопасности России на современном этапе. – Аналитический вестник Совета Федерации ФС РФ, 2000, № 5(117). – 74 с.

6. Зеленков М.Ю. Правовые основы общей теории безопасности Российского государства в XXI веке. - М.: Юридический институт МИИТа, 2002. - 209 с.

7. Фролов К.В., Махутов Н.А. Фундаментальные и прикладные исследования рисков и безопасности на федеральном и региональном уровнях. - Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2007, № 4(16), с. 104-111.

8. Сугак Е.В. Нормативное обеспечение техносферной безопасности. - Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: Материалы и доклады. VIII Всероссийская конференция. – Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023, с. 71-76.
9. О безопасности. Федеральный закон № 390-ФЗ от 28.12.2010 (ред. от 10.07.2023).
10. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Утв. Указом Президента РФ № 400 от 02.07.2021.
11. О промышленной безопасности опасных производственных объектов. Федеральный закон № 116-ФЗ от 21.07.1997 (ред. от 29.12.2022).
12. О безопасности. Закон РФ № 2446-1 от 5.03.1992 (ред. от 25.07.2002).
13. Мансуров Г.З. Новый закон о безопасности и старые проблемы законодательства о безопасности. - Управленец, 2011, № 1-2(17-18), с.48-51.
14. О техническом регулировании. Федеральный закон № 184-ФЗ от 27.12.2002 (ред. от 29.12.2022).
15. Кукса Т.Л. Направления дальнейшего развития технического регулирования и государственного контроля исполнения обязательных требований по безопасности продукции и процессов. - Вопросы государственного и муниципального управления, 2010, № 2, с.40-55.
16. Пугачев С. Федеральный закон «О техническом регулировании»: двадцать лет спустя. - Стандарты и качество, 2022, № 12, с. 20-26.
17. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Системные аварии и катастрофы в техносфере России. - М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. – 308 с.
18. Горячев А.В. Достоинства и недостатки Федерального закона «О техническом регулировании». - Стандарты и качество, 2003, № 7, с. 32-35.
19. Аронов И.З., Рыбакова А.М., Теркель А.Л. Куда ведет реформа технического регулирования? - Стандарты и качество, 2006, № 10, с. 32-35.
20. Гельман М. Продолжение спектакля абсурда «Реформа технического регулирования». - Промышленный вестник, 2013, № 3-4, с. 1-3.
21. Гордон Б.Г. О техническом регулировании при использовании атомной энергии. - Вестник Госатомнадзора России, 2003, № 3, с. 3-8.
22. Федорев А.Г. О нормативных правовых актах в Российской Федерации. - М.: Институт безопасности труда, 2015. - 100 с.
23. Нетес В.А. и др. Деградация вместо гармонизации. - Стандарты и качество, 2011, № 5, с. 40-44.
24. Сугак Е.В. «Регуляторная гильотина» техносферной безопасности. - Решетневские чтения: Материалы XXVII Международной научно-практической конференции. В 2-х ч. – Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023, ч. 1, с. 759-761.
25. Паспорт приоритетной программы «Реформа контрольной и надзорной деятельности». Утв. президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и приоритетным проектам (протокол № 12) 21.12.2016 (ред. от 30.05.2017).
26. Об обязательных требованиях в Российской Федерации. Федеральный закон № 247-ФЗ от 31.07.2020 (ред. от 24.09.2022).
27. О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации. Федеральный закон № 248-ФЗ от 31.07.2020 (ред. от 25.12.2023).
28. Сводный доклад о государственном контроле (надзоре), муниципальном контроле в Российской Федерации за 2022 год. - Министерство экономического развития Российской Федерации, 2023. - 150 с.
29. Алымов В.Т., Крапчатов В.П., Тарасова Н.П. Анализ техногенного риска. - М.: Круглый год, 2000. – 160 с.
30. Воробьев Ю.Л. Основы формирования и реализации государственной политики в области снижения рисков чрезвычайных ситуаций. - М.: Деловой экспресс, 2002. - 247 с.

31. Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. - М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
32. Сугак Е.В. Системный анализ и моделирование техногенных рисков. - Вычислительные технологии, 2004, т. 9, № 4, с. 68-76.
33. Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н. Общая теория рисков. - М.: Академия, 2008. - 368 с.
34. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. - Новосибирск: Наука, 2017. – 724 с.
35. Павлова С.А., Павлов И.Е., Поляхов А.С. и др. Экология: глобальные вызовы, актуальные проблемы и пути их решения в свете инновационных исследований. - М.: НИЦ МИСИ, 2018. – 64 с.
36. ГОСТ Р 12.0.010-2009. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Система управления охраной труда. Определение опасностей и оценка рисков.
37. ГОСТ Р 54124-2010. Безопасность машин и оборудования. Оценка риска.
38. ГОСТ Р 51901.23-2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Руководство по оценке риска опасных событий для включения в реестр риска.
39. ГОСТ 12.0.230.5-2018. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы управления охраной труда. Методы оценки риска для обеспечения безопасности выполнения работ.
40. ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска.
41. ГОСТ Р МЭК 31010-2021. Надежность в технике. Методы оценки риска.
42. ГОСТ Р 70675-2023. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Руководство по оценке риска для здоровья работников.
43. Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах. Руководство по безопасности. Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 387 от 03.11.2022.
44. Сугак Е.В., Окладникова Е.Н., Кузнецов Е.В. Вычислительные и информационные технологии анализа и оценки социально-экологических рисков. - Экология и промышленность России, 2008, № 8, с.24-29.
45. Сугак Е.В. Окладникова Е.Н., Ермолаева Л.В. Информационные технологии управления социально-экологическим риском. - Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета, 2008, вып. 4(21), с. 87-91.
46. Сугак Е.В., Кузнецов Е.В., Назаров А.Г. Информационные технологии оценки экологической безопасности.- Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2009, т.18, № 12, с.39-45.
47. Потылицына Е.Н., Липинский Л.В., Сугак Е.В. Использование искусственных нейронных сетей для решения прикладных экологических задач.- Современные проблемы науки и образования.- 2013, № 4, с.1-8.
48. Сугак Е.В. Современные методы оценки экологических рисков. - Европейский журнал социальных наук, 2014, № 5(44), т. 2, с. 427-433.
49. Бельская Е.Н., Бразговка О.В., Сугак Е.В. Методика расчета экологических рисков. - Современные проблемы науки и образования, 2014, № 6, с. 84-91.

© Бразговка О. В., Сугак Е. В., 2024

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ARM-МАНИПУЛЯТОРОВ ИЗ РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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 работе рассматриваются ARM-манипуляторы, перечислены сферы деятельности, в которых они могут применяться. Представлена модель ARM-манипулятора. Приведено сравнение основных качеств разных материалов (металла и пластика), которые могут значительно повлиять на работоспособность выбранного манипулятора. Описаны достоинства и недостатки используемых материалов.

Ключевые слова: ARM-манипулятор, сравнение материалов, металл, пластик, редукторы, Articulated Robot Manipulator.

На данный момент активное развитие технологий и автоматизации приводит к значительному вниманию к области ARM (Articulated Robot Manipulator) манипуляторов. ARM манипулятор представляет собой робота с многозвенной конструкцией, состоящими из соединенных между собой суставов или звеньев, которые приводятся в действие с помощью сервоприводов или шаговых двигателей с редукторами [1]. Каждое звено манипулятора может двигаться в определенных направлениях, что обеспечивает гибкость и точность в выполнении задач. Данные манипуляторы используются для выполнения различных задач, таких как перемещение, подъем и вращение различных объектов. ARM манипуляторы могут быть запрограммированы для автоматического выполнения определенных операций или управляться оператором. Такие роботы играют важную роль в автоматизации процессов, улучшении производительности и выполнении задач, требующих высокой точности и повторяемости.

В современном мире можно выделить несколько перспектив развития данной технологии:

1) Промышленная автоматизация. В промышленности ARM манипуляторы используются для выполнения разнообразных задач, таких как сборка, пакетирование, и обработка материалов [2]. Перспективы включают улучшение скорости и гибкости в промышленных приложениях;

2) Медицинская сфера. В медицине ARM манипуляторы могут использоваться для проведения хирургических операций, диагностики и реабилитации. Перспективы включают разработку более точных систем для повышения эффективности медицинских процедур;

3) Сервисные роботы. В бытовой сфере и обслуживании предприятий могут использоваться ARM манипуляторы для уборки, доставки товаров, обслуживания клиентов. Перспективы включают создание умных и адаптивных роботов для повседневных задач;

4) Образование и исследования. ARM манипуляторы могут стать важным инструментом в образовательных учреждениях и лабораториях для обучения и проведения научных исследований. Перспективы включают улучшение обучающих программ и доступность технологии.

Для примера ARM-манипулятора рассмотрим Open Source проект автора Chris Annin [3], который представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Модель ARM-манипулятора

Детали корпуса данной модели могут быть выполнены из разных материалов, например, пластика и металла. Так как на качество работы манипулятора могут влиять свойства материала, при проектировании АРМ-манипуляторов необходимо иметь четкое представление возможностей его составляющих.

Проведем сравнительный анализ выбранных материалов по основным качествам, которые могут значительно повлиять на работоспособность АРМ-манипулятора:

1) Прочность и долговечность. Металлические манипуляторы обладают высокой прочностью и долговечностью, что делает их способными выдерживать значительные нагрузки и длительные периоды эксплуатации. В то время как детали из пластмассы деформируются из-за повышенного трения при длительном использовании;

2) Устойчивость к температурным воздействиям. Металлы обычно обладают хорошей теплопроводностью и устойчивостью к широкому диапазону температур, что позволяет использовать металлические манипуляторы в различных условиях. Пластик же имеет температуру плавления 210-245 градусов Цельсия, что является ограничением для его использования;

3) Точность. Металлы намного жестче пластика, поэтому обеспечивают высокую точность в движениях манипулятора. В каждом манипуляторе имеется несколько редукторов, которые приводятся в действия шестернями. Если печатать детали редуктора PLA пластиком на 3D-принтере, то необходимо учитывать усадку материала при печати, она может быть неравномерной, так как материал очень чувствителен к резким перепадам температуры во время печати, а значит уровень брака будет высоким;

4) Обработка. Металлы легко обрабатываются и формуются, что обеспечивает гибкость в конструировании манипуляторов с учетом различных требований и спецификаций. При обработке пластика нужно учитывать, что изделие может нагреваться и деформироваться из-за невысокой температуры размягчения. Поэтому обработку пластиковых деталей автоматическим инструментом следует исключить. Обработка пластиковых деталей вручную занимает достаточно много времени, так как сложно придать деталям гладкость и ровность, так же к недостаткам изделий из пластика можно отнести сложность в повторяемости одних и тех же деталей;

5) Устойчивость к коррозии. Под действием неблагоприятных факторов окружающей среды структура металла постепенно разрушается вглубь. Как правило, коррозион-

ные процессы запускаются при контакте металла с жидкими и газообразными веществами. Чаще всего это влага: конденсат и атмосферные осадки. Последующее разрушение происходит из-за окисления металла. Результатом коррозионного воздействия становится утрата конструкцией своих свойств, выход изделия из строя. Пластик обладает устойчивостью к коррозии, что особенно важно для работы в агрессивных средах;

6) Легкость и энергопотребление. Манипуляторы, изготовленные из пластика будут иметь меньший вес по сравнению с металлическим, что делает их более маневренными и подходящими для задач, где требуется мобильность. К тому же, чем меньше вес конструкции, тем меньшего количества энергии требуется для работы манипулятора;

7) Экономическая эффективность. Производство пластиковых компонентов обычно дешевле, так как у пластика низкая себестоимость, чем деталей из металла, поэтому манипуляторы из пластика могут быть более экономически выгодными. Вышедшие из строя пластиковые детали могут быть легко заменены новыми, что упрощает монтаж и обслуживание манипуляторов;

8) Изоляция и электромагнитная совместимость. Пластик не проводит электричество, что обеспечивает хорошую изоляцию и защиту от электрических сбоев. Также пластик имеет низкую электропроводность. Для обеспечения электромагнитной совместимости металлов необходимо заземление, которое позволяет отводить электростатический заряд или электромагнитные помехи от системы в землю, что снижает вероятность возникновения электрического контакта или помех;

9) Биосовместимость. Достоинствами пластика является то, что он изготавливается из экологических материалов, в основном из кукурузы, свеклы и сахарного тростника, т.е. из биоразлагаемого материала. Поэтому при печати нет резкого химического запаха. Некоторые металлы являются токсичными для организма, они могут вызывать различные заболевания и отравления при длительном воздействии. Но биосовместимость металлов может быть изменена путем обработки поверхности металла или смешивания с другими материалами.

Выбор между манипуляторами из металла и пластика зависит от конкретных требований задачи, условий эксплуатации и бюджета. В некоторых случаях комбинированные конструкции, которые используют как металлические, так и пластиковые компоненты, могут быть оптимальным решением.

Планируется провести испытания для проверки рассмотренных характеристик. Результаты испытаний будут изложены в следующих работах.

Библиографические ссылки

1. Крашенинникова О. В., Шамлицкий А. Я. Сравнительный анализ редукторов для ARM-манипулятора // В сборнике: ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА. Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2023. С. 13-16.

2. Крашенинникова О. В. Применение ARM манипуляторов в аэрокосмической промышленности // В сборнике: Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах. Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Красноярск, 2023. С. 515-517.

3. AR4 MK2 6 DOF ROBOT ARM - DIY 6 axis robot kit / Arduino controller with Python program interface [Электронный ресурс]. URL: https://studref.com/359253/tehnika/zamknuty_e_shemy_upravleniya_elektroprivoda (дата обращения: 17.01.2024).

© Крашенинникова О. В., 2024

Секция
«КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
МАШИНОСТРОЕНИЯ»

УДК 621.923.01

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ
СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПОТОКА РАБОЧЕЙ
СРЕДЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ КРИВОЛИНЕЙНЫХ
КАНАЛОВ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК**

П. А. Иванов
Научный руководитель - В. А. Левко

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

Рассмотрены результаты моделирования обработки абразивным потоком криволинейных трубчатых заготовок. Полученные численные значения скорости и давления потока позволяют реализовать все виды контактных взаимодействий, а значит и провести финишную обработку внутренней поверхности. Сравнительный анализ распределения полей статического и динамического давления потока рабочей среды, полученных в ходе моделирования, показал, что для расчетов режимов процесса АФМ необходимо применять величины динамического давления.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, криволинейный канал, статическое давление, динамическое давление

Введение. Наибольшие перспективы для обработки внутренних поверхностей изогнутых прямоугольных заготовок имеет технология обработки абразивным потоком (*abrasive flow machining (AFM)*), при которой поток рабочей среды полностью копирует форму поперечного сечения канала по всей его длине и оказывает сжимающее давление на обрабатываемую поверхность. Рабочая среда состоит из вязкоупругого материала, наполненного абразивными (алмазными) частицами. При течении такой среды обеспечивается оптимальное сочетание скорости и давления потока среды на внутренний микрорельеф канала [1-2].

Разработка технологического процесса обработки абразивным потоком криволинейных каналов трубных заготовок должна производиться с учетом ключевых особенностей, установленных, как в ходе моделирования процесса, так и экспериментальных исследований.

Так для расчета сил, возникающих при контактных взаимодействиях, необходимо знать численные значения нормальных напряжений σ и касательных напряжений τ , возникающих в потоке рабочей среды. Эти значения в случае обработки абразивным потоком высоковязкой рабочей средой могут достигать показателей до 0,2...0,3 МПа. Составляющие силы резания P_z и P_y , создаваемые при таких напряжения абразивным зерном величиной 250 мкм, будут варьироваться в интервале от 1,3 Н до 1,5 Н [3].

Для выбора типа рабочей среды при *AFM* криволинейных каналов необходимо предварительно установить картину распределения скорости и давления потока в обрабатываемом канале. Для этого проведено моделирование процесса обработки средами низкой, средней и высокой вязкости. Установлено несоответствие результатов моделирования и экспериментальных исследований по распределению давления потока по длине канала при течении сред средней и высокой вязкости, но для среды с низкой вязкостью расхождение между экспериментальными данными и результатами моделирования составляет менее 5% [4].

Причины несоответствия результатов моделирования и экспериментальных исследований по распределению давления потока по длине канала. Это несоответствие вызвано несколькими причинами.

Во-первых, конструкция прямоугольных труб характеризуется большим отношением площади всей внутренней поверхности канала заготовки к площади ее поперечного сечения. Для подобных заготовок применение рабочих сред высокой вязкости при *AFM* затруднено. Использование в качестве наполнителя мазеобразной пасты, содержащей алмазные зерна, позволяет уменьшить вязкость среды до средней вязкости, а дисперсность алмазных зерен – обработку углов прямоугольного сечения [5].

Во-вторых, при моделировании течения на расход среды не накладывалось никаких ограничений. Задавались только значения входного и выходного давления, а также реологическая модель и характеристики применяемой среды. Однако опытным путем установлено, что при такой постобработке участвует именно ограниченный, конечный объем среды (не бесконечный, как это возможно, например, при гидроабразивной обработке). Причем в процессе *AFM* поток рабочей среды испытывает необратимое сдвиговое течение.

В-третьих, результаты ряда исследований основаны на моделировании течения среды высокой вязкости в деталях с круглым сечением. Отмечено, что для предотвращения заклинивания такой среды при *AFM* малых прямоугольных сечений и обеспечения равномерности обработки в углах поперечного сечения волноводов, в том числе на изогнутых участках, рекомендуется применять среду средней вязкости и учитывать ее свойства при моделировании [6].

Также из картины распределения давления рабочей среды низкой вязкости следует, что в некруглых каналах большой длины характерно появление неравномерности обработки по длине канала вследствие перепада давления на входе и выходе обрабатываемого канала. Моделирование течения рабочей среды средней вязкости проводится за счет применения степенных неньютоновских сред. Исследуемый состав рабочей среды должен одновременно обеспечить как максимальные вязкоупругие свойства потока, так и такую его текучесть, которая бы позволила создать сдвиговое течение потока (без заклинивания) при *AFM* заготовок с прямоугольным сечением изогнутой формы.

Для разработки основ обработки абразивным потоком изогнутых заготовок проведено моделирование процесса течения рабочей среды в изогнутом прямоугольном канале.

Сравнительный анализ распределения полей статического и динамического давления потока рабочей среды. В качестве объекта исследования был выбран тип рабочей среды средней вязкости. За основу рабочей среды взят высокомолекулярный синтетический каучук СКТ с наполнителем в виде мазеобразной пасты АСМ. Предложено использовать примененную ранее среду для абразивно-экструзионной обработки малых отверстий. Состав среды (весовой): каучук кремнийорганический СКТ - 40 %; мазеобразная алмазная паста АСН 60/40 ВОМ – 60 %, дисперсность наполнителя $V_a = 40 \dots 60$ мкм; объем рабочей смеси $1,72 \cdot 10^{-6}$ м³ [7].

Реологические свойства рабочей среды: плотность 2300, кг/м³; модуль Юнга 130...200, кг/м²; коэффициент Пуассона 0,411; динамическая вязкость 36000, Па·с; предел текучести 14,9, МПа; температура 22, °С; дисперсность наполнителя 40...60, мкм [8].

Проведен расчет распределения, скорости течения потока по длине исследуемого канала в начальный момент времени (начало цикла, рис. 1) и конечный момент времени (конец цикла, рис. 2). Наблюдается течение вязкоупругого потока, протекающего по всему каналу с незначительным увеличением скорости течения ядра потока в местах изгиба. На стенке заготовки скорость потока нулевая. Однако в пристеночной области наблюдается максимальный градиент скорости потока, обеспечивающий перемещение абразивных зерен в обрабатываемом канале.

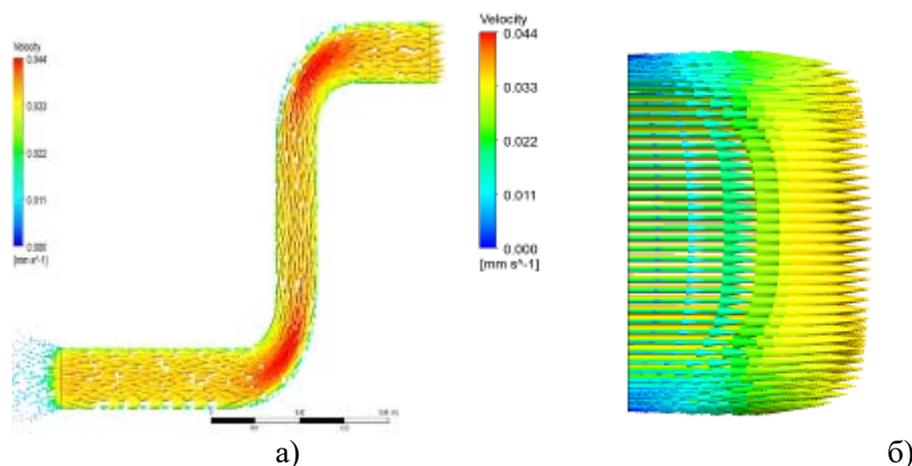


Рис. 1 Распределение скорости потока рабочей среды в начальный момент цикла: а) скорость течения по длине канала; б) профиль скорости на выходе

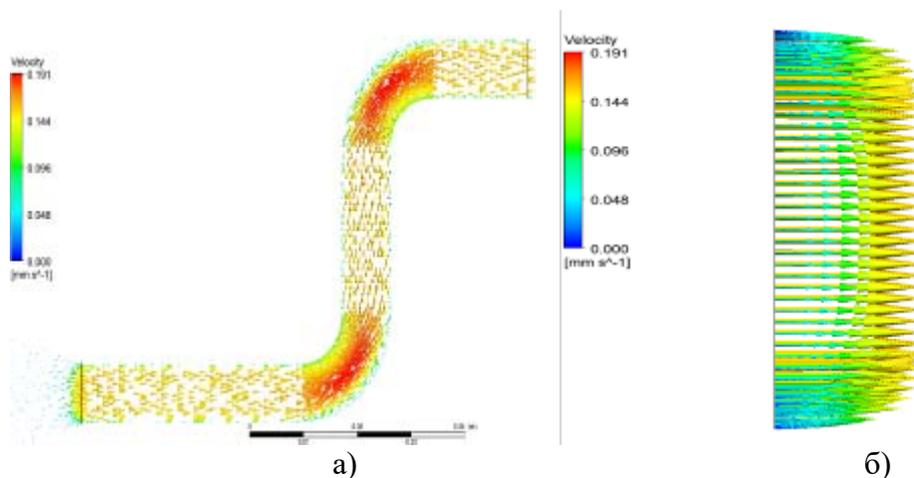


Рис. 2. Распределение скорости потока рабочей среды в конечный момент цикла: а) скорость течения по длине канала; б) профиль скорости на выходе

В конечный момент времени на выходном сечении заготовки наблюдается незначительный градиент скорости. Следовательно поток рабочей среды вытекает из канала с ускорением. Данное явление объясняется высокими вязкоупругими свойствами рабочей среды по сравнению с ньютоновской. Численные значения скоростей потока на превышают величины в начальный момент времени 0,04 мм/с или 2,6 мм/мин и в конечный момент времени 0,19 мм/с или 11 мм/мин. Этот эффект доказывает преимущества применения процесса *AFM* перед другими методами финишной обработки.

Далее выполнен расчет поля распределения, динамического давления течения потока по длине исследуемого канала (рис. 3). Установлено, что свои максимальные значения динамическое давление потока достигает внутри обрабатываемой заготовки. Произведен

расчет поля распределения, статического давления течения потока по длине исследуемого канала (рис. 4).

Результаты представленного расчетного моделирования по распределению давления значительно расходятся с экспериментально полученными ранее результатами распределения давления потока в квадратном канале [9]. Такое расхождение вызвано влиянием наполнителя на течение потока среды.

Известно, что при сдвигающем давлении в потоке среды частицы наполнителя структурируются в цепочки, перемещающиеся в линиях тока вязкоупругой среды [10]. Каждая цепочка оказывает дополнительное сопротивление сдвигающему давлению, увеличивая тем самым вязкость рабочей среды. Данное предположение подтверждено при исследовании возникновения силовых цепочек в процессе обработки абразивным потоком [11].

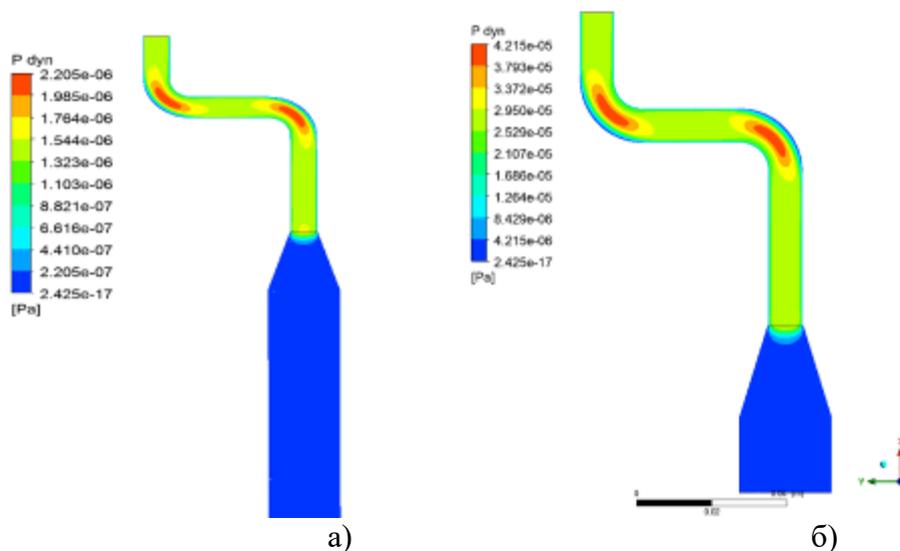


Рис. 3. Распределение динамического давления: а) в начальный момент цикла; б) в конечный момент цикла

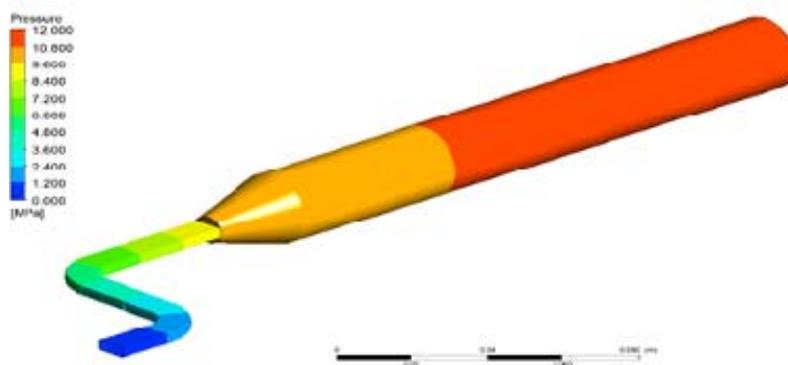


Рис. 4 Распределение статического давления

На основании результатов визуального исследования влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке [12], предложена схема распределения давления при установившемся течении среды ограниченного объема в изогнутом канале. При этом наблюдаются три зоны деформирования потока (рис. 5) [4].

Скорость течения в первой зоне (ядре потока) максимальна, а давление минимальное. В этой зоне отсутствует градиент скорости между соседними линиями тока. На стенке канала образуется зона, в которой скорость потока минимальна, а давление, наоборот. В этой зоне градиент скорости сдвига имеет максимальные значения. Между двумя этими

зонами располагается переходная область. Для всех трех зон градиент давления в потоке рабочей среды по длине канала минимален. Максимальное напряженно-деформированное состояние среды на стенке канала положительно влияет на условия обработки, так как именно в этой области находятся активные абразивные зерна, микронеровности которых вступают в контакт с микронеровностями обрабатываемого поверхностного слоя [4].

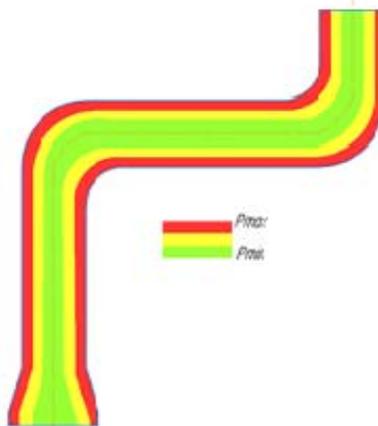


Рис. 5. Схема распределения давления установившегося течения ограниченного объема рабочей среды в канале

Полученные численные значения скорости и давления потока позволяют реализовать все виды контактных взаимодействий, а значит и провести финишную обработку внутренней поверхности. Эти значения могут быть использованы для расчета шероховатости поверхности на основе модели контактных взаимодействий [8].

Расхождение экспериментальных данных с приведенными по моделированию, предполагается связано с особенностью задания граничных условий. Рекомендуется составить математическую модель описания трения рабочей среды у границы поверхности заготовки с учетом видом, зернистостью наполнителя и исходной шероховатости, состояния поверхностного слоя.

При сравнительном анализе распределения полей статического и динамического давления потока рабочей среды видно, что статическое давление принимает максимальные значения в цилиндре рабочей установки, а не в обрабатываемом канале. В свою очередь, динамическое давление потока достигает свои максимальные значения внутри обрабатываемого волновода.

Поле распределения статического давления потока рабочей среды соответствует модели течения ньютоновской жидкости по уравнениям Бернулли или укороченным уравнениям Навье-Стокса. В этих моделях давление потока жидкости достигает своих максимальных показателей в поперечных сечениях канала с наибольшей площадью.

Поле распределения динамического давления потока рабочей среды соответствует экспериментальным данным процесса течения неньютоновских жидкостей, к которым относятся рабочей среды для обработки абразивным потоком. Эти данные показывают, что в зоне канала с наименьшей площадью поперечного сечения в потоке среды возникают максимальные величины нормальных напряжений. В таких зонах давление рабочей среды будет существенно выше, чем в зонах с поперечными сечениями большей площади.

Заключение. Сравнительный анализ распределения полей статического и динамического давления потока рабочей среды, полученных в ходе моделирования, показал, что для расчетов режимов процесса *AFM* необходимо применять величины динамического давления.

Библиографические ссылки

1. Иванов, П. А. Перспективы обработки абразивным потоком внутренней поверхности изогнутых трубных заготовок прямоугольного сечения / П. А. Иванов, В. А. Левко // *Металлообработка*. – 2021. – № 4(124). – С. 11-19. – DOI 10.25960/mo.2021.4.11. – EDN МААТАТ.
2. Overview of finish machining methods for the internal surfaces of rectangular pipe parts / P. A. Ivanov, V. A. Levko, O. V. Litovka // *Journal of Physics Conference Series*. 2022. DOI [10.1088/1742-6596/2373/7/072040](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/7/072040)
3. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком внутренней поверхности заготовок из латунных сплавов / П. А. Иванов, В. А. Левко, О. В. Литовка, Л. П. Сысоева // *Вестник МГТУ "Станкин"*. – 2023. – № 1(64). – С. 114-124. – DOI 10.47617/2072-3172_2023_1_114. – EDN АРУВДХ.
4. Иванов, П. А. Моделирование и экспериментальная обработка абразивным потоком внутренней поверхности заготовок некруглого сечения / П. А. Иванов, В. А. Левко, О. В. Литовка // *Металлообработка*. – 2022. – № 3(129). – С. 24-34. – DOI 10.25960/mo.2022.3.24. – EDN EVCLSQ.
5. Иванов, П. А. Выбор вида и величины зерна наполнителя при обработке абразивным потоком прямоугольных заготовок из цветных сплавов / П. А. Иванов, В. А. Левко // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. – 2022. – Т. 25. – № 2. – С. 6-13. – DOI 10.22213/2413-1172-2022-2-6-13. – EDN GONIUI.
6. Левко, В. А. Научные основы абразивно-экструзионной обработки деталей / В. А. Левко. – Красноярск : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2015. – 222 с. – ISBN 978-5-86433-654-0. – EDN RQDICO.
7. 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.
8. Левко, В. А. Расчет шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий / В. А. Левко // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2009. – № 1. – С. 59-62. – EDN КРУУУХ.
9. Левко, В. А. Исследование распределения давления рабочей среды по длине канала при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. – 2012. – № 4(44). – С. 159-162. – EDN РЈХСНН.
10. Левко, В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины / В. А. Левко // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. – 2008. – № 2(5). – С. 85-94. – EDN SZDWND.
11. Xiu Tian-Xun, Wang Wei, Liu Kun, Wang Zhi-Yong, Wei Dao-Zhu. Characteristics of force chains in frictional interface during abrasive flow machining based on discrete element method. *Advances in Manufacturing*. 2018. No 6. PP. 355–375. <https://doi.org/10.1007/s40436-018-0236-7>
12. Research the influence finishing canal shape to flow media for abrasive flow machining process / V. A. Levko, M. A. Lubnin, P. A. Snetkov [et al.] // *Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems*. – 2009. – No. 5(26). – P. 93-99. – EDN LAKZHV.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ

О. В. Литовка

Научный руководитель - В. А. Левко

Сибирский государственный университет науки и технологий

имени академика М. Ф. Решетнева

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

E-mail: litovka.9518@gmail.com

Рассмотрены основные направления контроль изменения шероховатости поверхности при обработке абразивным потоком методом акустической эмиссии. Установлено, что в настоящее время имеются зависимости частот сигналы RMS АЭ от шероховатости поверхности круглых отверстий и состава рабочей среды. Сигналы RMS АЭ возможно использовать как инструмент для мониторинга процесса обработки абразивным потоком. Введение акустических датчиков в систему управления процессом обработки абразивным потоком повысит уровень операционного контроля.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, акустическая эмиссия, рабочая среда, контроль

Введение. В настоящее время все большее применение находит относительно новый метод финишной обработки – 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].

Эта технология применяется для обработки широкой номенклатуры деталей из различных материалов. Современный уровень разработок данной технологии приведен в ряде российских и зарубежных исследований [2, 3].

В процессе обработки необходимо контролировать факторы режимов технологического процесса обработки абразивным потоком. К ним относятся следующие факторы: T – время обработки (s); N – количество циклов обработки (шт.); n – номер цикла обработки; P – давление сдвига (экструзии) (MPa); v_f – скорость течения среды в заготовке (m/s); v_p – скорость поршня или скорость потока среды на входе (в обрабатываемый канал) (m/s); TC – температура рабочей среды ($^{\circ}C$) [4]. Температура рабочей среды контролируется термодарами.

Давление рабочей среды контролируется датчиками. Так для контроля давления среды в процессе *AFM* микроотверстий применяется система управления, основанная на прогнозировании связи давления потока рабочей среды и удаления материала с обрабатываемой поверхности при обработке абразивным потоком. Эта нечеткая система построена на серой модели GM (1,1) с конформацией фонового значения контролируемого фактора [5]. Точная регулировка давления потока при постоянной небольшой разнице давления была решена с помощью системы управления с обратной связью по замкнутому контуру, которая контролировалась пропорциональным клапаном перерасхода [6].

Скорость течения среды в заготовке и скорость поршня (скорость потока среды на входе в обрабатываемый канал) являются производными от давления и вязкости среды.

До настоящего времени не полностью решена проблема контроля за изменением шероховатости поверхности в ходе процесса обработки. Это изменение определяет численные значения таких факторов как время обработки или количество циклов обработки. В настоящее время в большинстве случаев эти факторы при обработке конкретных деталей определяется экспериментально или по результатам теоретических расчетов по различным моделям контактных взаимодействий [7-13].

Анализ различных методов контроля шероховатости поверхности в процессе различных видов обработки показал, что наибольшую применимость имеет метод акустической эмиссии (АЭ).

Контроль изменения шероховатости поверхности при обработке абразивным потоком методом акустической эмиссии. В ходе экспериментальных исследований технологического процесса фрезерования проведен анализ теоретических значений величины шероховатости Rz поверхности и проведено сравнение их с полученными в ходе эксперимента. Установлена связь шероховатости обрабатываемой поверхности с откликами АЭ технологического оборудования [14].

В ходе отработки технологии *AFM* сопел форсунок были установлены отношения между диаметром обрабатываемого отверстия (рис. 1а), объемным расходом рабочей среды (рис. 1б) и RMS сигналом акустической эмиссии [15].

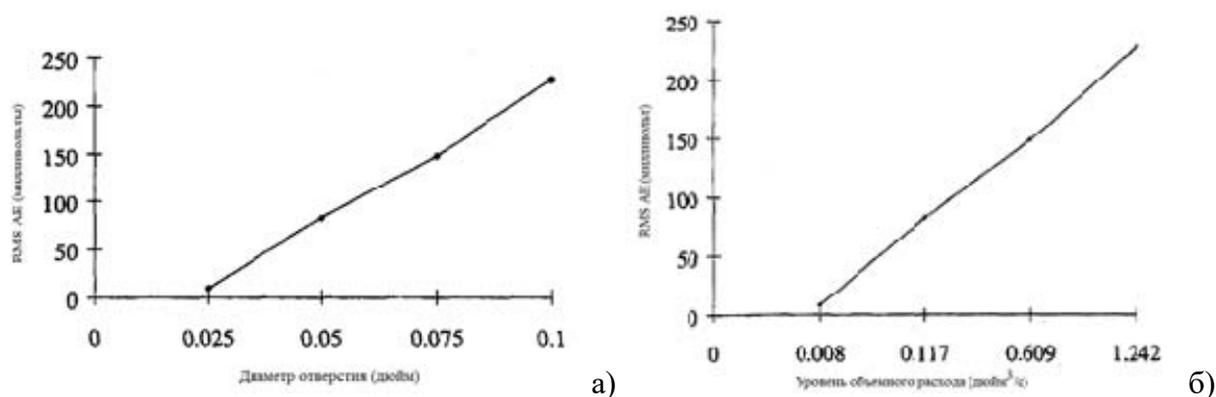


Рис. 1. Отношения между среднеквадратичным напряжением сигнала акустической эмиссии RMS и: а) диаметром обрабатываемого отверстия б) объемным расходом рабочей среды [15]

Проведенные исследования показали, что акустическая эмиссия является жизнеспособным методом зондирования для определения характеристик производительности процесса *AFM*. Сигнал АЭ в значительной степени зависит от характеристик поверхности заготовки до обработки, в частности исходной шероховатости поверхности Ra (Rz). Среднеквадратичное (RMS) напряжение сигнала АЭ оказалось чувствительно к давлению экструзии (относительно скорости деформации сдвига) и других параметров процесса *AFM*, которые влияют на удаление материала. Частота разложения сигналов акустической эмиссии по системам зависимых данных, приобретенная в течение обработки *AFM*, показала отдельные полосы частот. Эти полосы были связаны с различными видами удаления материала при *AFM*. Основной компонент сигнала АЭ имел частоту около 160 кГц. Именно эта частота возникает из-за типа материала заготовки и образования линий тока *AFM*. При возрастании числа циклов, амплитудный спектр мощности этой частоты увеличивается [15].

Проведены экспериментальные исследования *AFM* внутренней поверхности канала из нержавеющей стали в течение 150 циклов рабочими средами разных составов: концен-

трация абразива (35, 50 и 65%), размер абразивного зерна (320, 150, 54). Контролировалось изменение средней арифметической высоты профиля шероховатости Ra , величины съема материала и скорости потока среды.

Для мониторинга процесса *AFM* используются сигналы АЭ. Перед обработкой было проверено наличие сигналов АЭ. Установлен приблизительно одинаковый уровень этих сигналов. В ходе процесса обработки абразивным потоком средами всех составов установлены два пика АЭ примерно при 80 и 220 кГц. Выдвинуто предположение, что эти сигналы могут генерироваться из-за взаимодействия между абразивными зернами и неровностями обрабатываемой поверхности канала.

Повышение содержания абразивных частиц в рабочей среде при прочих равных условиях ведет к большему объему съема материала, а следовательно, и более высокому уровню среднеквадратичного значения АЭ. Аналогичная прямая зависимость выявлена и для скорости потока среды. При достижении определенных значений шероховатости Ra значения RMS АЭ также достигли устойчивого состояния. Таким образом значения уровня сигнала RMS АЭ отражают эволюцию шероховатости поверхности и возможное изменение свойств рабочей среды.

В настоящее время имеются зависимости частот сигналы RMS АЭ от шероховатости поверхности круглых отверстий и состава рабочей среды. Известно, что форма обрабатываемого канала влияет на течение рабочей среды при обработке абразивным потоком [16], а следовательно, и на частоты сигнала акустической эмиссии. Дальнейшие исследования должны установить зависимость сигналов акустической эмиссии и от формы поперечного сечения обрабатываемого канала.

Заключение.

Проведенные исследования показали, что сигналы RMS АЭ возможно использовать как инструмент для мониторинга процесса *AFM*. Введение акустических датчиков в систему управления процессом обработки абразивным потоком повысит уровень операционного контроля.

Библиографический список

1. Левко, В. А. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных 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. Review of previous Russian studies in the abrasive flow machining / V. A. Levko, O. V. Litovka, D. I. Savin, N. S. Terjaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : III International Scientific Conference, Krasnoyarsk, 29–30 апреля 2021 года. Vol. Volume 1155. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12029. – DOI 10.1088/1757-899X/1155/1/012029. – EDN CGFFUG.
4. Левко, В. А. Особенности операционного контроля при обработке абразивным потоком / В. А. Левко, П. А. Иванов, О. В. Литовка // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 24–26 февраля 2022 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – С. 48-50. – EDN XGOXFD.

5. Yang, S. Z., Jin, W., Bai, Y. J.. Application of Grey Model in Intelligent-Control of Micro-Hole Abrasive Flow Machining. In *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1039, pp. 403–408. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1039.403>
6. Wu, M. Y., & Gao, H. The Research of Extruded Pressure Auto-Adjustment Method in Abrasive Flow Polishing. In *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1027, pp. 203–207 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1027.203>
7. Левко, В. А. Расчет шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий / В. А. Левко // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2009. – № 1. – С. 59-62. – EDN КРҮІҮХ.
8. Левко, В. А. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена / В. А. Левко, Д. И. Савин, О. В. Литовка // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 24. – № 1(150). – С. 36-51. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-1-36-51. – EDN ООСРКІ.
9. Левко, В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины / В. А. Левко // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. – 2008. – № 2(5). – С. 85-94. – EDN SZDWND.
10. Singh, S., Raj, A.S.A., Sankar, M.R. et al. Finishing force analysis and simulation of nanosurface roughness in abrasive flow finishing process using medium rheological properties. *Int J Adv Manuf Technol* 85, 2163–2178 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8333-2>
11. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком внутренней поверхности заготовок из латунных сплавов / П. А. Иванов, В. А. Левко, О. В. Литовка, Л. П. Сыроева // *Вестник МГТУ "Станкин"*. – 2023. – № 1(64). – С. 114-124. – DOI 10.47617/2072-3172_2023_1_114. – EDN АРҮВDХ.
12. Baocai Zhang, Yu Qiao, Nasim Khiabani, Xinchang Wang. Study on rheological behaviors of media and material removal mechanism for abrasive flow machining (AFM) micro structures and corresponding simulations. *Journal of Manufacturing Processes*. Volume 73. 2022, pp 248-259. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.006>.
13. Shao, Y., Cheng, K. Integrated modelling and analysis of micro-cutting mechanics with the precision surface generation in abrasive flow machining. *Int J Adv Manuf Technol* 105, 4571–4583 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03595-4>
14. Литовка, О. В. Связь параметров акустической эмиссии процесса фрезерования с шероховатостью получаемой поверхности / О. В. Литовка // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 т., Красноярск, 12–16 апреля 2021 года. Том 1*. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2021. – С. 42-44. – EDN UZEVYГ.
15. Williams, R. E. Acoustic Emission Characteristics of Abrasive Flow Machining. *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* May 1998; 120(2): 264–271. <https://doi.org/10.1115/1.2830123>
16. Research the influence finishing canal shape to flow media for abrasive flow machining process / V. A. Levko, M. A. Lubnin, P. A. Snetkov [et al.] // *Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems*. – 2009. – No. 5(26). – P. 93-99. – EDN LAKZHV.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

В. И. Матвиенко, О. В. Литовка, В. А. Левко

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

E-mail: levko@sibsau.ru

Рассмотрены основные направления повышения надежности технологии селективного лазерного сплавления. Особое внимание уделено обеспечению точности и шероховатости поверхностей деталей.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, точность, шероховатость, надежность технологии

Введение. В настоящее время в машиностроительном производстве все большее применение находит такой вид аддитивной технологии, как селективное лазерное сплавление [1].

Известно, что наиболее распространенное оборудование по технологии селективного лазерного плавления обеспечивает качество поверхности изделий в общем случае не лучше $Ra = 20$ мкм и не позволяет подобрать режим плавления таким образом, чтобы обеспечить качество вертикальной поверхности лучше $Ra = 8$ мкм используя стандартные, предлагаемые на рынке устройства [2].

Совершенствование технологии селективного лазерного сплавления позволяет получить достаточно точные размеры поверхностей (8 – 10 квалитет) с соблюдением допусков формы и взаимного расположения поверхностей [3]. Однако при этом шероховатость поверхности не соответствует экономическим квалитетам точности, устанавливаемым при качественной и количественной оценке технологичности детали [4].

К специфическим особенностям метода следует отнести отсутствие ярко выраженного дефектного поверхностного слоя. Эта особенность обусловлена физическими явлениями, лежащими в основе метода *SLM*. Так в процессе *SLM* происходит перекристаллизация порошкового материала в условиях сверхвысоких скоростей охлаждения из жидкого состояния (до 105 °C/с), что приводит к возникновению метастабильных структур во всем объеме материала. Подобные структуры формируются и в поверхностном слое [1].

Несмотря на высокую точность получаемых размеров любой геометрической формы поверхность таких заготовок имеет высокую шероховатость, пористость и уровень остаточных напряжений. Это явление связано со специфическими особенностями процесса *SLM*, когда в процессе послойного наращивания материала возникает эффект комкования и адгезии частиц порошка к формируемой поверхности из-за остаточного тепла. Так при формировании заготовок из алюминиевого сплава $AlSi10Mg$ шероховатость поверхности составила $Ra = 13...14$ мкм [5].

В настоящее время известен целый ряд примеров практического использования данной технологии в производстве различных деталей.

Так данная технология применена для формообразования конструкции малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки. При изготовлении партии камер сго-

рания выявлены типичные микродефекты, свойственные *SLM* процессу, такие как микропористость, микронесплавления, микротрещины, повышенная шероховатость ($Ra = 8,7...10,1$ мкм) топливных каналов основной и дежурной зоны, локальные зоны несплавления выращиваемых слоёв на корпусе горелки, сложность извлечения порошка из замкнутых труднодоступных полостей по ходу наращивания. Локальные зоны несплавления устранены лазерной заваркой с последующим обязательным циклом контроля. Отмечено, что поиск дальнейших технологических процессов, снижающих шероховатость наружных и внутренних поверхностей деталей, изготовленных по *SLM* процессу, является не менее значимой задачей [6].

Технология селективного лазерного сплавления нашла применение в изготовлении кронштейнов, радиаторов, компараторов, СВЧ-трактов (волноводов). При этом шероховатость поверхности канала (Ra) непосредственно после печати гораздо выше, чем при гальванопластике, до двух-трех десятков микрон. Однако гидроабразивная обработка (прокачка) потоком суспензии под давлением позволяет снизить ее до значений менее 1 мкм [7]. Также имеется положительный опыт существенного уменьшения шероховатости внутренних поверхностей изогнутых волноводов, полученных методом *SLM* [8, 9].

Однако постобработка объемных «толстостенных» металлических структур, сформированных аддитивными технологиями, затруднена [10].

Кроме того, дополнительное применение финишных технологий снижает технологичность конструкции детали в целом и увеличивает ее технологическую себестоимость. В связи с этим проблема повышения надежности технологии селективного лазерного сплавления при обеспечении точности и шероховатости поверхностей деталей является актуальной.

Основные направления повышения надежности технологии селективного лазерного сплавления при обеспечении точности и шероховатости поверхностей деталей. На точность размеров деталей, формируемых технологией *SLM*, влияют большие термические деформации, возникающие вследствие действия остаточных напряжений из-за значительного градиента температур: при кристаллизации верхний сплавленный слой испытывает растягивающие напряжения, нижние – сжимающие. После отделения выращенной заготовки от платформы в результате этого явления возникает разнонаправленная релаксация накопленных напряжений, что ведет к объемной деформации заготовки.

Предложенная методика повышения точности деталей газотурбинного двигателя, изготавливаемых селективным лазерным сплавлением, позволяет обеспечить размерную точность данных деталей за счет компенсации действия остаточных напряжений путём введения предварительной коррекции геометрии детали по результатам конечно-элементного анализа на этапах: симуляции процесса *SLM* и постобработки, включая операции термообработки и отрезки; расчёт остаточных напряжений на основе теплового анализа при симуляции операций технологического процесса; расчёт деформации и поводки (смещения) геометрии выращиваемой детали от действия остаточных напряжений; суммирование величин рассчитанных перемещений, привязанных к узлам STL-файла мастер-модели с обратным знаком с координатами узлов триангуляционной поверхности мастер-модели. В результате получается скорректированная мастер-модель, которая должна компенсировать термические поводки при выращивании [11].

Коррекция исходной мастер-модели является первым направлением повышения надежности рассматриваемой технологии. Вторым направлением повешения надежности точности формирования поверхности деталей является выбор стратегии обработки лазерным лучом.

От выбранной стратегии обработки лазерным лучом при селективном лазерном сплавлении зависят механические свойства и пористость образцов, а также время изготовления каждого слоя детали и всей детали в целом. Уменьшение пористости возможно

за счёт подбора оптимальных технологических параметров, таких как мощность и скорость сканирования лазерного луча, толщина сплавляемого слоя порошкового материала, а также подбора оптимального шага сканирования между двумя соседними сплавляемыми единичными треками [12].

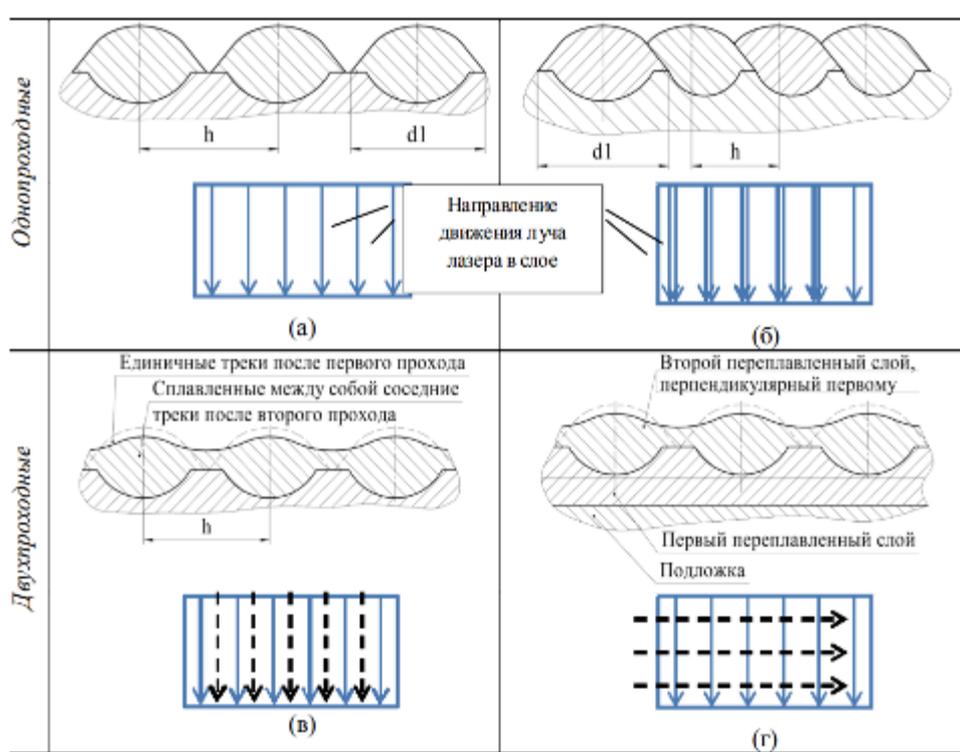


Рис. 1. Стратегии обработки лазерным лучом сплавляемого слоя изделия (сплошная стрелка первый проход луча лазера, штрихпунктирная линия - повторный проход луча лазера): а – простая однопроходная стратегия обработки с широким интервалом сканирования между единичными треками; б – уплотненная однопроходная стратегия обработки с меньшим интервалом сканирования между единичными треками; в – двухпроходная стратегия обработки «двух зон»; г – двухпроходная стратегия обработки перекрестной штриховки [12].

На точность формирования размеров и шероховатости размеров влияет фазовый состав порошка, размеры и форма частиц порошка, а также режимы работы лазера (непрерывность, длина волны и мощность), структура защитной сферы, толщина порошкового слоя, скорость сканирования и диаметр пятна лазера, расстояние между соседними векторами, а также тип стратегии сканирования (обработки) [13].

Таким образом, третьим направлением повышения надежности метода *SLM* является правильный выбор материала порошка, а также размеров и формы частиц. От этих факторов зависит выбранная толщина порошкового слоя. Четвертое направление – режимы работы лазера.

При изготовлении компонентов космической техники на точность размеров оказывает оценка технической готовности установки селективного лазерного сплавления и выбор лучших режимов ее работы. Рассмотрена циклограмма работы комплекса и аргументирована специфика достижения основных выходных параметров предельных значений, которая обусловлена влиянием повышенных температур. Также получен комплексный коэффициент технической готовности установки селективного лазерного сплавления для изготовления компонентов космической техники, который можно охарактеризовать как вероятность того, что система окажется в работоспособном состоянии в произвольный

момент времени [14]. Это касается как системы подачи и формирования линий тока траектории молекул аргона, так и траектории движения воды с термостабилизатором в системе охлаждения.

Особое внимание необходимо уделить численному значению температуры инертных газов в зоне формирования детали и уточнить требования по ее величине в зависимости от режимов формирования детали. Правильный выбор данных показателей необходимо отнести к пятому направлению повышения надежности.

Заключение. 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 технологии *SLM*.

Библиографические ссылки

1. Pham D. T., Dimov S. S. *Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*. Springer, London. 2001. 214 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0703-3_1

2. Кубриков, М. В. К вопросу финишной обработки изделий РКТ, изготовленных с применением SLM-технологий / М. В. Кубриков, А. Е. Петецкая, Е. П. Талай // Решетневские чтения : Материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 10–12 ноября 2021 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том Часть 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2021. – С. 165-166. – EDN UIWPSC.

3. Петецкая, А. Е. Обоснование критериев выбора технологий финишной обработки деталей, полученных методом селективного лазерного сплавления / А. Е. Петецкая, А. В. Устюгов-Грицай // 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. 73-76. – EDN ADZJXD.

4. Сысоев, С. К. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко. – 2-е, стереотипное. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2016. – 288 с. – ISBN 978-5-8114-1140-5. – EDN VLRGOZ.

5. Can Peng, Youzhi Fu, Haibo Wei, Shicong Li, Xuanping Wang, Hang Gao. Study on Improvement of Surface Roughness and Induced Residual Stress for Additively Manufactured Metal Parts by Abrasive Flow Machining. *Procedia CIRP*. Vol. 71. 2018. pp. 386-389, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.046>.

6. 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.

7. Нисан, А. Печать металлопорошковыми композициями: возможности и перспективы применения в приборостроении / А. Нисан // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2018. – № 4(175). – С. 150-154. – DOI 10.22184/1992-4178.2018.175.4.150.154. – EDN UQEGEO.

8. M.S. Duval-Chaneac, S. Han, C. Claudin, F. Salvatore, J. Bajolet, J. Rech. Experimental study on finishing of internal laser melting (SLM) surface with abrasive flow machining (AFM). Precision Engineering. Vol. 54. 2018. Pp. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.03.006>.

9. 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. – № 7. – С. 600-605. – DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-7-600-605. – EDN SRDKMG.

10. Кондрашин, А. А. Аддитивные технологии для формирования объемных металлических структур / А. А. Кондрашин, А. Н. Лямин, В. В. Слепцов // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. – 2019. – Т. 11, № 4. – С. 5-12. – DOI 10.18127/j22250980-201904-01. – EDN WYIUWB.

11. Методика повышения точности деталей ГТД, изготавливаемых селективным лазерным спеканием / И. С. Степаненко, В. А. Печенин, Н. В. Рузанов, А. И. Хаймович // Информационные технологии и нанотехнологии : Сборник трудов ИТНТ-2018, Самара, 24–27 апреля 2018 года / Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – Самара: Предприятие "Новая техника", 2018. – С. 1672-1680. – EDN XMWZMD.

12. Волосова, М. А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом / М. А. Волосова, А. А. Окунькова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4-2. – С. 587-591. – EDN PYZDOD.

13. Назаров, А. П. Исследование процессов модификации поверхностного слоя и изготовления трехмерных машиностроительных деталей посредством селективного лазерного плавления / А. П. Назаров, Т. В. Тарасова // Вестник МГТУ "Станкин". – 2013. – № 2(25). – С. 17-21. – EDN RCASJD.

14. Лоскутов, Е. Н. Оптимизация и оценка технической готовности установки селективного лазерного сплавления для изготовления компонентов космической техники / Е. Н. Лоскутов, Я. В. Файда, А. Д. Губарев // Космические аппараты и технологии. – 2022. – Т. 6, № 4(42). – С. 272-278. – DOI 10.26732/j.st.2022.4.06. – EDN QTZKCL.

© Матвиенко В. И., Литовка О. В., Левко В. А. 2024

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СОПЛА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Петецкая А. Е., Сычев М. О.
Научный руководитель - В. А. Левко

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. Красноярский рабочий, 31
E-mail: angelina02021999@gmail.com

Метод селективного лазерного сплавления отнесен к высокоточным способам получения заготовок (деталей), при котором объем механической обработки сведен к минимуму. Выявлены основные проблемы, возникающие в ходе постобработки внутренней поверхности. Для повышения надежности и совершенствования технологии обработки абразивным потоком сопла предложены технические решения по обеспечению равномерной шероховатости внутренней поверхности сопла с переменным размером поперечного сечения.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, сопло, шероховатость поверхности, выравнивающее устройство, обработка абразивным потоком

Введение. Технология селективного лазерного сплавления (*Selective Laser Melting (SLM)*), основанная на избирательном плавлении нанесенного на подложку слоя порошка, позволяет получать функциональные детали на основе компьютерной модели и оперативно рассматривать многовариантные конструкторские и технологические решения для аэрокосмической отрасли, автомобилестроения, биомедицины, химической промышленности и других областей [1]. Пример деталей [2], формообразование которых проведено методом селективного лазерного сплавления показан на рис. 1.

Совершенствование технологии селективного лазерного сплавления позволяет получить достаточно точные размеры поверхностей (8 – 10 квалитет) с соблюдением допусков формы и взаимного расположения поверхностей. Однако полученная шероховатость поверхности не соответствует экономическим квалитетам точности, устанавливаемым при качественной и количественной оценке технологичности детали [3].

Таким образом, основной проблемой при изготовлении деталей методом *SLM* остается правильный выбор финишных технологий как для наружных, так и внутренних поверхностей. Для наружных поверхностей эффективно применение традиционных методов финишной обработки, таких как шлифование, полирование, доводка, суперфиниширование и др. Финишная обработка внутренних поверхностей сложной формы традиционными методами затруднена [4]. Надежная и воспроизводимая в рамках граничных условий технология финишной обработки позволит существенно повысить эффективность метода селективного лазерного сплавления и отнести его к высокоточным методам получения заготовок (деталей), при котором объем механической обработки сведен к минимуму [5].

Технология обработки абразивным потоком. Такой технологией является обработка абразивным потоком. С использованием обработки абразивным потоком удалось обеспечить равномерную обработку внутренних поверхностей закрытых каналов литых крыльчаток [6...8], заготовок из латунных сплавов [9], а также волноводов, полученных

методом *SLM* [10, 11]. Однако все эти детали имели внутренние поверхности с постоянной формой поперечного сечения.



Рис 1. Сопло камеры, полученное методом селективного лазерного сплавления [2]

Известно, что форма поперечного сечения канала и ее постоянство по длине влияют на равномерность обработки абразивным потоком [12, 13]. Использование выравнивающего устройства при обработке конусных каналов обеспечило равномерную шероховатость обработанной поверхности имитатора за счет изменения характера течения, т. е. перехода от течения в местном сопротивлении (конусе) к течению в кольцевом канале, имеющем постоянную площадь поперечного сечения [14].

Использование выравнивающего устройства при обработке конусных каналов обеспечило равномерную шероховатость обработанной поверхности сопла термопластавтомата за счет изменения характера течения, т. е. перехода от течения в местном сопротивлении (конусе) к течению в кольцевой щели с постоянным сечением. При этом учитывалось отношение расходов рабочей среды в цилиндрическом канале и кольцевой щели $Q_{\text{цил}}/Q_{\text{кол}} = 6,4$, а также отношение теоретических значений пристеночного градиента скорости потока в этих частях канала $\gamma_{\text{цил}}/\gamma_{\text{кол}} = 1,2$ [15].

Так в способе абразивно-экструзионной обработки канала с цилиндрической и конусной частями в конусной части канала размещают выравнивающее устройство, имеющее форму конуса (рис. 2). Последнее обеспечивает постоянную площадь поперечного сечения образованного кольцевого зазора по всей длине конусной части. Упомянутая площадь превышает площадь поперечного сечения цилиндрической части канала в $1,2 \dots 6,4$ раза [16].

Совершенствование технологии обработки абразивным потоком сопла камеры сгорания. Форма сечения внутренней поверхности сопла камеры сгорания, отличается от формы сечения внутренней поверхности термопластавтомата. У сопла термопластавтомата две зоны внутренней поверхности – цилиндрическая и коническая. У камеры сгорания (рис. 3) необходимо выделить девять зон, с учетом того, что материал, из которого выполнено сопло – инконель, относится к труднообрабатываемым сплавам. Все зоны сопла имеют поперечные сечения в форме круга, отличающиеся между собой диаметрами.

Зона 1 имеет постоянный диаметр поперечного сечения и в процессе постобработки подвергается растачиванию с продольной подачей для обеспечения заданного размера. Глубина растачивания позволяет провести обработку стандартным расточным резцом. Зона 2 также имеет постоянный диаметр поперечного сечения и образует цилиндрическую часть канала. Эта зона может также быть обработана растачиванием с продольной подачей. Однако глубина растачивания обуславливает необходимость применения специального резца.

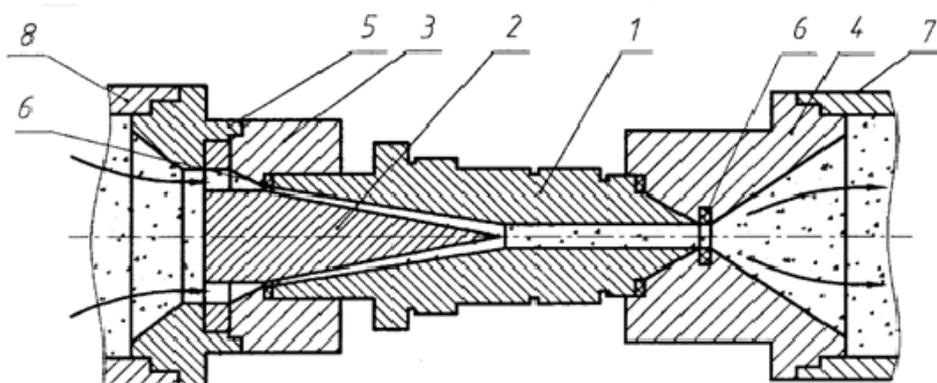


Рис 2. Схема обработки абразивным потоком (абразивно-экструзионной обработки) канала с цилиндрической и конусной частями: 1 – сопло; 2 – выравнивающее устройство; 3 – нижний переходник; 4 – верхний переходник; 5 – основание; 6 – уплотнения; 7 и 8 - цилиндры для продавливания рабочей среды [16]

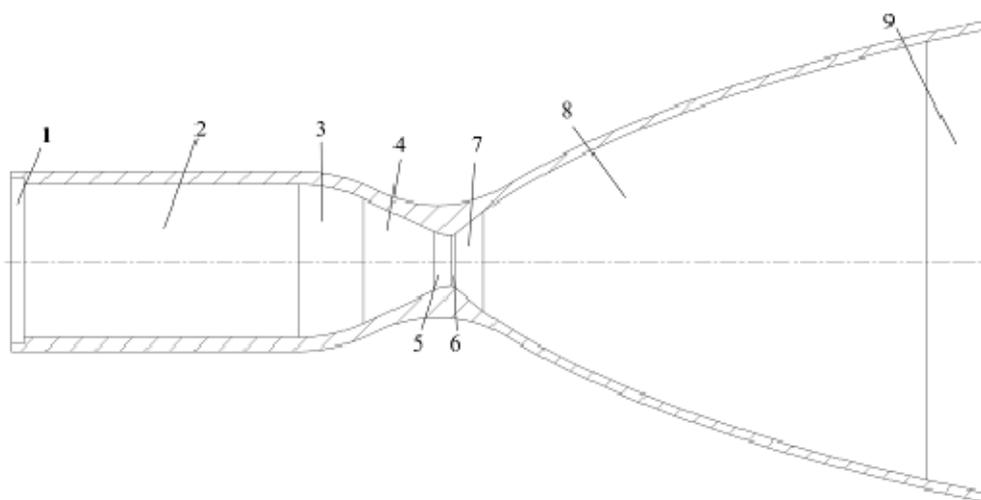


Рис 3. Внутренняя поверхность сопла камеры

У зоны 3, зоны 4 и зоны 5 диаметры поперечных сечений изменяются вдоль оси сопла по разным геометрическим зависимостям (радиусам скругления и углам наклона поверхности к центральной оси). Эти зоны относятся к конфузoram. Правая кромка зоны 5 является критическим сечением сопла. Зона 6 имеет минимальную длину и образована скруглением критического сечения сопла. Зоны 7, 8 и 9 относятся к диффузорам, отличающимися углами наклонов и длиной.

Сложная геометрия внутренней поверхности сопла требует дальнейшего совершенствования технологии обработки абразивным потоком с применением выравнивающих устройств [15, 16].

Минимальная площадь поперечного сечения сопла термопластавтомата была характерна для всей цилиндрической части канала. Относительно ее задавалась размерность конусного внутреннего устройства из условий $Q_{\text{цил}}/Q_{\text{кол}} = 6,4$ [15].

Для сопла камеры минимальную площадь имеет критическое сечение на кромке между зонами 5 и 6. Относительно ее величины был проведен ряд расчетов по определению размеров выравнивающих устройств для обработки абразивным потоком внутренней поверхности сопла.

Нулевой точкой отсчета было принято критическое сечение. Относительно него с шагом 2 мм были проведены расчеты радиуса наружной поверхности выравнивающих устройств, как зон 7, 8 и 9 (отрицательное направление), так и зон 1, 2, 3 и 4 (положительное направление). В качестве критерия расчета было выбрано постоянство отношений длин окружностей поперечных сечений сопла к длине окружности критического сечения $L_{ci}/L_{кр} = 6,4$, отношений радиусов поперечных сечений сопла к радиусу критического сечения $R_{ci}/R_{кр} = 6,4$ и отношений площадей поперечных сечений сопла к площади критического сечения $S_{ci}/S_{кр} = 6,4$. Результаты расчетов (рис. 4) показывают, что наибольший зазор между внутренней поверхностью сопла камеры и выравнивающими устройствами обеспечивается при критерии $S_{ci}/S_{кр} = 6,4$.

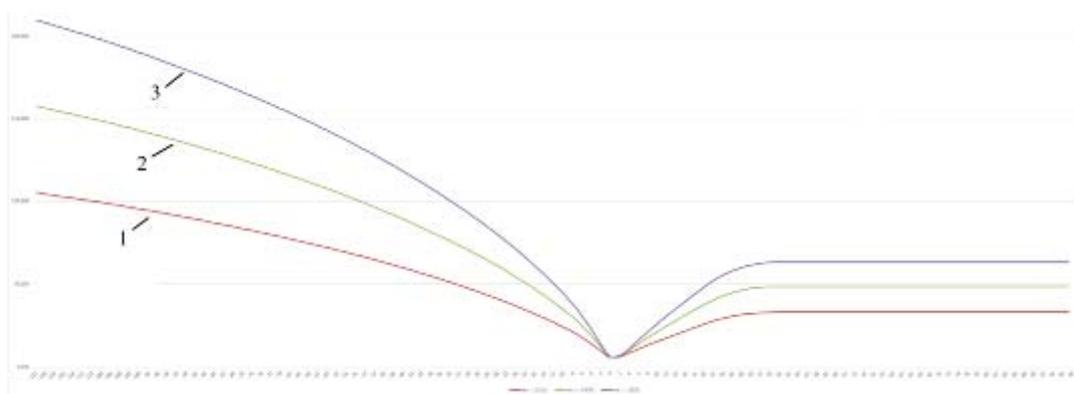


Рис 4. Результаты расчетов радиусов выравнивающих устройств при разных критериях выбора: 1 – $L_{ci}/L_{кр} = 6,4$; 2 – $R_{ci}/R_{кр} = 6,4$; 3 – $S_{ci}/S_{кр} = 6,4$

Большая величина зазора между внутренней поверхностью сопла камеры и выравнивающими устройствами позволяет применить для обработки абразивным потоком рабочую среду большей вязкости. Чем выше вязкость рабочей среды, тем большие силы резания можно обеспечить в ходе обработки такого труднообрабатываемого сплава, как инконель.

Результаты расчетов стали основой при проектировании выравнивающих устройств для обработки абразивным потоком внутренней поверхности сопла камеры (рис. 5). Схема размещения выравнивающего устройства для зон 2,3, 4 и 5 показана на рис. 5а. Для повышения технологичности конструкции данного устройства предложено сделать его сборным. Само устройство (рис. 5б) предполагается изготовить на токарном станке с ЧПУ. Переходник (рис. 5в) будет получен операциями точения и фрезерования. Между собой части выравнивающего устройства закрепляются резьбовым соединением.

Аналогично спроектировано и выравнивающее устройство для обработки зон 7, 8 и 9.

Обработку абразивным потоком внутренней поверхности сопла камеры предполагается провести на опытно-промышленной установке УЭШ-100 с применением рекомендаций по выбору состава рабочей среды и режимов обработки как способа абразивно-экструзионной обработки канала с цилиндрической и конусной частями [16], так и обработки малых отверстий [17].

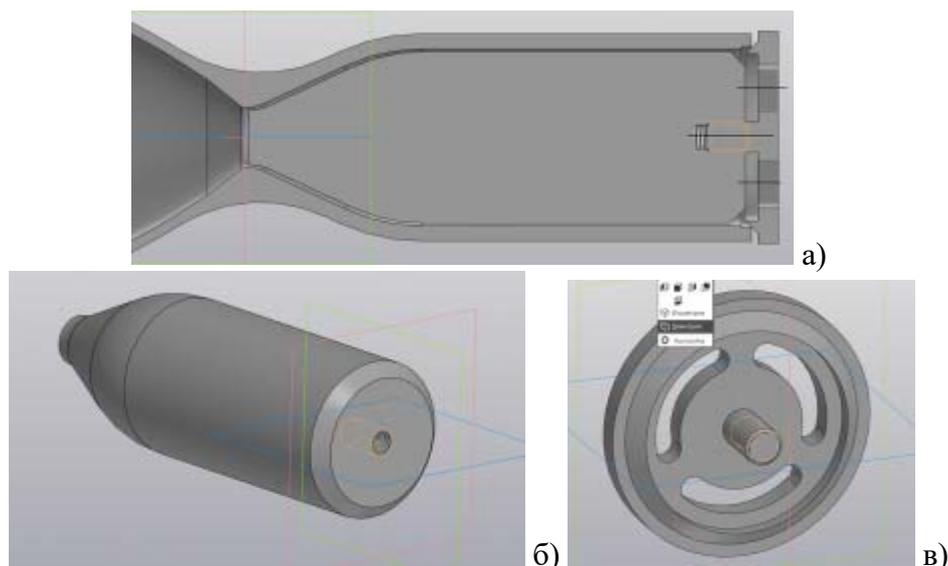


Рис 5. Спроектированное выравнивающее устройство для обработки абразивным потоком внутренней поверхности сопла камеры (зоны 2, 3, 4 и 5): а) выравнивающее устройство в сборе в сопле камеры; б) выравнивающее устройство; в) переходник

Таким образом, предложенные технические решения по обеспечению равномерной шероховатости внутренней поверхности сопла с переменным размером поперечного сечения сопла повысят надежность технологии обработки абразивным потоком аналогичных деталей.

Заключение. Для повышения надежности и совершенствования технологического процесса обработки абразивным потоком внутренней поверхности сопла камеры сгорания, полученной методом селективного лазерного сплавления, предложены технические решения в виде выравнивающих устройств. Применение этих устройств обеспечивает равномерность расхода рабочей среды за счет создания течения в кольцевой щели.

Внутренний канал сопла был разделен на 9 зон по закону изменения размеров поперечных сечений. Проведенные расчеты показали, что в качестве критерия выбора необходимо выбрать отношение площадей поперечных сечений сопла к площади критического сечения $S_{ci}/S_{кр} = 6,4$.

В результате расчетов спроектированы выравнивающие устройства для обработки абразивным потоком сопла камеры. Усовершенствованная технология финишной обработки позволит существенно повысить эффективность метода селективного лазерного сплавления и отнести его к высокоточным методам получения заготовок (деталей).

Библиографический список

1. Технология селективного лазерного спекания в производстве изделий ракетно-космической техники : учебное пособие / Ю. В. Баданина, А. Л. Галиновский, Е. С. Голубев [и др.]. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. — 40 с. — ISBN 978-5-7038-5123-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/205358>
2. 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.

3. Сысоев, С. К. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко. – 2-е, Стереотипное. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2016. – 288 с. – ISBN 978-5-8114-1140-5. – EDN VLRGOZ.

4. Левко, В. А. Абразивно-экструзионная обработка. Современный уровень и теоретические основы процесса : монография / В. А. Левко ; В. А. Левко ; Федеральное агентство по образованию, Сибирский гос. аэрокосмический ун-т им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск : Сибирский гос. аэрокосмический ун-т, 2007. – ISBN 978-5-86433-350-1. – EDN QNCAIP.

5. Петецкая, А. Е. Обоснование критериев выбора технологий финишной обработки деталей, полученных методом селективного лазерного сплавления / А. Е. Петецкая, А. В. Устюгов-Грицай // 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. 73-76. – EDN ADZJXD.

6. 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.

7. Совершенствование технологии обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, Н. С. Теряев, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Металлообработка. – 2023. – № 3(135). – С. 3-12. – DOI 10.25960/mo.2023.3.3. – EDN NYPSFW.

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. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком внутренней поверхности заготовок из латунных сплавов / П. А. Иванов, В. А. Левко, О. В. Литовка, Л. П. Сысоева // Вестник МГТУ "Станкин". – 2023. – № 1(64). – С. 114-124. – DOI 10.47617/2072-3172_2023_1_114. – EDN APYBDX.

10. 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. – № 7. – С. 600-605. – DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-7-600-605. – EDN SRDKMG.

11. Mathieu Francois, Sangil Han, Frederic Segond, Corinne Dupuy, Mickael Rivette, Simon Turpauot, Mendi Mimouna, Ferdinando Salvatoe, Joel Rech and Patrice Peyre. Electromagnetic performance of Ti6Al4V and AlSi7Mg0,6 waveguides with laser beam, melting (LBM) produced and abrasive flow machining (AFM) finished internal surfaces. Journal of Electromagnetic Waves and Applications - Vol. 35, n°18, p.2510-2526 – 2021.

12. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко, М. А. Лубнин, П. А. Снетков [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2009. – № 4(25). – С. 138-145. – EDN KZTCCL.

13. Research the influence finishing canal shape to flow media for abrasive flow machining process / V. A. Levko, M. A. Lubnin, P. A. Snetkov [et al.] // Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems. – 2009. – No. 5(26). – P. 93-99. – EDN LAKZHV.

14. Левко, В. А. Технология абразивно-экструзионной обработки поверхностей каналов с применением выравнивающего устройства / В. А. Левко, Е. Б. Пшенко // Металлообработка. – 2008. – № 2(44). – С. 7-10. – EDN IJKUUR.

15. Левко, В. А. Исследование процесса абразивно-экструзионной обработки каналов с переменной формой сечения / В. А. Левко, П. А. Снетков, Е. Б. Пшенко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 3(36). – С. 140-145. – EDN OFYHNL.

16. Патент № 2469832 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/116. Способ абразивно-экструзионной обработки канала с цилиндрической и конусной частями : № 2011128636/02 : заявл. 11.07.2011 : опубл. 20.12.2012 / В. А. Левко, Е. Б. Пшенко ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева" (СибГАУ). – EDN FSMGGY.

17. 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., Сычев М. О., 2024

МЕТОДИКА, ТЕХНОЛОГИЯ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА НАНЕСЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ КАМЕРЫ РДМТ, ИЗГОТОВЛЕННОГО СПОСОБОМ 3D ПЕЧАТИ

В. В. Алексеенко, 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: mila.khitro@mail.ru

Рассмотрены общие принципы теплозащитного покрытия и его нанесение на внутреннюю поверхность камеры ракетного двигателя малой тяги подвергающуюся высоким тепловым нагрузкам, что подчеркнуло необходимость защиты внутренней полости камеры.

Ключевые слова: камера ракетного двигателя, теплозащитное покрытие, 3D-печать, огневые испытания.

Разработка ракетных двигателей малой тяги в основном ведется для дальнейшего использования их в роли исполнительных органов в системах управления космических летательных аппаратов. Они служат для ориентации, стабилизации и коррекции летательного аппарата в пространстве. Однако в рамках научно-исследовательского проекта, которым являлась разработка двигателя демонстратора, функциональное назначение заключается в проведении модельных стендовых испытаний без имитации условий космического пространства [1]. Такие испытания подразумевают, что двигатель будет находиться в энергетически высоконапряженном состоянии, работая на пределе своих возможностей. Проведение таких испытаний позволяют выявить максимально допустимое время функционирования камеры в допусках пределах. Поэтому актуальным вопросом является повышение производительности и надежности. Увеличение времени работы двигателя реализуется увеличением предела устойчивости камеры двигателя, поскольку изначально камера не охлаждается, то рационально использование теплозащитного покрытия на внутренней поверхности камеры РДМТ [2].

В данном случае, объектом обработки являлась камера ракетного двигателя малой тяги, изготовленная методом селективного лазерного спекания, из материала *inconel-718*. Разработка камеры ракетного двигателя предназначалась для отработки методики печати и проведения наземных огневых испытаний в научно-исследовательских целях.

Для повышения производительности и надежности камеры РДМТ необходимо нанести теплозащитное покрытие на внутреннюю поверхность. Теплозащитное покрытие на камерах ракетного двигателя представляет собой критически важный аспект, направленный на обеспечение стабильной работы и повышения эффективности ракетных двигателей. В условиях экстремальных температурных воздействий, которым подвергаются эти узлы во время работы, эффективная теплорегуляция становится фундаментальным элементом для обеспечения устойчивой работы.

Теплозащитное покрытие выполняет функцию минимизации теплопередачи к камере от высокотемпературных газов.

Задачей настоящей работы является не только достижение необходимой толщины теплозащитного покрытия в соответствии с техническими требованиями, но также обеспечение долгосрочной стабильности и высокого уровня адгезии покрытия к поверхности камеры РДМТ.

Камера представляет собой оболочку вращения с геометрическими размерами (рис.1), определенными на основе термодинамического расчета.

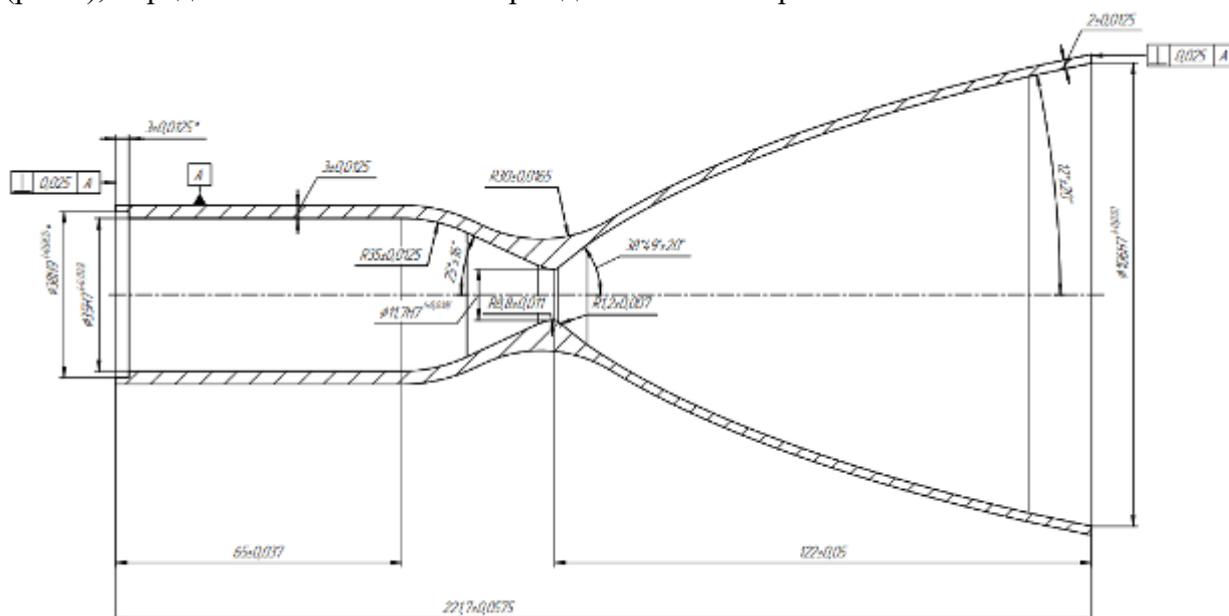


Рис. 1 Чертеж камеры РДМТ

Техническим заданием предусмотрено, на внутреннюю стенку камеры, имеющую состав %: Cr 14-16; Ni 43-47; Mo 4-5,2; W 2,5-3,5; Nb 0,8-1,5; Ti 1,9-2,4; Al 0,9-1,4; Fe — основа, нанесение теплозащитного покрытия. Состав ТЗП: промежуточный подслоя - кермет (50% NiCr + 50% ZrO₂ (по массе)), основное покрытие — двуокись циркония ZrO₂.

Толщина покрытия не более 40 мкм. Общая толщина покрытия не более 120 мкм. Шероховатость поверхности покрытия не более \sqrt{Ra} 3,2(√)

Покрытие наносится с использованием плазменных технологий, что обеспечивает оптимальное микроструктурное упорядочение и высокую адгезию к поверхности. Плазменные технологии позволяют добиться высокой прочности и стойкости покрытия, что делает его идеальным для эксплуатации в экстремальном термически нагруженном состоянии [3].

Оборудование включает в себя: рабочий стол, вращающийся вокруг своей оси с патроном для закрепления изделия, 7-ми осевой робот-манипулятор с программным управлением, плазматрон F4, который закрепляется на манипуляторе (рис.2).

Регулирование работы плазматрона производится изменением силы тока и расхода рабочего газа. Расход порошка через порошковый питатель определяется скоростью оборотов подающего диска, который составляет 4 об/мин., порошок подается в плазменную струю с помощью транспортирующего газа (аргон), его расход составляет 4 л/мин. Данный газ не участвует в образовании плазмы [4-5].

Напыление должно осуществляться в шумозащитной камере с применением робота-манипулятора, в автоматическом режиме, по заранее сформированной и записанной в энергозависимую память программе. Управление установкой построено на контроллере S7 фирмы SIMENS. Программирование и управление процессом напыления осуществляется с пульта оператора. Основным плазмообразующим газом является аргон, водород включают для повышения энергоэффективности.



Рис. 2 Общий вид установки, где:
1- РДМТ; 2 – рабочий стол; 3 – плазматрон F4; робот-манипулятор КУКА

Первоочередно выполняется отработка режимов нанесения ТПЗ на тестовом экземпляре камеры РДМТ в несколько проходов. Далее на рабочем столе тестовый экземпляр заменяется основной камерой и начинается процесс ее обработки.

Перед нанесением основного покрытия (ZrO_2) наносится подслой из кермета, состоящий на 50% из нихрома и 50% оксида циркония. Адгезионный слой наносится для уравнивания коэффициента линейного расширения между камерой и функциональным покрытием и для повышения адгезионных качеств. Подслой наносится в два прохода, перед первым температура обрабатываемого образца была комнатной, в процессе обработки образец нагрелся до $400(\pm 20)^\circ\text{C}$ (рис.3). Перед вторым проходом образцу дали остыть до 100°C .



Рис. 3 Показания пирометра

Затем осуществлялось нанесение основного функционального слоя в три прохода.

Рабочие параметры нанесения кермета и оксида циркония идентичны и представлены в таблице 1.

Таблица 1

| Параметр | Значение | |
|------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | Для закритической части | Для цилиндрической части |
| Скорость вращения образца на рабочем столе, об/мин | 95 | 120 |
| Время нанесения, с. | 25 | 25 |
| Сила тока в плазматроне, А | 500 | 500 |
| Мощность плазматрона, кВт | 22 | 22 |
| Расход аргона, л/мин | 30 | 30 |
| Расход водорода, л/мин | 2 | 2 |
| Расход жидкости(воды), охлаждающей плазматрон, л/мин | 18 | 18 |
| Скорость оборотов подающего диска, об/мин | 4 | 4 |
| Расход транспортирующего газа(аргон), л/мин | 4 | 4 |

После обработки необходимо провести контроль качества. Первично был проведен визуальный осмотр покрытия на предмет дефектов, таких как трещины, включения, неровности. Полноценный контроль качества может включать в себя: измерение толщины покрытия, испытания на устойчивость к вибрации и ударам, проведение тепловых испытаний для оценки эффективности теплозащитного покрытия в реальных условиях эксплуатации. Это может включать в себя циклы нагрева и охлаждения для имитации различных фаз работы ракетного двигателя. А также адгезионные тесты - оценка силы адгезии покрытия к поверхности камеры. Это может включать в себя испытания на отслаивание или другие методы оценки прочности соединения.

Таким образом, были отработаны режимы плазменного нанесения теплозащитного покрытия на внутреннюю поверхность камеры ракетного двигателя малой тяги, результатом разработан технологический процесс данной операции. Эффективность разработанной методики будет изучена в дальнейших исследованиях.

Библиографические ссылки

1. Акбулатов, Э. Ш. Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии / Э. Ш. Акбулатов, В. П. Назаров, Е. В. Герасимов // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т. 24, № 4. – С. 682-696. – DOI 10.31772/2712-8970-2023-24-4-682-696. – EDN QTCXOU.

2. Патент № 2735385 С1 Российская Федерация, МПК С23С 4/134, Н05Н 1/42, В05В 5/06. Плазматрон для нанесения покрытий на внутренние поверхности изделий : № 2019140987 : заявл. 10.12.2019 : опубл. 30.10.2020 / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, И. О. Якубович, М. С. Руденко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева" (СибГУ им. М.Ф. Решетнева). – EDN QJFNOT.

3. Сипко, В. В. Высокотемпературные технологии: теоретические основы технологии плазменного напыления / В. В. Сипко, И. Г. Абрахов, Д. С. Кутищев // Актуальные проблемы науки и образования на современном этапе : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции : Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Институт экономики и права г. Воронеж, 2015. – С. 285-301. – EDN VCVMLH.

4. Напыление покрытий плазмотроном с подачей порошка спутно плазменному потоку / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, И. О. Якубович, М. С. Руденко // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2021. – Т. 22, № 1. – С. 194-200. – DOI 10.31772/2712-8970-2021-22-1-194-200. – EDN IUGOSU.

5. Плазмотрон для нанесения покрытий из тугоплавких дисперсных материалов / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина, И. О. Якубович // Сибирский журнал науки и технологий. – 2018. – Т. 19, № 2. – С. 365-372. – DOI 10.31772/2587-6066-2018-19-2-365-372. – EDN XSLUHB.

© Алексеенко В. В., Руденко М. С. 2024

Секция
**«ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»**

УДК 621.396.67.095.3

**СИНТЕЗ МЕТОДА ОЦЕНКИ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НЕГЕРМЕТИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

С. Г. Кочура^{1,2}, И. А. Максимов^{1,2}, В. Г. Сомов², С. А. Ходенков², Д. О. Малышев²

¹Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский 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 проведен анализ методов оценки эффективности экранирования негерметичной конструкции приборного отсека КА. Установлено, что существующие методы аналитического расчета эффективности экранирования не позволяют провести достоверную оценку эффективности экранирования приборного отсека КА. Разработана методика расчета напряженности поля внутри приборного отсека, учитывающая все особенности реальной конструкции.

Ключевые слова: космический аппарат, излучение передающей антенны, бортовая аппаратура, эффективность экранирования приборного отсека.

Обзор существующих аналитических методов расчета эффективности экранирования [1–12, 13, 14] привел к пониманию того, что необходима разработка специализированного метода оценки эффективности экранирования такого специфического объекта как приборный отсек космического аппарата (КА).

Все известные аналитические методы расчета эффективности экранирования основаны на облучении объекта плоской электромагнитной волной, характеризующейся постоянством напряженности поля в пространстве. Учитывая, что передающие антенны КА установлены непосредственно на внешней поверхности приборного отсека (в случае крупногабаритных антенн следует рассматривать их облучатели), создаваемое ими поле в направлении приборного отсека не будет представлять собой плоскую волну. Облучение будет неравномерным, зависеть от диаграммы направленности антенны, ее ориентации относительно конструкции и места ее расположения. Согласно классическому определению, эффективность экранирования есть отношение напряженностей поля при отсутствии и при наличии экрана. При наличии неравномерного распределения поля по поверхности конструкции, понятие эффективности экранирования, в классическом понимании, перестает быть применимым. Поэтому, в методологии оценки электромагнитной обстановки внутри приборного отсека КА, оценка эффективности экранирования

конструкции должна быть заменена на оценку ослабления электромагнитного излучения негерметичной конструкцией КА, то есть преобразоваться в расчет, непосредственно, напряженности поля внутри приборного отсека с учетом интегральных характеристик как излучения, так и самой конструкции.

Таким образом, первым этапом в определении ослабления электромагнитного излучения должен быть расчет распределения излучения передающей антенны по поверхности приборного отсека.

Основным требованием к расчетной модели распределенного излучения антенны должна быть точность определения поля на поверхности панели корпуса, с учетом возможных условий ближней зоны излучения, и доступность проведения расчета на ранних этапах создания КА. Использование аналитических методов расчета излучения является трудоемким процессом с точки зрения формирования массива значений напряженности по поверхности панели. Кроме того, простые аналитические методы расчета могут давать погрешность в определении поля в ближней зоне излучения и трудноприменимы в случае зеркальных антенных систем, при анализе которых приходится исключать вклад рефлектора. С точки зрения оценочных расчетов вкладом рефлектора можно пренебречь, но при создании точной инженерной методики, исключение поля рефлектора неприемлемо. Следовательно, необходимо использовать метод машинного моделирования.

Наиболее подходящим инструментом, учитывающим указанные выше требования, является программное обеспечение (ПО) «GRASP» [13], представляющее собой основу для проектирования антенных систем. К необходимым качествам данного продукта, в контексте решаемой задачи, относятся:

- возможность формирования сетки значений напряженности поля антенны на плоскости, как в ближней, так и в дальней зонах излучения;
- способ задания исходных данных в виде основных геометрических и электрических характеристик антенн позволяет использовать данный продукт на самых ранних этапах проектирования КА;
- ПО «GRASP» является широко используемым среди разработчиков антенных систем. Это позволяет использовать уже сформированные специалистами модели антенн с требуемыми и заведомо адекватными выходными характеристиками.

Вторым этапом должен быть расчет прохождения, распределенного по поверхности панели излучения внутрь приборного отсека. Учитывая, что для любой элементарной области панели имеется свой уровень излучения и своя эффективность экранирования (ввиду различия применяемых материалов, наличия технологических отверстий и т.п.), прохождение излучения необходимо рассматривать как совокупность излучения внутрь приборного отсека элементарных излучателей. Мощность каждого излучателя должна определяться исходя из плотности потока мощности излучения на поверхности элементарной области, площади этой области и ее эффективности экранирования. Формируемыми ПО «GRASP» массивы напряженности поля представляют собой реальные и мнимые ортогональные компоненты комплексного электрического поля в нормализованных единицах. Таким образом, для вычисления плотности потока мощности или напряженности поля в единицах СИ, необходимо найти модуль напряженности электрического поля в нормализованных единицах:

$$\bar{E} = \sqrt{\sqrt{(E_{Xre}^2 + E_{Xim}^2)} + \sqrt{(E_{Yre}^2 + E_{Yim}^2)} + \sqrt{(E_{Zre}^2 + E_{Zim}^2)}}, \quad (1)$$

где E_{Xre} , E_{Yre} , E_{Zre} – реальные ортогональные компоненты электрического поля в нормализованных единицах, Вт^{1/2};

E_{Xim} , E_{Yim} , E_{Zim} – мнимые ортогональные компоненты электрического поля в нормализованных единицах, Вт^{1/2};

\bar{E} – модуль напряженности электрического поля в нормализованных единицах, Вт^{1/2}.

Напряженность электрического поля (амплитудное значение) в единицах СИ определяется по формуле [13]

$$\bar{E}_{\text{СИ}} = \bar{E} \cdot k \cdot \sqrt{2\zeta}, \quad (2)$$

где $\bar{E}_{\text{СИ}}$ – модуль напряженности электрического поля в единицах СИ, В/м;

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, 1/м, где λ – длина волны, м;

ζ – импеданс свободного пространства, 120π Ом.

Плотность потока мощности (вектор Пойнтинга), \bar{P} , Вт/м², определяется по формуле [13]

$$\bar{P} = k^2 \cdot \bar{E}^2. \quad (3)$$

Также, нюансом использования ПО «GRASP» является то, что в модели облучателей (объект «feed») подводимая мощность нормирована на 4π Вт [13]. Это нужно учитывать при проведении моделирования и вводить соответствующий корректирующий коэффициент с учетом реально подводимой мощности. Как и во всяком замкнутом объеме, процесс движения электромагнитной энергии внутри приборного отсека сопровождается рядом явлений, к которым относятся накопление и поглощение энергии, отражение электромагнитных волн и перераспределение электромагнитного поля. Таким образом, экран (приборный отсек) рассматривается как объемный резонатор [14]. Общая электромагнитная энергия ($W_{\text{об}}$) запасенная резонатором определяется по формуле

$$W_{\text{об}} = W_{\text{отр}} + W_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где $W_{\text{отр}}$ – электромагнитная энергия диффузного поля, возникшего в установившемся режиме после многократных отражений внутри резонатора;

$W_{\text{пр}}$ – энергия поля прямой волны.

Запасенная резонатором электромагнитная энергия имеет вид

$$W = \frac{\varepsilon}{8} E^2 V_{\text{экр}}, \quad (5)$$

где E – напряженность электрического поля диффузной волны, В/м;

$V_{\text{экр}}$ – объем резонатора, м³.

С другой стороны, по аналогии с акустическим полем в замкнутом объеме, когда длина волны меньше и соизмерима с линейными размерами резонатора, энергия стоячей волны может быть определена из выражения

$$W = \frac{P}{\sum S} \frac{4R_0}{(1-R_0) \cdot c} V_{\text{экр}}, \quad (6)$$

где P – мощность источника излучения;

R_0 – коэффициент отражения поверхности резонатора;

c – скорость распространения электромагнитной волны;

$\sum S$ – площадь поверхности резонатора.

Из выражений (5) и (6) можно найти среднеквадратическую напряженность поля диффузной волны в резонаторе при заполнении резонатора воздухом (вакуумом)

$$E = 110 \sqrt{\frac{PR_0}{2(1-R_0)\sum S}}. \quad (7)$$

Поле падающей волны от источника излучения является функцией расстояния до источника и его направленности как излучателя, в то время как поле диффузной волны распределено почти равномерно по всему объему. Расстояние от излучателя ($r_{гр}$) при котором напряженность поля прямой и диффузной волны равны определяется из следующего соотношения

$$r_{гр} = 0,14 \sqrt{G \sum S \frac{(1-R_0)}{R_0}}, \quad (8)$$

где G – коэффициент усиления излучателя в данном направлении.

Для приборного отсека КА, $\sum S$ которого, например, равна 30 м^2 , при коэффициенте усиления излучателя $G = 1$ (изотропный излучатель) и коэффициенте отражения поверхностей приборного отсека $0,99$, граничное расстояние от излучателя, при котором преобладает поле прямой волны, составляет $7,8 \text{ см}$. Таким образом, можно принять, что напряженность поля внутри резонатора будет определяться, в основном, полем диффузной волны.

Следовательно, метод оценки ослабления электромагнитного излучения негерметичной конструкцией КА приобретает следующий вид и последовательность:

- создание модели передающей антенны в ПО «GRASP»;
- расчет поля от антенны на плоскости, соответствующей стенке приборного отсека КА в ПО «GRASP» в нормализованных единицах. Дискретность расчетной сетки излучений должна быть соизмерима с размерами технологических отверстий на панели КА или меньше их;
- преобразование нормализованных единиц в плотность потока мощности излучения на поверхность элементарной области по формулам (1) и (3);
- создание массива величин эффективности экранирования элементарных ячеек панели КА;
- вычисление мощности P (в Вт) переизлучения элементарной ячейки внутрь приборного отсека по формуле

$$P = \frac{\bar{P} \cdot S}{SE}, \quad (9)$$

где S – площадь элементарной ячейки, м^2 ;

SE – эффективность экранирования элементарной ячейки;

- вычисление напряженности поля диффузной волны от каждой элементарной ячейки по формуле (7);

– нахождение суммарной напряженности поля диффузной волны излучения некогерентных элементарных ячеек по соотношению

$$E_{\text{сум}} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2}, \quad (10)$$

где $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ – напряженности поля диффузной волны от каждой элементарной ячейки.

Графическое представление последовательности расчета представлено на рисунке 1.

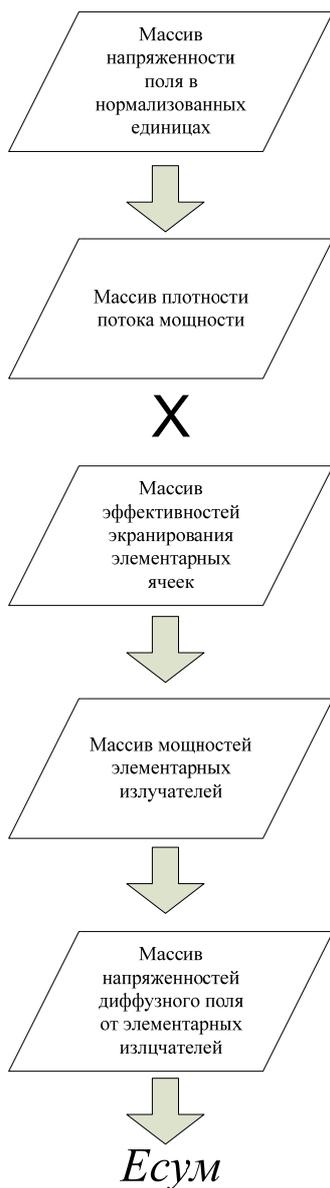


Рис. 1. Алгоритм оценки ослабления электромагнитного излучения негерметичной конструкцией КА

Проведение оценки ослабления электромагнитного излучения связано с формированием, обработкой и преобразованием большого количества исходных и промежуточных данных. Проведение указанных выше операций вручную займет большое количество

времени, поэтому, оптимальным решением является создание специализированного программного обеспечения, позволяющего максимально автоматизировать процесс расчета и подготовки исходных данных.

Библиографические ссылки

1. ECSS-E-HB-20-07A. Space engineering. Electromagnetic compatibility handbook. 5 september 2012.
2. 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.
3. 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.
4. Дональд Р. Ж. Уайт. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи : справ.-метод. пособие. Вып. 2. Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения. М.: Сов. радио, 1978. 272 с.
5. MIL-HDBK-1195. Military handbook. Radio frequency enclosures, 1988.
6. Г. Отт. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. М.: Изд-во «Мир», 1979. 317с.
7. Principles of electromagnetic compatibility. 3rd 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. XingcunCollinTong, 2009.
11. Приборный отсек космического аппарата. Патент на изобретение №2319646. 20.03.2008.
12. Telkom3. Payload EMC analysis. 200462543R. Issue 02. 26.04.2010.
13. GRASP9. Technical Description. Editor: Knud Pontoppidan. TICRA, September 2005.
14. Винников В. В. Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов : учеб. пособие / В. В. Винников – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. 164 с.

© С. Г. Кочура, И. А. Максимов, В. Г. Сомов, С. А. Ходенков, Д. О. Малышев, 2024

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН

И. А. Максимов^{1,2}, С. Г. Кочура^{1,2}, В. Г. Сомов²

¹Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский 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 проведен анализ методов оценки эффективности экранирования негерметичной конструкции приборного отсека КА. Установлено, что существующие методы аналитического расчета эффективности экранирования не позволяют провести достоверную оценку эффективности экранирования приборного отсека КА. Возникает необходимость разработки методики расчета напряженности поля внутри приборного отсека, учитывающая все особенности реальной конструкции.

Ключевые слова: космический аппарат, излучение передающей антенны, бортовая аппаратура, эффективности экранирования приборного отсека.

Предыдущие поколения космических аппаратов (КА) представляли из себя герметичную конструкцию. Основу конструкции составлял гермоконтейнер цилиндрической формы с установленной внутри бортовой аппаратурой (БА) и радиоэлектронными средствами (РЭС). Гермоконтейнер обеспечивает условия функционирования оборудования и радиогерметичность приборного отсека относительно излучений передающих антенн КА. Негерметичный приборный отсек представляет из себя принципиально иную конструкцию. Он имеет форму параллелепипеда, образованную сотопанелями модуля служебных систем (МСС) и модуля полезной нагрузки (МПН) сложной формы (рис. 1, 2).

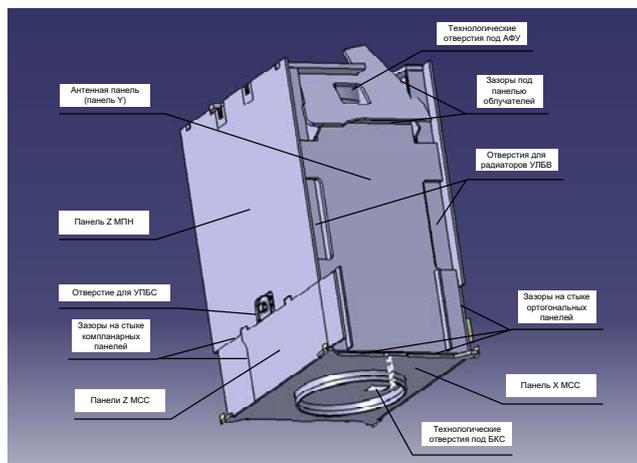


Рис.1. Общий вид негерметичного приборного отсека (начало)

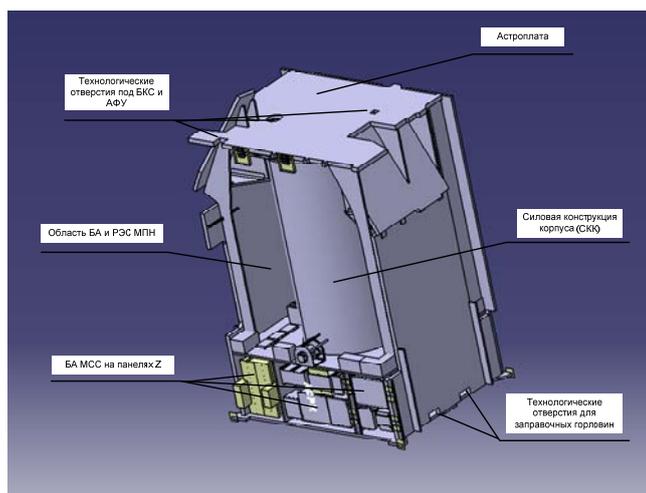


Рис.2. Общий вид негерметичного приборного отсека (окончание)

МСС образуется панелями «Z» с установленными на них БА МСС, панелью «X» МСС и силовой конструкцией корпуса (СКК). МПН образуется панелями «Z» (компланарны панелям «Z» МСС), антенными панелями (панели «Y») и астроплатой. Панели представляют собой обшивки, между которыми расположен сотовый наполнитель. Обшивки изготавливают из алюминия (панели «Z») или углепластика толщиной примерно 0,3 мм. Благодаря подобной конструкции, в приборном отсеке имеется множество зазоров, щелей и технологических отверстий, отличающихся формой и размерами:

- технологические отверстия под антенно-фидерное устройство (АФУ), располагаются в основном на антенных панелях и астроплате, служат для вывода коаксиальных и волноводных трактов. Имеют размеры от 10 x 10 см до полуметра. Подвержены интенсивному облучению от передающих антенн;

- технологические отверстия под бортовую кабельную сеть (БКС) и заправочные горловины, располагаются в основном на панели «X» МСС, астроплате и антенных панелях. Подвержены интенсивному и умеренному облучению;

- отверстия для радиаторов усилителя, собранного на лампе бегущей волны (УЛБВ), располагаются на антенных панелях, шириной 15–20 см и длиной до метра и более. Подвержены интенсивному облучению;

- зазоры под панелями облучателей, располагаются на антенных панелях, имеют сложную форму и значительные размеры. Подвержены интенсивному облучению;

- отверстия УПБС, располагаются на панелях «Z». Подвержены слабому излучению;

- зазоры на стыке компланарных панелей, имеют ширину 3–5 мм и длину до нескольких метров, располагаются на панелях «Z». Подвержены слабому излучению;

- зазоры на стыке компланарных панелей, имеют ширину 3–5 мм и длину до нескольких метров. Подвержены сильному, умеренному и слабому излучению.

Таким образом, негерметичный приборный отсек представляет собой объект, состоящий из различных материалов, покрытый множеством зазоров и отверстий различной формы и размера с нерегулярной структурой расположения. Такая конструкция приборного отсека требует, обеспечить защиту оборудования от излучения передающих антенн КА и разработать метод оценки величины этой защиты.

Наиболее простой и широко распространенный метод оценки эффективности экранирования материалов приведен в [1, 2–4, 5–10].

Эффективность экранирования, SE (в дБ), сплошных материалов в соответствии с данным методом определяется по формуле

$$SE = R + A + C, \quad (1)$$

где R – потери на отражение электромагнитной волны от границы раздела сред;

A – потери на поглощение электромагнитной волны в веществе экрана;

C – корректирующий коэффициент учета переотражений электромагнитной волны в веществе экрана от границ раздела сред.

Корректирующий фактор C обычно имеет малую величину и при потерях на поглощение более 10 дБ не учитывается. Величина потерь (в дБ) на отражение определяется по формуле

$$R = 168 - 20 \cdot \log \left(\frac{f \cdot \mu_r}{g_r} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где f – частота, Гц;

μ_r – относительная к меди магнитная проницаемость материала экрана;

g_r – относительная к меди проводимость материала экрана.

Анализ соотношения (2) показал, что потери на отражение уменьшаются с увеличением частоты и увеличиваются при уменьшении соотношения $\frac{\mu_r}{g_r}$.

Величина потерь (в дБ) на поглощение описывается формулой

$$A = 8,69 \cdot \frac{d}{\delta}, \quad (3)$$

где d – толщина материала экрана (в м);

δ – величина скин-слоя для материала экрана (в м), вычисляемая по формуле

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}, \quad (4)$$

где μ – магнитная проницаемость вещества (в Н/м);

σ – проводимость материала (в С/м).

Анализ (3, 4) показал, что с увеличением частоты (уменьшением скин-слоя, соответственно) потери на поглощение увеличиваются. Толщина материала, равная величине скин-слоя, ослабляет электромагнитное излучение на 8,69 дБ (на величину e , то есть в 2,7 раза).

Согласно формуле (1), первоначально преобладают потери на отражение, далее, с ростом частоты, преобладающим становятся потери на поглощение. Основными конструкционными материалами, используемыми при изготовлении обшивок сотовых панелей КА являются алюминий и углепластик. Обычно применяемая толщина алюминиевой обшивки составляет 0,3 мм. При данной толщине, начиная с частоты порядка 10 МГц, преобладающим становятся потери на поглощение электромагнитного излучения. При той же толщине углепластиковой обшивки преобладание поглощения начинается с частоты порядка 1200 МГц.

Расчеты по приведенной методике для алюминиевых и углепластиковых обшивок показывают, что величина экранирования данных материалов указанной толщины в диапа-

зоне частот более 200 МГц составляет более 400 дБ для алюминия и более 100 дБ для углепластика. Данные величины эффективности экранирования соответствуют сплошным экранирующим материалам. Учитывая, что конструкция приборного отсека КА не представляет из себя сплошной непрерывный электромагнитный экран, данная формула не может быть непосредственно применена для оценки эффективности экранирования приборного отсека. Следовательно, эффективность экранирования приборного отсека будет определяться наличием в конструкции зазоров, щелей и технологических отверстий.

Для расчета прохождения электромагнитного излучения через отверстия в [1, 5, 9, 10] используется следующая методика. Зазоры и технологические отверстия в конструкции, ввиду наличия некоторой толщины стенок приборного отсека, представляют из себя естественные волноводные тракты. Волноводные тракт характеризуется частотой обрезания, выше которой электромагнитные волны проходят по волноводу без ослабления, а ниже частоты обрезания испытывают затухание. Частота обрезания f_c для прямоугольного отверстия определяется по формуле

$$f_c = \frac{150010}{a}, \quad (5)$$

где a – максимальный размер отверстия (в мм).

Затухание электромагнитной волны в прямоугольном отверстии ниже частоты обрезания определяется по соотношению

$$SE = 27,3 \frac{L}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}, \quad (6)$$

где L – глубина отверстия (в мм).

Согласно формуле (5), максимальный размер отверстия, имеющего частоту обрезания 18000 МГц, составляет порядка 8,33 мм. Очевидно, что щели вдоль стыков сотовых панелей и технологические отверстия для выводов кабельных и волноводных трактов имеют несоизмеримо большие размеры. Следовательно, при строгом следовании формулам (5, 6) эффективность экранирования конструкции обращается в ноль.

Для повышения эффективности экранирования приборного отсека предложен метод заклейки зазоров и технологических отверстий конструкции алюминиевой лентой с электропроводящим липким слоем [11]. Алюминиевая лента толщиной 20 мкм, применяемая для обеспечения радиогерметичности, согласно формулам (1–3) обеспечивает эффективность экранирования более 100 дБ на частотах более 100 МГц.

Однако, приведенную выше величину нельзя считать конечной величиной эффективности экранирования приборного отсека. Сложность конфигурации зазоров и отверстий не позволяет обеспечить заклею со стопроцентным закрытием всех областей. Оставшиеся неоднородности заклейки не поддаются учету и не могут быть использованы при проведении аналитических расчетов.

Таким образом, методика расчета эффективности экранирования по формулам (1–6) не может в полной мере быть использована для расчета такой сложной конструкции как приборный отсек КА.

Следующим методом оценки эффективности экранирования является широко распространенный метод, описанный, например, в [12]. Выражение, приведенное ниже, учитывает особенности материала и конструкции объекта расчета, основные физические процессы и особенности экранирования составляющих электромагнитного поля

$$SE = 0,024 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} \cdot Z_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_Э}} \cdot e^{\frac{2\pi d}{m}} \cdot \left(\frac{a-m}{m}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (7)$$

где δ – величина скин-слоя для материала экрана (в м);

ρ – удельное сопротивление материала экрана (в Ом·м)
(для алюминия $\rho = 2,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м);

Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства (в Ом) ($Z_0 = 377$ Ом);

$R_Э$ – эквивалентный радиус экрана (в м);

a – расстояние между центрами отверстий и щелей в экране, возникших из-за не-
совершенства его конструкции и технологии изготовления (в м);

m – наибольший размер отверстия (щели) в экране (в м);

d – толщина материала экрана (в м).

Соотношение (7) является наиболее общим и полностью характеризует процесс электромагнитного экранирования реальных экранов. В данной формуле отсутствует множитель $e^{d/\delta}$, который обычно входит в формулы для эффективности экранирования абсолютно электрически герметичного экрана (см. формулу (3)). Этот множитель характеризует затухание поля в толще экрана, когда нет других путей распространения электромагнитной энергии и по своей величине намного больше остальных сомножителей.

Поскольку влияние этих дополнительных путей является преобладающим, эффективность экрана характеризуется множителем $e^{\frac{2\pi d}{m}}$, в котором однозначно выражена роль толщины материала и размера щелей. Множитель $\sqrt{\frac{\delta}{\rho}} \cdot Z_0$ определяет величину отражения электромагнитного поля от материала экрана. Формула (7) применима для широкого диапазона длин волн, пока $\lambda > \pi m$. При $\lambda \rightarrow \pi m$ множитель $\left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6$ резко уменьшается и эффективность экранирования становится незначительной. Этот множитель определяет эффективность экрана, обусловленную его герметичностью.

Основным множителем, наряду с множителем $\left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6$, определяющим эффективность экранирования в интересующем диапазоне частот, является множитель $\left(\frac{a-m}{m}\right)^2$.

Неоднозначность определения параметров a и m реальной конструкции является основной сложностью применения данной формулы для определения эффективности экранирования приборного отсека.

Отметим, что заклеивание щелей и отверстий предполагает стопроцентное покрытие областей. Непреднамеренные щели и отверстия, оставшиеся после заклейки, будут определять конечную эффективность экранирования, но описать их фиксированными параметрами не представляется возможным. Кроме того, наличие клеевого слоя между фольгой и обшивкой сотовой панели вносит неоднозначность в определение удельного сопротивления материала во множителе $\sqrt{\frac{\delta}{\rho}} \cdot Z_0$, что сказывается на результатах расчета.

Третий метод расчета используется компанией *ThalesAleniaSpace (TAS)*. Для учета дополнительного затухания электромагнитных КА представляет собой объемный резонатор с завышенными размерами [1, 13]. В основу метода положены основные характеристики объемного резонатора с завышенными размерами:

- резонатор называется «с завышенными размерами», когда его размер намного больше длины волны излучения;
- электромагнитная энергия, содержащаяся в закрытом объеме резонатора, отражается от его стенок образуя стационарные волны;
- генерируемое электромагнитное поле внутри резонатора является результатом комбинации большого числа независимых собственных мод;
- общая электромагнитная энергия равно распределена между всеми существующими модами;
- разница между максимумами и минимумами генерируемых стационарных волн мала;
- электрическое поле внутри закрытого резонатора приравнивается к однородному и постоянному полю, амплитуда которого равна максимальному значению генерируемых волн;
- направленная антенна с заданным коэффициентом усиления внутри резонатора становится ненаправленной с единичным коэффициентом усиления.

Коэффициент затухания X_C (дБ) объемного резонатора вычисляется по формуле

$$\frac{1}{X_C} = \frac{1}{X_p} + \frac{1}{X_\sigma}, \quad (8)$$

где X_p – коэффициент потерь на излучение через щели и отверстия в конструкции;

X_σ – коэффициент потерь на поглощение электромагнитной волны внутренней поверхностью приборного отсека.

Величина $\frac{1}{X_p}$ определяется по соотношению

$$\frac{1}{X_p} = \frac{32\pi S_0}{3\lambda^2}, \quad (9)$$

где λ – длина волны излучения (в м);

S_0 – суммарная площадь щелей и отверстий в конструкции (в м²).

Величина $\frac{1}{X_\sigma}$ имеет вид

$$\frac{1}{X_\sigma} = \frac{32\pi(S - S_0)\delta}{3\lambda^3}, \quad (10)$$

где S – суммарная площадь внутренних поверхностей конструкции (в м²).

Расчеты по данной методике показывают, что дополнительное затухание, вносимое объемным резонатором, может достигать величины 30–40 дБ в С- и Ку-диапазонах частот. Суммируя затухание, вносимое объемным резонатором и эффективность экранирования непосредственно конструкции КА, которая принимается TAS равной 30 дБ при наличии отверстий в конструкции не более 3 мм, получаем величину порядка 60–70 дБ. Проведенные тестовые измерения показывают, что величина эффективности экранирования приборного отсека КА лежит в пределах 35–40 дБ в С- и Ку-диапазонах частот.

Сложность оценки по методике TAS связана с тем, что в алюминиевой конструкции, имеющей высокую проводимость, относительно углепластика, определяющим является слагаемое X_p , описывающее потери на излучение через щели и отверстия конструкции.

Учитывая, что целью заклейки конструкции электромагнитной защитой является исключение щелей и отверстий, оценить достаточно точно величину суммарной площади отверстий не представляется возможным. Например, для КА «*Telkom3*» TAS использовал

при расчетах суммарную величину отверстий равную $0,28 \text{ м}^2$. Объективная оценка величины используемой площади отверстий показывает, что данная площадь соответствует отверстию с размерами $37 \times 37 \text{ см}$. Данная площадь трудно сопоставима с внешним видом заклеенной конструкции. Проведенный анализ показал несостоятельность модели объемного резонатора с завышенными размерами для расчета непосредственно эффективности экранирования приборного отсека.

Таким образом, существующие методы аналитического расчета эффективности экранирования не позволяют провести достоверную оценку эффективности экранирования приборного отсека КА. Возникает необходимость разработки методики расчета напряженности поля внутри приборного отсека, учитывающая все особенности реальной конструкции.

Библиографические ссылки

1. ECSS-E-HB-20-07A. Space engineering. Electromagnetic compatibility handbook. 5 september 2012.
2. 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.
3. 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.
4. Дональд Р. Ж. Уайт. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи : справ.-метод. пособие. Вып. 2. Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения. М.: Сов. радио, 1978. 272 с.
5. MIL-HDBK-1195. Military handbook. Radio frequency enclosures. 1988.
6. Г. Отт. Методы подавления шумов и помех в электронных системах: М.: Изд-во «Мир», 1979. 317с.
7. Principles of electromagnetic compatibility. 3rd 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. Xingcun Colin Tong, 2009.
11. Приборный отсек космического аппарата. Патент на изобретение №2319646. 20.03.2008.
12. Винников В. В. Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов : учеб. пособие / В. В. Винников. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. 164 с.
13. Telkom3. Payload EMC analysis. 200462543R. Issue 02. 26.04.2010.

© И. А. Максимов, С. Г. Кочура, В. Г. Сомов, 2024

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА БОРТОВУЮ АППАРАТУРУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И. А. Максимов^{1,2}, С. Г. Кочура^{1,2}, В. Г. Сомов², А. В. Кузовников^{1,2}, О. В. Дианова²

¹Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский 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 проведен анализ программного обеспечения для оценки напряженности электрического поля. Предложено программное обеспечение, позволяющее проводить оперативный расчет напряженности электрического поля в местах расположения бортовой аппаратуры, при незначительных временных затратах на создание моделей, с учетом влияния конструкции космического аппарата (КА) на распространение излучения. Проведен сравнительный анализ теоретически полученных данных и измеренных значений напряженности электрического поля на различном расстоянии от испытательных антенн.

Ключевые слова: космический аппарат, излучение передающей антенны, бортовая аппаратура, расчет напряженности электрического поля, расстояние от передающей антенны до бортовой аппаратуры

Мощность современных вычислительных средств и разнообразие программного обеспечения (ПО) предоставляют большой выбор для проведения моделирования излучения. Существует множество моделирующих программ, таких как «HFSS», «FEKO», «CST» и т.д. Сложность использования моделирующих программ заключается в необходимости создания адекватной модели передающей антенны и наличия ограничений ПО на размер моделируемой области пространства, особенно на высоких частотах.

Таким образом, использование данного класса моделирующего ПО может быть оправдано только с точки зрения проведения уточненных расчетов, когда простые аналитические методы не дают приемлемого результата.

Моделирование было использовано при анализе напряженности электрического поля от излучения антенны бортовой аппаратуры служебного канала управления (БА СКУ) в местах расположения приборов системы ориентации и стабилизации (СОС) в составе КА «Ямал-300К». Особенностью данного КА состоит в том, что приборы ориентации на Солнце (ПОС) и датчик направления на Солнце (ДНС) располагаются в непосредственной близости от передающей антенны БА СКУ. Расстояние от передающих антенн БА СКУ до ПОС составляло 31 см, до ДНС – 36 см. Аналитические расчетные оценки показали, что при уровне квалификации приборов 151 дБ·мкВ/м, создаваемое в районе расположения ДНС и ПОС поле составляет, соответственно, 147,4 и 148,6 дБ·мкВ/м. Таким образом, не обеспечивается необходимый проектный запас в 6 дБ между уровнем воздействия и уровнем квалификации. Для уточнения величины воздействующего поля было проведено моделирование излучения антенны БА СКУ в программном обеспечении

«CST». Модель антенны и форма рассчитанной диаграммы направленности показана на рисунке 1.

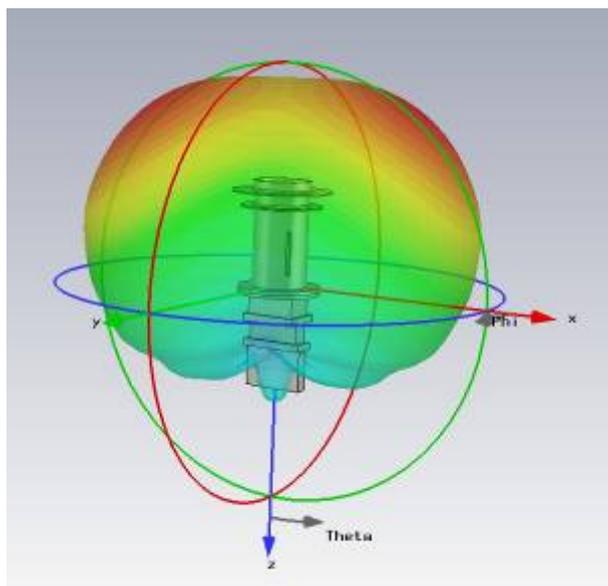


Рис.1. Модель антенны БА СКУ в ПО «CST» и форма ее диаграммы направленности

Средствами ПО «CST» проведен расчет напряженности электрического поля от антенны на расстоянии от расположения бортовой аппаратуры. Результат расчета для расстояния ПОС показан на рисунке 2.

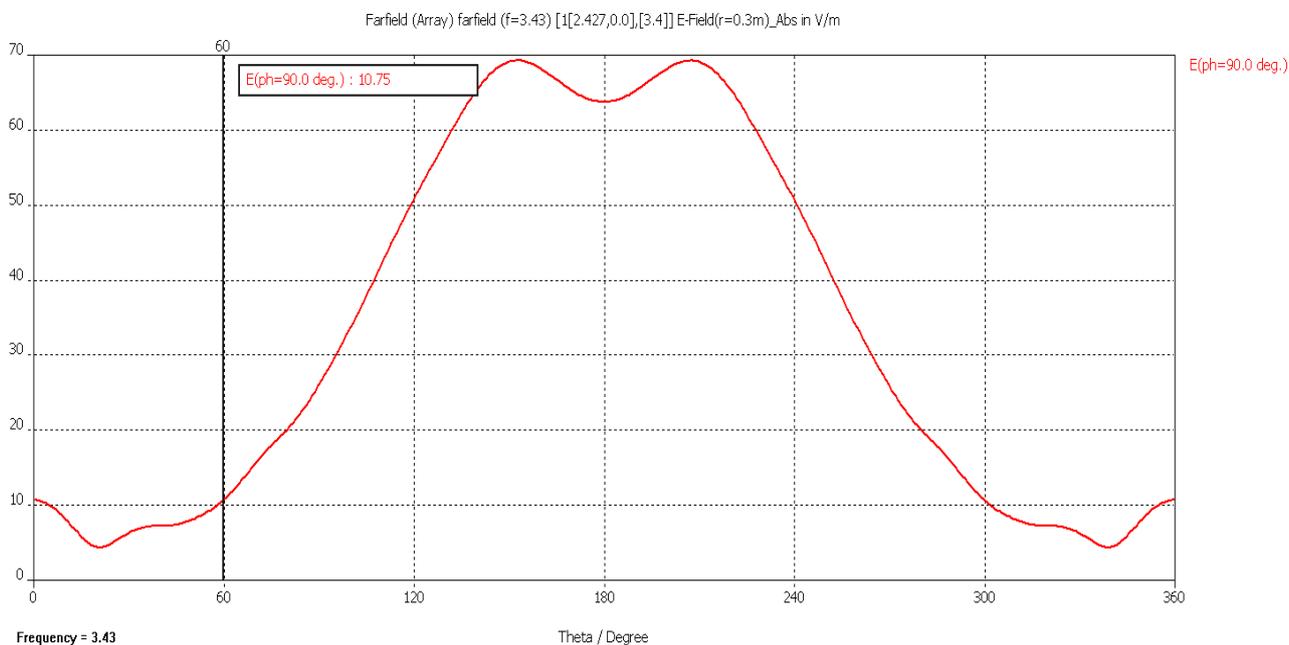


Рис. 2. Расчет напряженности электрического поля от антенны БА СКУ в ПО «CST»

Анализ полученных результатов показал, что напряженность электрического поля в районе расположения ДНС и ПОС составила, соответственно, 140,6 и 142 дБ·мкВ/м, что удовлетворяет запасу в 6 дБ относительно уровня квалификации.

Таким образом, уточненные расчеты с помощью ПО «CST» показали отсутствие необходимости проведения технических мероприятий по обеспечению электромагнитной

совместимости (ЭМС) КА «Ямал-300К», несмотря на неприемлемые результаты аналитических расчетов.

Рассмотренный класс ПО представляет собой инструмент для моделирования аутентичных реальным объектам моделей антенн. Однако, существует ПО, которое позволяет моделировать излучение от антенн, не используя их точную 3D модель, а используя некоторую совокупность геометрических характеристик проводя моделирование методами физической оптики и физической теории дифракции. Это программное обеспечение «GRASP» компании «TICRA» и является САD-системой для проектирования антенн и антенных систем.

Преимуществом использования ПО «GRASP» является простота создаваемых моделей антенн и антенных систем, которое доступно уже на ранних стадиях проектирования КА. Для создания модели антенной системы в виде параболоида вращения используются основные геометрические параметры: фокусное расстояние рефлектора, расстояние между основной осью рефлектора и осью параболы, основной диаметр рефлектора. На основании этих основных геометрических параметров системы и дополнительных геометрических и электрических характеристик непосредственно облучателя и рефлектора ПО «GRASP» формирует модель антенной системы. Особенностью ПО «GRASP» является возможность расчета напряженности электрического поля на заданной плоскости в ближней зоне излучения, с учетом суммарного излучения от облучателя и от рефлектора, а также с учетом отражения излучения от корпуса КА при соответствующем задании геометрических и электрических характеристик корпуса. Область проведения расчета поля определяется геометрическими размерами сетки. Причем, эта сетка может как совпадать с панелью корпуса КА, так и находиться в любой области пространства. То есть, расчетную сетку можно расположить в области размещения БА на внешней поверхности КА. На рисунке 3 показано размещение двух расчетных сеток, одна на антенной панели КА, другая на высоте 1 метр от астроплаты, в области размещения приборов СОС.

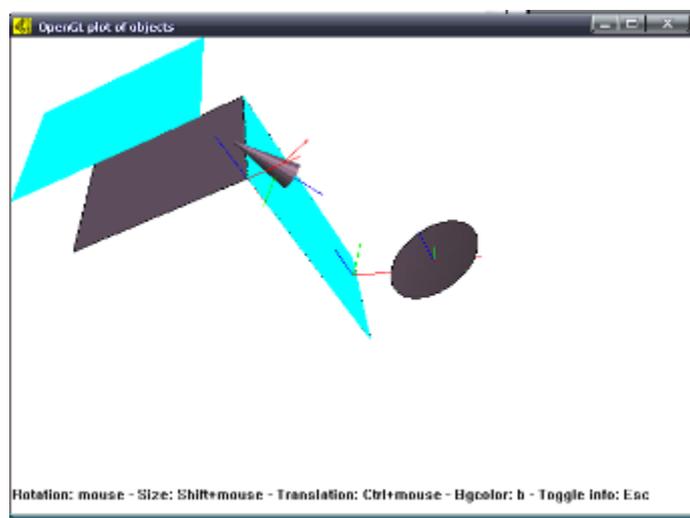


Рис.3. Расположение сеток расчета поля

Отметим, что возможности постпроцессора ПО «GRASP» позволяют только визуально увидеть распределение поля по расчетной сетке. Для определения поля в конкретной точке сетки, где располагается БА, разработано специализированное ПО «Viewer», позволяющее проводить курсорные измерения по поверхности сетки и находить поле в любой интересующей точке (рис.4).

Таким образом, использование ПО «GRASP» позволяет проводить оперативный расчет напряженности электрического поля в местах расположения БА, при незначитель-

ных временных затратах на создание моделей с учетом влияния конструкции КА на излучение.

Аналитические и моделирующие методы оценки напряженности электрического поля в местах расположения БА уточняются экспериментальными данными по напряженности поля. Необходимость использования экспериментальных данных обоснована в случае применения рекуррентных антенн КА и критичностью расположения БА относительно антенн.

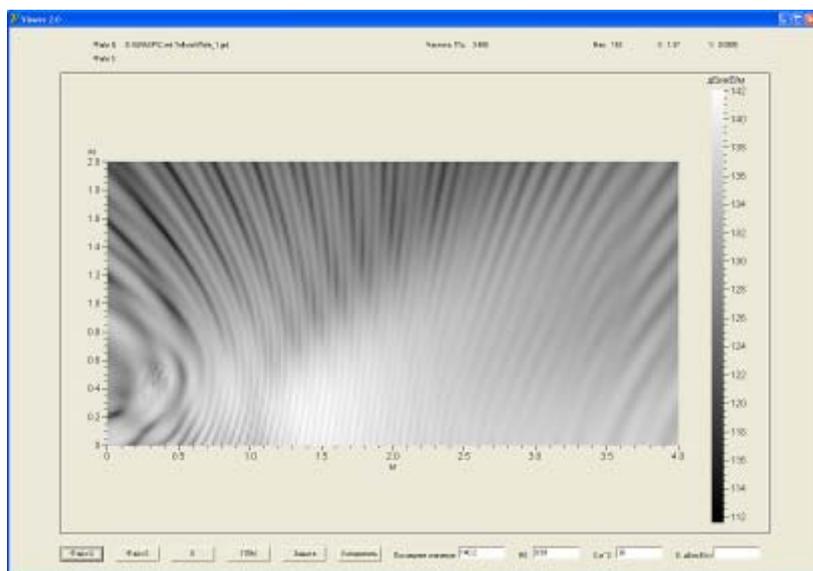


Рис. 4. Вид распределения напряженности поля по антенной панели в ПО «Viewer»

Для повышения точности расчетов влияния антенны бортовой аппаратуры командно-измерительного комплекса (БА КИС) на приборы СОС проведено экспериментальное определение напряженности электрического поля от антенны в области пространства характерное для установки приборов СОС. Измерения проводились при фиксированной подводимой к антенне мощности 5 Вт. Результаты измерения представлены на рисунках 5–6.

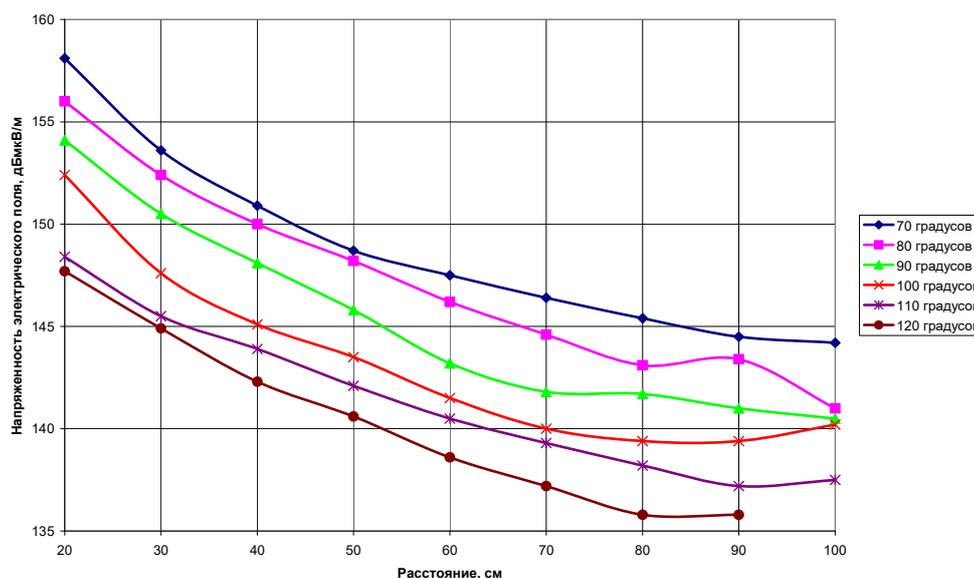


Рис. 5. Напряженность электрического поля, создаваемого антенной КИС в диапазоне углов 70–120 градусов

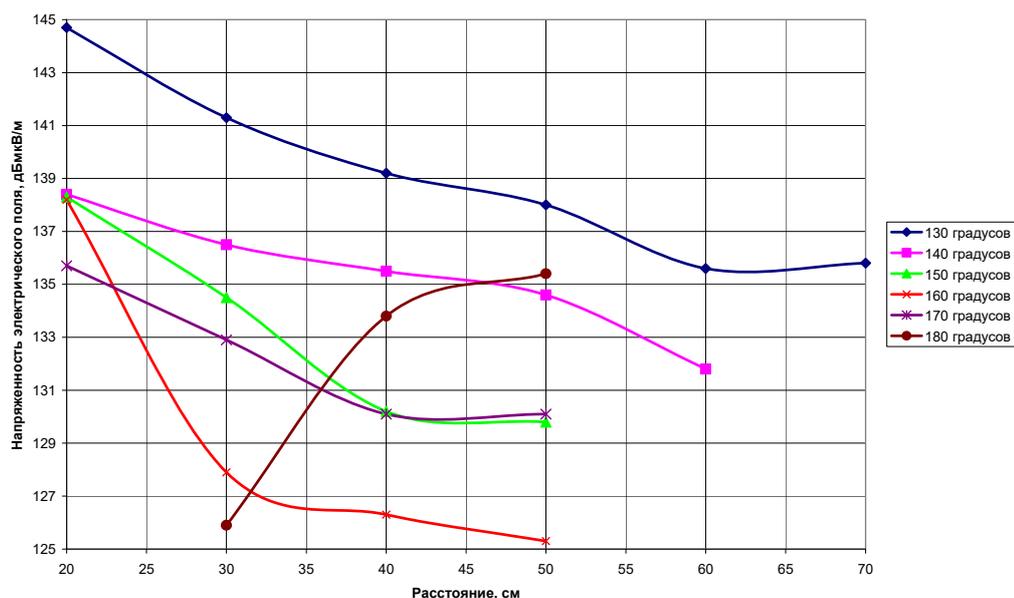


Рис. 6. Напряженность электрического поля, создаваемого антенной КИС в диапазоне углов 130–180 градусов

Используя полученные результаты как номограммы и корректируя полученные значения на подводимую к антенне КИС мощность, можно с высокой достоверностью определять напряженность поля в местах расположения приборов СОС.

Библиографические ссылки

1. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие для вузов / В. В. Никольский, Т. И. Никольская – 6-е изд. М.: ЛИБРОКОМ: URSS, 2017. 544 с.
2. Калашников Н. И. Системы связи через искусственные спутники земли. М.: Связь, 1969. 382 с.
3. Гольдштейн Л. Д. Электромагнитные поля и волны / Л. Д. Гольдштейн, Н. В. Зернов. – М.: Сов. радио, 1971. 664 с.
4. Paul A. Chatterton, Michael A. Houlden. Electromagnetic theory to practical design. USA: Hoboken (New Jersey): Wiley, 1992. 310 p.
5. Уилльямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. М.: Издательский дом «Технологии», 2003. 540 с.
6. 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.
7. 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.
8. Дональд Р.Ж. Уайт. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи : справ.-метод. пособие. Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. М.: Сов. радио, 1977. 348 с.

9. Дональд Р.Ж. Уайт. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи : справ.-метод. пособие. Вып. 2. Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения. М.: Сов. радио, 1978. 272 с.

© И. А. Максимов, С. Г. Кочура, В. Г. Сомов, А. В. Кузовников, О. В. Дианова, 2024

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ, ИСПЫТАНИЯХ И КОНТРОЛЕ ПРОИЗВОДИМОЙ ПРОДУКЦИИ

Г.М. Гринберг

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

В процессе изготовления ответственной продукции должно быть предусмотрено использование системы ее контроля и испытаний, измерения технических характеристик. В промышленности находит применение довольно много видов и методов измерения, контроля и испытаний, в основу которых положены различные физические явления. Список используемых видов и методов непрерывно пополняется. В статье рассмотрены сравнительно новые методы, основанные на регистрации параметров магнитного шума и регистрации результатов акустического воздействия. Статья носит обзорный характер. В ней дано описание областей применения и оборудования, созданного на основе этих методов.

Ключевые слова: испытания, контроль, измерения, акустико-топографический метод, метод эффекта Баркгаузена

Введение

В настоящее время практически нет ни одной сферы деятельности человека, где бы активно не использовались результаты измерений, испытаний и контроля. Особенно это касается производственной сферы и ее отраслей, связанных с изготовлением наукоемкой продукции, например, аэрокосмической. Сложность современной аэрокосмической техники, особые требования к обеспечению ее точности, безотказности работы, безопасности эксплуатации выдвигают на передний план задачи испытаний и контроля качества в процессе ее отладки и производства.

В производственной сфере состояние измерений, контроля и испытаний влияет на основные технико-экономические показатели деятельности предприятий: качество продукции, производительность труда, экономию материальных ресурсов, снижение себестоимости продукции, эффективность мероприятий по охране окружающей среды. Оснащение предприятий современными средствами и методами измерений, испытаний, контроля необходимо для поддержания оптимальных режимов технологических процессов, объективного контроля качества сырья, материалов, полупродуктов и готовой продукции [1].

Контроль качества на основе методов неразрушающего контроля

Контроль качества производимых изделий – чрезвычайно важная область диагностических исследований, в которых обычно выделяют разрушающий и неразрушающий контроль.

В аэрокосмической промышленности преимущественно используется неразрушающий контроль (НК), который органично входит в технологический процесс изготовления сложных технических систем. Неразрушающий контроль включается во все стадии производства, начиная с входного контроля материалов и полуфабрикатов и кончая монтажными операциями. Ни один прогрессивный технологический процесс получения от-

ветственной продукции не рекомендуется для внедрения в промышленность без соответствующей системы неразрушающего контроля [2].

Неразрушающий контроль – это наука о принципах, методах и средствах обнаружения и измерения дефектов, то есть наука, с помощью которой проверяется соблюдение стандартов качества материалов и полуфабрикатов, надежность деталей и безопасность работы машин и механизмов при эксплуатации. Термин «неразрушающие испытания» используется в качестве собирательного названия всех методов, позволяющих испытывать или контролировать материал изделия без ущерба для его последующего использования [3].

В основе НК лежат процессы взаимодействия различных физических полей и веществ с дефектом. Преимущество НК – возможность его применения по единой методике с однозначной оценкой результатов как при изготовлении и монтаже оборудования, так и при его ремонте и обследовании. С помощью НК можно выявить малейшие признаки ухудшения состояния узлов и деталей системы задолго до возможного разрушения [4].

Неразрушающие методы позволяют вести сплошной контроль. Важность перехода от выборочного контроля к сплошному возрастает с увеличением сложности контролируемого оборудования, например, аэрокосмического.

Из всех известных методов контроля качества наибольшими функциональными возможностями обладают физические методы НК. Поэтому в настоящее время физические методы НК — самая массовая технологическая операция контроля.

Согласно ГОСТ Р 56542-2015 методы НК классифицируются по следующим признакам:

- по характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;
- по первичному информативному параметру;
- по способу получения первичной информации.

Из широко используемых в настоящее время методов НК, классифицируемых по характеру взаимодействия различных физических полей с контролируемым объектом, далее будут рассмотрены следующие:

- магнитный метод НК, основанный на измерении и анализе результатов взаимодействия электромагнитного поля с контролируемым объектом;
- акустико-топографический метод НК, в основу которого положена регистрация результатов акустического воздействия на контролируемый объект.

Неразрушающий контроль на основе применения эффекта Баркгаузена

К числу различных физических информативных параметров, используемых в магнитном НК, относятся параметры шумов (скачков) Баркгаузена. Физический принцип, положенный в основу измерительного преобразования шумов Баркгаузена, находит широкое применение в магнитном НК и носит название «Метод эффекта Баркгаузена» [5].

Эффект Баркгаузена - это скачкообразное изменение намагниченности ферромагнитных материалов при непрерывном изменении внешнего магнитного поля. Подробное описание физики этого явления дали Овсеенко А.Н., Серебряков В.И. и Гаек М.М. в написанной ими монографии [6].

Одним из первых промышленных приборов для неразрушающего контроля с использованием эффекта Баркгаузена является измеритель шумов Баркгаузена ИБШ-2. Он предназначен для контроля изменения структуры и степени пластической деформации проволок и тонких прутков из ферромагнитных материалов. Этот измеритель позволяет также контролировать марку материала и изменение диаметра проволоки (прутка) [7].

Среди основных показателей качества механизмов является их надежность. Как правило, все разрушения деталей (износные, коррозионные, прочностные, контактные, усталостные) начинаются с поверхности. Качество поверхностного слоя вызывает интерес

ученых различных направлений: механиков, физиков, химиков, метрологов и технологов.

Экономическая целесообразность комплексного обеспечения качества деталей на всех стадиях их жизненного цикла обусловила необходимость аналогичного подхода и к их рабочим поверхностям. Рассмотрение качества поверхностного слоя деталей машин на всех стадиях жизненного цикла (проектирование, изготовление, контроль, испытание, диагностика, эксплуатация, ремонт, восстановление и утилизация) положило начало учению об инженерии поверхности, которое занимает в наше время одно из ведущих мест в технике [8].

Использование метода эффекта Баркгаузена (МЭБ) в инженерии поверхности имеет ряд преимуществ. Информативные параметры МЭБ обладают высокой чувствительностью к микро концентраторам напряжений и любым изменениям структуры ферромагнетика. Как правило, не требуется специальная подготовка поверхности, а аппаратурная реализация метода обеспечивает получение локальной информации, преимущественно, с поверхностных слоев ферромагнитного изделия [9-11].

Измерительные средства, построенные на использовании эффекта Баркгаузена

В любую разновидность контроля входят, в качестве составной части, технические экспериментальные операции, основанные на измерениях, целью которых является получение информации о параметрах отдельных экземпляров продукции и процессов.

Для получения необходимой информации в форме, удобной для дальнейшей передачи и обработки, используются различные средства измерений - измерительные преобразователи и измерительные приборы. В основе действия преобразователей и приборов используется то или иное физическое явление, в том числе все шире используется эффект Баркгаузена.

Так, например, в рамках исследований, проведенных группой под руководством Ломаева Г.В. был расширен диапазон практического использования эффекта Баркгаузена в различных областях измерений, контроля и автоматики. По результатам проведенных группой исследований был написан отчет, в котором представлены данные о разработанных датчиках для измерения перемещения, температуры и давления. Физической основой датчиков является бистабильный эффект в ферромагнетиках. В физике такой эффект называют большими скачками Баркгаузена [12].

Одним из основных параметров, контроль которых производится при оценке технического состояния конструкций, являются эксплуатационные механические напряжения в их элементах. Известные методы НК напряженного состояния в ряде случаев не могут быть использованы достаточно полно, либо их использование затруднено, экономически нецелесообразно или неэффективно.

Одними из перспективных неразрушающих методов измерения и контроля механических напряжений, дополняющих известные методы НК, являются электромагнитные методы, основанные на связи магнитных характеристик ферромагнитных материалов с механическими напряжениями, возникающих в них. Так, эффект Баркгаузена является чувствительным индикатором изменений структурного и напряженного состояний ферромагнетика и может быть использован для анализа изменения свойств изделий в процессе их эксплуатации, что показано в ряде работ [13, 14, 15 и др.].

В настоящее время промышленностью выпускается анализатор напряжений и структуры ферромагнитных материалов ИНТРОСКАН, в основу работы которого положено использование магнитошумового эффекта Баркгаузена [16]. Анализаторы используются для контроля внутренних механических напряжений, толщины упрочненного слоя, выявления шлифовальных прижогов, зон термического влияния и других физико-механических параметров ферромагнитных материалов и изделий при наличии корреляционной связи между шумами Баркгаузена и физико-механическими свойствами. Об-

ласть применения анализаторов — машиностроительная, авиационная, автомобильная, судостроительная и другие отрасли промышленности.

Применению магнитошумового эффекта Баркгаузена в измерениях, автоматике и контроле материалов посвящена диссертация Ломаева Г.В. [17]. В диссертации дано описание серии структуроскопов, реализующих метод эффекта Баркгаузена, типа СКИФ-1, СКИФ-100, БС-5; тахометров для измерения сверхнизких скоростей ТБ-1, ТБ-2, и ТБ-3; системы шлифования линз диаметром 6 м «ЗЕБРА».

Акустико-топографический метод неразрушающего контроля

Акустико-топографический метод (АТМ) основан на возбуждении в контролируемом объекте мощных упругих колебаний меняющейся частоты. При этом в контролируемом объекте возникают стоячие волны в виде узловых линий с характерным расположением узлов и пучностей.

Особый интерес представляет расположение узловых линий изгибных колебаний на пластинах и оболочках, поскольку такие элементы широко применяются в различных конструкциях. Это распределение можно сделать наглядным с помощью Хладни фигур и по их изменениям судить об изменениях свойств колеблющегося элемента, например о появлении трещины, чем пользуются в дефектоскопии [18].

Акустико-топографический метод, предложенный Ю. И. Китайгородским и Н. П. Бирюковой, сочетает особенности интегрального и локального методов вынужденных колебаний. С одной стороны, он использует колебания объекта контроля (ОК) как единого целого, с другой, — собственные частоты отделенных дефектами участков. При этом визуализируются контуры дефектов и определяются их координаты [19].

Индикатором служит тонкодисперсный порошок (ликоподий). К изделию прижимают излучатель упругих колебаний изменяющейся частоты. При совпадении излучаемой частоты с собственной частотой отделенного дефектом участка амплитуда колебаний последнего резко возрастает и частицы порошка смещаются в зоны с меньшими амплитудами, группируясь вокруг дефекта и образуя видимое его изображение. Порошок удерживается на наклонных поверхностях, поэтому возможен контроль изделий с криволинейными поверхностями [20].

Применяется АТМ для обнаружения поверхностных и внутренних дефектов (нарушений сплошности, неоднородности структуры, межкристаллитной коррозии и т. д.). Но основное применение АТМ — дефектоскопия широкой номенклатуры многослойных конструкций независимо от способа соединения слоев материала между собой (пайка, диффузионная сварка, термодиффузионное сцепление, склеивание, гальванопокрытие, напыление, нанесение пленок и т.д.) что определяет возможность использования его в различных отраслях промышленности. В ряде случаев АТМ имеет преимущества перед другими методами контроля. «Экспериментальными исследованиями установлено, что при контроле акустико-топографическим методом паяных и сварных конструкций чувствительность контроля существенно (в 2–3 раза) выше, чем при контроле другими методами дефектоскопии» [21].

Акустико-топографический метод контроля многослойных соединений **находит применение во многих отраслях промышленности, в том числе и в ракетостроении.** Метод реализован в установке «Титан» [22].

Заключение

Успешное развитие и внедрение в производство новейших технологий и уникального оборудования невозможно без надлежащего совершенствования средств и методов контроля и технической диагностики. Применение классических методов не во всех случаях эффективно. Часть новых задач не поддается решению используемыми методами контроля. Из существующего множества физических явлений и эффектов, видов преобразования свойств вещества и энергии, которые можно использовать для создания новых методов контроля, на практике используется около 30.

В ряду направлений развития современных методов контроля существенное место занимает разработка новых, основанных на еще не применяемых физических явлениях и эффектах. После разработки необходимой методической базы новые методы допускаются к использованию для контроля качества производимых изделий. Например, после формирования Ломаевым Г.В. необходимой методической базы метод эффекта Баркгаузена был включен в ГОСТ 18353-79 «Неразрушающий контроль. Виды и методы» как новый вид магнитного метода контроля.

В статье приведено описание таких, сравнительно новых, методов неразрушающего контроля, как **акустико-топографический и метод эффекта Баркгаузена**. Показаны особенности и области их применения, приведены примеры практического использования.

Благодарности

Проект реализуется победителем грантового конкурса для преподавателей магистратуры 2021/2022 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

Библиографические ссылки

1. Горбунова, Т.С. Измерения, испытания и контроль. Методы и средства : учебное пособие / Т.С. Горбунова ; Министерство образования и науки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». – Казань : Казанский научно-исследовательский технологический университет (КНИТУ), 2012. – 108 с.

2. Гринберг Г.М. Неразрушающий контроль изделий методом эффекта Баркгаузена / Решетневские чтения : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева: в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2020. – Ч. 1. С. 266-267.

3. Костин В. Н. Магнитные методы структуроскопии и дефектоскопии ферромагнитных изделий Учебное электронное текстовое издание. В.Н. Костин. – Екатеринбург: Издательство ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ2007. -95 с.

4. Контроль и испытания при изготовлении оборудования [Электронный ресурс] / URL: <https://all4study.ru/proizvodstvo/kontrol-i-ispytaniya-pri-izgotovlenii-oborudovaniya-2.html> (дата обращения 30.01.2024 г.).

5. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. [Электронный ресурс] / URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200123257> (дата обращения 17.01.2024 г.).

6. Овсеенко А.Н., Серебряков В.И., Гаек М.М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения. Монография – М.: «Янус-К», 2003. – 296 с.

7. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х книгах. Кн.2 / Под ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. 352 с.

8. Инженерия поверхности деталей : учебное пособие / А. Г. Суслов, В. Ф. Безъязычный, Ю. В. Панфилов, С. Г. Бишутин ; под редакцией А. Г. Суслова. — Москва : Машиностроение, 2008. — 320 с.

9. Рудяк. В.М. Эффект Баркгаузена / Успехи физических наук, 1970, т. 101, вып. 3. – С. 54–93.

10. Венгринович В.Л. Магнитошумовая структуроскопия. – Мн.: Навука и тэхніка, 1991. – 285 с.

11. Венгринович В.Л., Бусько В.Н. Особенности контроля методом эффекта Баркгаузена параметров поверхностных слоев, упрочненных поверхностной пластической деформацией // Дефектоскопия, 1988, №10. – С. 56–61.

12. Ломаев, Г.В. Отчет о научно-исследовательской работе по теме: Теоретическая оценка возможности регистрации давлений, перемещений и температур в объекте контроля беспроводным способом с использованием бистабильных ферромагнетиков. [Электронный ресурс] / URL: <https://lektsia.com/2xc0d1.html> (дата обращения 27.09.2020 г.).

13. Мерлетти Луиджи, Мерчак Лукаш, Джилз Дэвид К., Фантони Габриэле Система и способ для определения механического напряжения компонента, изготовленного из намагничиваемого материала [Электронный ресурс] / URL: <https://findpatent.ru/patent/257/2573118.html> (дата обращения 30.01.2023 г.)

14. Буданова, О. А. Измерение двухосных напряжений в стальных изделиях методом эффекта Баркгаузена / О. А. Буданова // Новые направления развития приборостроения : материалы 10-й международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Минск, 26–28 апреля 2017 г. : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – Т. 1. - С. 38.

15. Бусько, В. Н. К вопросу о контроле лазерно-упрочненных слоев методом эффекта Баркгаузена / В. Н. Бусько, В. Л. Венгринович, А. В. Макаров // Инженерия поверхностного слоя деталей машин : сборник материалов II Международной научно-практической конференции, 27-28 мая 2010 г. : посвященной 85-летию со дня рождения академика О.В. Романа, 55-летию кафедры "Порошковая металлургия, сварка и технология материалов" БНТУ / ред. колл.: Б. М. Хрусталева, Ф. И. Пантелеенко, В. Ю. Блюменштейн. – Минск : БНТУ, 2010. – С. 243 - 245.

16. ИНТРОСКАН. Компьютеризированный анализатор напряжений и структуры ферромагнитных материалов на основе использования магнитошумового эффекта Баркгаузена [Электронный ресурс] / URL: <http://www.rkk.ru/products/nc/introscan.shtml> (дата обращения 10.01.2024 г.)

17. Ломаев, Г.В. Исследование метода эффекта Баркгаузена и его применение в измерениях, автоматике и контроле материалов и окружающей среды : диссертация ... доктора технических наук : 05.11.13.- Ижевск, 1998.- 385 с.: ил.

18. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И. П. Голямина. — М.: «Советская энциклопедия», 1979. — 400 с.,

19. Неразрушающий контроль; Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. - М.: Машиностроение, 2004. - 864 с.

20. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., испр. и доп. - М.: Машиностроение, 2005. 656 с.

21. Мурашов В. В. Выявление непрочклев и расслоений в многослойных конструкциях акустико-топографическим методом / журнал «Контроль. Диагностика», № 5 (май) 2020. - с. 20-27.

22. Абрамов, И. П. Ракетно-космическая техника : учебное пособие / И. П. Абрамов, И. В. Алдашкин, Э. В. Алексеев ; под редакцией В. П. Легостаева. — Москва : Машиностроение, [б. г.]. — Книга 2 — 2014. — 548 с. — ISBN 978-5-94275-621-5. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/63259> (Дата обращения: 14.01.2024).

© Гринберг Г.М., 2024

$$\lambda_{y_{\max 2}} = 0,5 \cdot 7,6 \cdot (3,39075 + 0,01233 + 4,37715 + 0,106175 + 1,06175 + 7,7405 + 0,015413 + 0,017125 + 2,74 + 0,822) \cdot 10^{-6} = 77,07613 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

В предположении экспоненциального закона распределения отказов найдены значения других показателей надежности:

- наработка на отказ и среднее время безотказной работы устройства [2]:

$$T_{0\max 2} = \frac{1}{\lambda_{y_{\max 2}}} = \frac{1}{77,07613 \cdot 10^{-6}} = 12974,19 \text{ ч}$$

- вероятность безотказной работы при $t_3=10000$ ч:

$$P_{\max 2}(t_3) = e^{\frac{-t_3}{T_{0\max 2}}} = e^{\frac{-10000}{12974,19}} = e^{-0,770761} = 0,462661$$

- гамма-процентная наработка на отказ при $\gamma=95\%$:

$$T_{\gamma\max 2} = -T_{0\max 2} \cdot \ln\left(\frac{\gamma}{100}\right) = -12974,19 \cdot \ln(0,95) = 665,4887 \text{ ч}$$

- максимальная вероятность безотказной работы с учетом более надежных элементов:

$$P_{\max 2}(t) = e^{-\lambda_{y_{\max 2}} \cdot t} = e^{-77,07613 \cdot 10^{-6} \cdot t}$$

Графики $P_{\max}(t)$ и $P_{\max 2}(t)$ представлены на рисунке 2:

$$\lambda_{\max 2} := 77,07613 \cdot 10^{-6} \qquad P_{\max 2}(t) := e^{-\lambda_{\max 2} \cdot t} \qquad T_{\gamma\max 2} := 665,4887$$

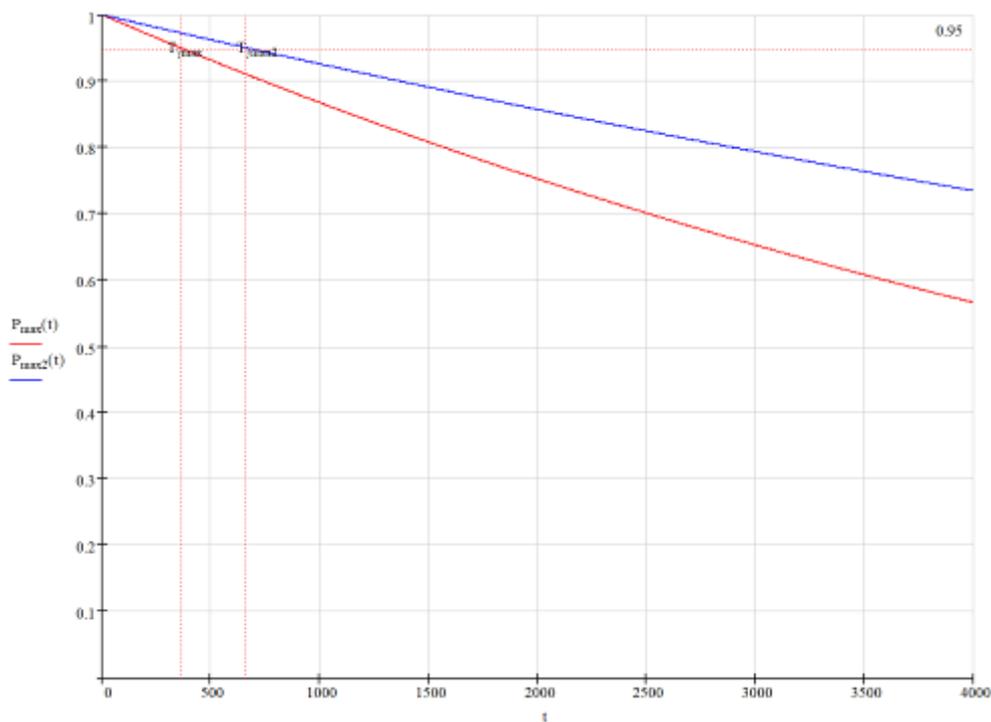


Рис. 2. Графики максимальной вероятности безотказной работы при исходных элементах и при более надежных

В результате $T_{0.95}$ увеличилась в $665,4887/360,5063=1,846$ раза, что удовлетворяет условиям задания. Это увеличение подтверждается графиками.

Вторым способом увеличения надежности является резервирование [3]. Воспользуемся методом общего резервирования замещением с целой кратностью (рисунок 3). Это означает, что дублироваться будет все устройство целиком и что дублирующий узел будет работать только после отказа основного.

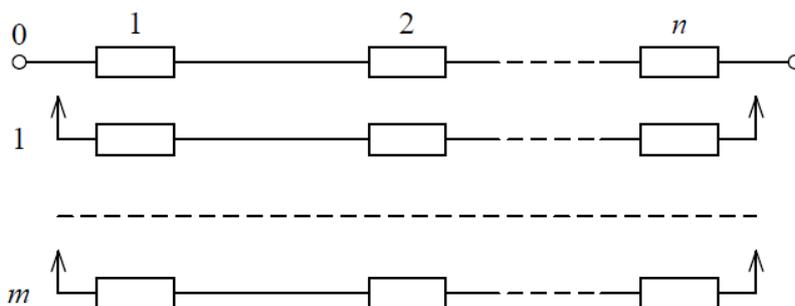


Рисунок 3. Общее резервирование замещением с целой кратностью

Будем считать, что все элементы работают в периоде нормальной эксплуатации.

Общая эксплуатационная интенсивность отказов устройства, где учтена надежность переключающего устройства с λ , равной $0,5 \cdot 10^{-6}$ определяется выражением:

$$\begin{aligned} \lambda_{y_{maxn1}} &= 0,5 \cdot 7,6 \cdot (3,39075 + 0,01233 + 10,54215 + 0,106175 + 1,06175 + 11,61075 \\ &\quad + 0,015413 + 0,017125 + 9,864 + 0,822 + 0,5) \cdot 10^{-6} \\ &= 144,1813 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1} \end{aligned}$$

Вероятность безотказной работы для системы с таким резервированием определяется по формуле [3]:

$$P_{r1}(t) = e^{-\lambda_0 t} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$$

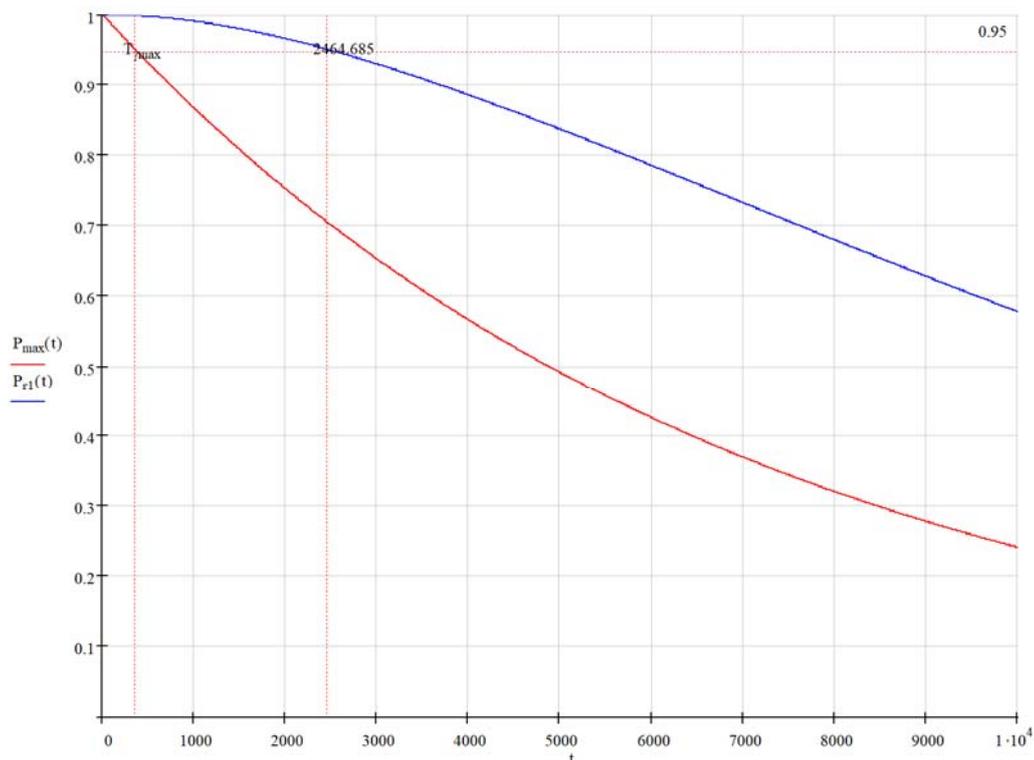
При кратности резервирования, равной 1, получим:

$$P_{r1}(t) = e^{-\lambda_0 t} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} = e^{-144,1813 \cdot 10^{-6} \cdot t} \cdot (1 + 144,1813 \cdot 10^{-6} \cdot t)$$

Графики $P_{max}(t)$ и $P_{r1}(t)$ и гамма-процентной наработки для резервированного устройства, определенные по следующим выражениям, представлены на рисунке 4:

$$P_{r1}(t) := e^{-144,1813 \cdot 10^{-6} \cdot t} \cdot (1 + 144,1813 \cdot 10^{-6} \cdot t)$$

$$P_{r1}(t) - 0.95 \text{ solve, } t \rightarrow \begin{pmatrix} -1990.8842485876611208 \\ 2464.6851616587036753 \end{pmatrix} \quad P_{r1}(10000) = 0.577$$



Ри. 4. Вероятность безотказной работы с общим резервированием и без него

По графикам видно, что T_γ увеличилась в $2464,685/360,5063=6,837$ раза, что удовлетворяет условиям задания.

Схема отдельного резервирования, при котором резервируется не все устройство, а только его часть представлена на рисунке 5.

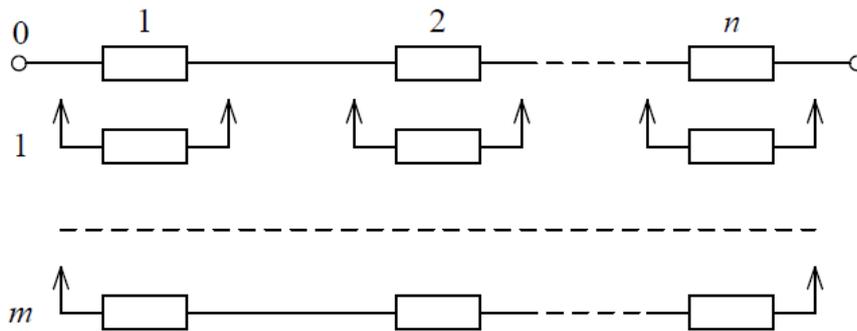


Рисунок 5. Раздельное резервирование замещением с целой кратностью

Поскольку наибольшей интенсивностью отказов в устройстве обладают конденсаторы, транзисторы и диоды, для раздельного резервирования найдем в схеме участок с наибольшим количеством этих элементов и резервируем его.

Для нахождения вероятности безотказной работы при раздельном резервировании можно воспользоваться формулой для общего резервирования, применив ее к двум резервированным участкам [4]. А соединение этого дублированного участка схемы с остальной ее частью при этом считать последовательным. Отсюда при резервировании с кратностью 1 получим значения поправочных коэффициентов (табл. 1) на основе следующих формул.

Таблица 1

Таблица поправочных коэффициентов для $\max \lambda_i$

| Элементы | Кол-во | K_n | $\lambda_i \cdot 10^{-6}$ | $K_1 \cdot K_2$ | K_3 | K_4 | $\lambda_{r1} \cdot 10^{-6}$ |
|--------------------------------------------------------|--------|-------|---------------------------|-----------------|-------|-------|------------------------------|
| Резистор проволочный | 6 | 0,5 | 0,165 | 1,37 | 2,5 | 1 | 3,39075 |
| Терморезистор | 1 | 0,5 | 0,0036 | 1,37 | 2,5 | 1 | 0,01233 |
| Конденсатор электрический | 6 | 0,5 | 0,513 | 1,37 | 2,5 | 1 | 10,54215 |
| Дроссель с ферромагнитным магнитопроводом | 1 | 0,5 | 0,031 | 1,37 | 2,5 | 1 | 0,106175 |
| Трансформатор с магнитодиэлектрическим магнитопроводом | 1 | 0,5 | 0,31 | 1,37 | 2,5 | 1 | 1,06175 |
| Диод германиевый | 5 | 0,5 | 0,678 | 1,37 | 2,5 | 1 | 11,61075 |
| Стабилитрон | 1 | 0,5 | 0,0045 | 1,37 | 2,5 | 1 | 0,015413 |
| Динистор | 1 | 0,5 | 0,005 | 1,37 | 2,5 | 1 | 0,017125 |
| Транзистор кремниевый | 2 | 0,5 | 1,44 | 1,37 | 2,5 | 1 | 9,864 |
| Соединения паяные | 48 | 0,5 | 0,005 | 1,37 | 2,5 | 1 | 0,822 |

$$\lambda_{y_{\max r21}} = 0,5 \cdot 7,6 \cdot (1,695375 + 7,0281 + 0,106175 + 2,32215 + 0,015413 + 9,864 + 0,44525 + 0,5 \cdot 3) \cdot 10^{-6} = 87,310559 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

$$P_{r21}(t) = e^{-\lambda_0 t} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} = e^{-87,310559 \cdot 10^{-6} \cdot t} \cdot (1 + 87,310559 \cdot 10^{-6} \cdot t)$$

$$\lambda_{\gamma_{\max r22}} = 0,5 \cdot 7,6 \cdot (1,695375 + 0,01233 + 3,51405 + 1,06175 + 9,2886 + 0,017125 + 0,37675) \cdot 10^{-6} = 60,670724 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

$$P_{r22}(t) = e^{-\lambda_{\gamma} t} = e^{-60,670724 \cdot 10^{-6} \cdot t}$$

Найдем вероятность безотказной работы всей системы в целом:

$$P_{r2}(t) = P_{r21}(t) \cdot P_{r22}(t) = e^{-147,981283 \cdot 10^{-6} \cdot t} \cdot (1 + 87,310559 \cdot 10^{-6} \cdot t)$$

Построим графики $P_{\max}(t)$ и $P_{r2}(t)$ и определим гамма-процентную наработку для резервированного устройства:

$$P_{r2}(t) := e^{-147,981283 \cdot 10^{-6} \cdot t} \cdot (1 + 87,310559 \cdot 10^{-6} \cdot t)$$

$$P_{r2}(t) = 0.95 \text{ solve, } t \rightarrow \begin{pmatrix} -8238.1299085092010252 \\ 806.40537679821562682 \end{pmatrix} \quad P_{r2}(10000) = 0.426$$

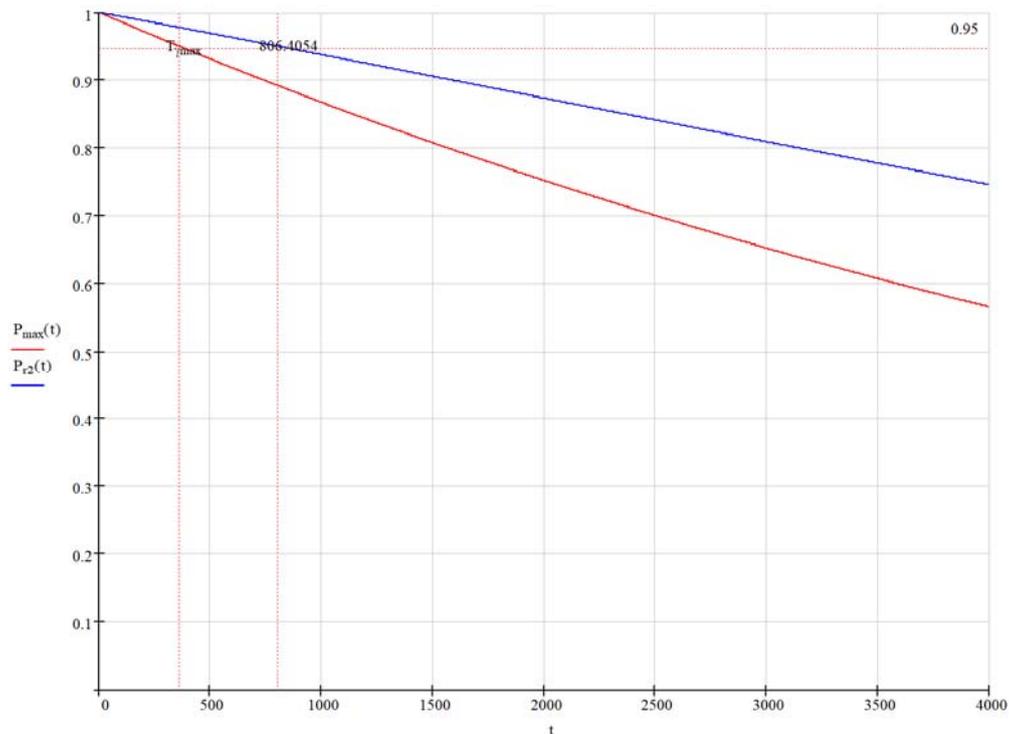


Рисунок 6. Вероятность безотказной работы с раздельным резервированием и без него

По графику видно, что T_{γ} увеличилась в $806,4054/360,5063=2,237$ раза, что удовлетворяет условиям задания.

Для повышения уровня надежности при недостаточно надежных элементах лучше использовать общее резервирование.

С помощью использования более надежных и устойчивых к отказам элементов удалось улучшить процентную наработку на отказ $T_{\gamma_{\max}}$ в 1,846 раза, что составило

665,4887 часа. При общем резервировании процентная наработка на отказ увеличилась в 6,837 раза и составила 2464,685 часа. При отдельном резервировании процентная наработка на отказ увеличилась в 2,237 раза и составила 806,4054 часа. Наибольшее значение гамма-процентной наработки получилось при общем резервировании устройства.

Библиографический список

1. Расчет надежности функциональных элементов систем управления: Методические указания к выполнению курсовой работы для студентов специальностей 24.05.06 «Системы управления летательными аппаратами» и 24.04.02 «Системы управления движением и навигация» / сост. Т. Г. Орешенко, Е. В. Пащенко; Сиб. гос. ун-т. науки и технологий – Красноярск, 2019. – 54 с.
2. Надежность электронных устройств и элементов автоматики: учебное пособие / М.В. Лукьяненко, Н.П. Чурляева, Т.В. Ткачева; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2006. – 94 с.
3. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах. Учеб. пособие для студентов радиотехнических специальностей вузов. Под ред. Г.В. Дружинина. – М.: «Энергия», 1976. – 448 с.
4. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учеб.-метод. пособие / С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян; под ред. С.М. Боровикова. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.: ил.

© Харлашина С. В., Гуцин И.О., 2024

УДК 621.382

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА КАК ПУТЬ
ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ
БАЗЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

С.М. Голованов^{1,2}, В.И. Орлов^{1,2}, В.В. Федосов^{1,2}

¹ АО «Испытательный технический центр - НПО ПМ»
Российская Федерация, 662970, г. Железногорск, ул. Молодежная, 20

² Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнёва

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский ра-
бочий», 31

e-mail: itcnpopm@atomlink.ru

В докладе изложен подход к практическому использованию методов кластерного анализа при проведении испытаний электронной компонентной базы космического применения в испытательных технических центрах, позволяющий повысить качество и надежность поставляемой продукции.

Ключевые слова: электронная компонентная база, космическое применение, испытательный технический центр, методы кластерного анализа.

Введение

Современный космический аппарат – это сложное электротехническое устройство, содержащее порядка 100-200 тысяч первичных электронных компонентов. С учетом того, что для бортовой аппаратуры космического аппарата в процессе его длительной эксплуатации (до 10-15 лет и более) проведение оперативного ремонта невозможно, к электронной компонентной базе (ЭКБ) космического применения предъявляются исключительно высокие требования по надежности [1-2]. В современных условиях в РФ комплектация космических аппаратов высоконадежными электронными компонентами возможно только через специализированные испытательные технические центры (ИТЦ), которые выступают в качестве связующего звена между заводами-изготовителями электронных компонентов и их потребителями в космической отрасли [3-4]. Учитывая отсутствие в нашей стране специализированного производства ЭКБ категории качества «Sрасе», такой подход для отечественной космонавтики является единственно возможным. ИТЦ осуществляют формирование ЭКБ космического применения посредством проведения дополнительных испытаний (ДИ) электронных компонентов максимально доступного качества, позволяющих осуществить отбраковку элементов, содержащих скрытые дефекты, которые могут проявить себя при длительном функционировании в космическом пространстве [5-6].

В связи с этим, повышение эффективности ДИ имеет наиважнейшее значение для создания надежной отечественной космической техники. Как показывают исследования

[7-9], повышение эффективности ДИ можно достичь на базе применения современных методов обработки информации, в частности, методов кластерного анализа.

Применение методов кластерного анализа в процессе ДИ

Кластерный анализ или автоматическая группировка (АГ) данных - метод, выделяющий однородные подмножества таким образом, чтобы в многомерном пространстве характеристик входящие в их состав объекты имели значительное сходство, а сами подмножества обладали между собой существенными различиями. Ниже приведены задачи, решаемые в процессе ДИ с применением методов кластерного анализа.

1. Автоматическая группировка электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям.

Составная часть ДИ – выборочные разрушающие испытания, проводимые для оценки качества изготовления элементов испытываемой партии ЭКБ. Называются эти испытания так потому, что приводят к полному или частичному разрушению испытываемых элементов. В связи с чем, разрушающие испытания проводятся на специально сформированных тестовых выборках (ТВ) с дальнейшим распространением результатов испытаний на всю испытываемую партию. Такой подход справедлив только в том случае, если все множество испытываемых элементов принадлежит одной производственной партии: все элементы изготовлены из одного сырья, на одном технологическом оборудовании в одно время. Такое требование к поставляемой партии электронных компонентов предъявляется в обязательном порядке. К сожалению, как показывает практика, в реальности, в силу определенных объективных и субъективных причин, это условие выполняется далеко не всегда. В связи с чем, алгоритм автономной и независимой группировки электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям является важным и необходимым инструментом ДИ ЭКБ космического применения.

Специалистами АО «ИТЦ – НПО ПМ» разработан алгоритм АГ, решающий эту задачу. Кратко изложим основную идею его работы. Пусть задана партия электронных компонентов P , состоящая из N_p элементов \mathbf{e}_i ($i=\overline{1, N_p}$): $P=\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_{N_p}\}$. Свойства элементов $\mathbf{e}_i \in P$ ($i=\overline{1, N_p}$) определяются значениями вектора характеристик $(\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \dots, \mathbf{t}_{N_t})$, определяющего свойства ЭКБ заданного типа: $\mathbf{T}_i=(\mathbf{t}_{i1}, \mathbf{t}_{i2}, \dots, \mathbf{t}_{iN_t})$, где \mathbf{t}_{ij} - измеренное в процессе ДИ значение j -го тестового параметра (ТП) \mathbf{t}_j ($j=\overline{1, N_t}$).

В общем виде, параметры \mathbf{t}_j ($j=\overline{1, N_t}$) имеют разную физическую природу и диапазоны изменений. Как правило, в качестве \mathbf{t}_j выступают такие физические величины, как силы тока (амперы), напряжения (вольты) и коэффициенты усиления (децибелы). Поскольку используемые алгоритмы АГ основаны на измерении расстояний между векторами характеристик элементов \mathbf{e}_i ($i=\overline{1, N_p}$), то для корректной работы алгоритмов АГ осуществляется предварительное преобразование (нормирование) векторов \mathbf{T}_i , т.е. приведение их к безразмерному и соразмерному виду: $\mathbf{T}_i^n=(\mathbf{t}_{i1}^n, \mathbf{t}_{i2}^n, \dots, \mathbf{t}_{iN_t}^n)$ ($i=\overline{1, N_p}$), где величины \mathbf{t}_{ij}^n ($j=\overline{1, N_t}$) определяются соотношением:

$$\mathbf{t}_{ij}^n = \frac{\mathbf{t}_{ij} - \mathbf{t}_j^{av}}{\mathbf{a}_j^n}, \quad (1)$$

где \mathbf{t}_j^{av} - среднее значение величин $\{\mathbf{t}_{ij} \ (i=\overline{1, N_p})\}$, определяемое по формуле:

$$\mathbf{t}_j^{av} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \mathbf{t}_{ij}}{N_p} \quad (2)$$

d_j^n – диапазон нормирования j -го ТП:

$$d_j^n = \max(3 \cdot d_j^{st}, d_j^{sp}), \quad (3)$$

где d_j^{st} – стандартное (среднеквадратическое) отклонение:

$$d_j^{st} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (t_{ij}^n - \bar{t}_j^n)^2}{N_p - 1}} \quad (4)$$

d_j^{sp} - диапазон значимых отличий j -го ТП, означающий, фактически, погрешность его измерения.

Таким образом, каждому элементу e_i ($i = \overline{1, N_p}$) партии электронных компонентов P соответствует нормированный вектор измеренных характеристик T_i^n определяющий свойства элемента, а точка e_i^p с координатами $(t_{i1}^n, t_{i2}^n, \dots, t_{iN_p}^n)$ называется «образом» элемента e_i ($i = \overline{1, N_p}$) в N_p -мерном пространстве характеристик ЭКБ.

Идея АГ партий ЭКБ базируется на следующем свойстве: «образы» электронных компонентов, принадлежащие разным производственным партиям, в пространстве характеристик (ТП), измеренных в процессе ДИ, образуют обособленные группы, удовлетворяющие определенному уровню качества кластеризации.

Для иллюстрации этого утверждения на Рисунках 1 и 2 приведены результаты измерения ТП элементов партии ЭКБ, все элементы которой принадлежат одной производственной партии (рис. 1) и сводной партии ЭКБ, состоящей из элементов, принадлежащих двум производственным партиям (рис. 2).

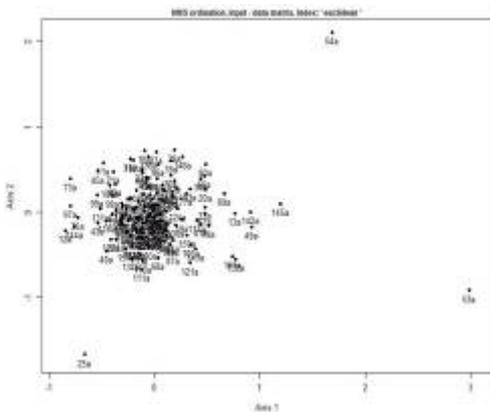


Рис. 1. Результаты измерения 134-х ТП партии ЭКБ: 564ЛА7В (КП-70) -153шт. 97шт.

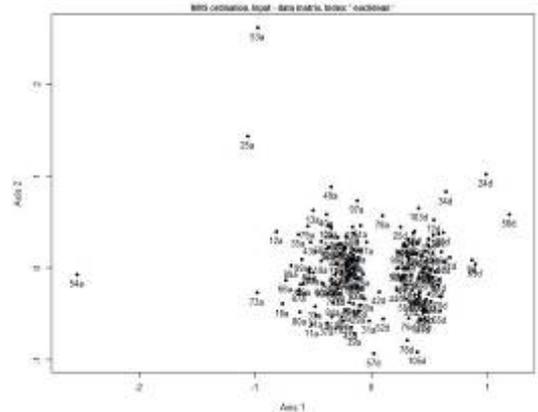


Рис. 2. Результаты измерения 9-и ТП партий ЭКБ: 140УД25А (КП-895) – + 140УД25А (КП-30) – 77шт.

На рисунках 1, 2 применены обозначения: 564ЛА7В, 140УД25А – тип ЭКБ: логическая микросхема и операционный усилитель, соответственно; КП – код партии. Рисунки построены с применением метода многомерного шкалирования, позволяющего отображать «образы» электронных компонентов в точки двумерного пространства рисунков.

Для решения задачи АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям специалистами АО «ИТЦ – НПО ПМ» разработан метод поиска условно оптимального варианта АГ, обеспечивающего заданное качество кластеризации. Решение этой задачи обеспечивается введением специальных характеристик: вектора показателей качества разделения на группы $V_{гг}$, объединяющего отдельные не противоречащие друг другу показатели качества кластеризации и области

качественного деления $S_{qд}$, таким образом, что выполнение условия (5) является признаком качества кластеризации.

$$V_{qд} \in S_{qд} \quad (5)$$

Таким образом, с применением характеристик $V_{qд}$ и $S_{qд}$ поставленная задача решается классическими алгоритмами кластеризации с введением дополнительного ограничения: в поиске оптимального варианта кластеризации участвуют только те варианты разделения на группы, для которых выполняется условие (5). При этом, работа алгоритма АГ, обеспечивающего заданное качество кластеризации, завершается одним из двух результатов:

а) Вариант кластеризации не найден. Это означает, что исследуемая партия ЭКБ – однородна, т.е. все ее элементы принадлежат одной производственной партии.

б) Вариант кластеризации найден. Это означает, что этот вариант кластеризации соответствует делению партии ЭКБ в группы, принадлежащие разным производственным партиям.

При данном подходе, очевидно, что основная тяжесть решения задачи АГ ложится на определение характеристик $V_{qд}$ и $S_{qд}$. Рассмотрим подробнее этот вопрос. Пусть партия P , состоящая из N_p элементов e_i ($i=\overline{1, N_p}$) ЭКБ заданного типа, поделена на группы

$$G_p = \{G_k (k=\overline{1, N_g}) : \bigcup_{k=1}^{N_g} G_k = P; \bigcap_{k=1}^{N_g} G_k = \emptyset\},$$

где каждая группа G_k ($k=\overline{1, N_g}$) содержит n_k элементов: $G_k = \{e_{k1}, e_{k1}, \dots, e_{kn_k}\}$ ($\sum_{k=1}^{N_g} n_k = N_p$). Для каждой группы G_k ($k=\overline{1, N_g}$) определяется виртуальный элемент c_k , называемый «центром» группы, «образ» которого – точка с координатами $(c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kn_k})$ в пространстве характеристик определяется соотношением:

$$c_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} e_{ij}}{n_k} \quad (6)$$

В выражении (6): e_{ij} – j -я координата «образа» элемента $e_{ki} \in G_k$ ($i=\overline{1, n_k}$).

а) Задание вектора показателей качества кластеризации $V_{qд}$.

Основываясь на экспериментальных исследованиях для АГ элементов партий ЭКБ целесообразно использовать $V_{qд}$ следующего вида:

$$V_{qд} = (Pr_{min}^{st}, Pr_{sd}, KS, k_{sep1}, k_{sep2}) \quad (7)$$

В выражении (7):

- Pr_{min}^{st} – признак наличия минимального заданного количества N_{min}^{stg} элементов в каждой группе G_k ($k=\overline{1, N_g}$): $Pr_{min}^{st} = 1$, если для каждой группы G_k выполняется условие (8) и $Pr_{min}^{st} = 0$, если условие (8) не выполняется.

$$n_k \geq N_{min}^{stg} \quad (8)$$

- Pr_{sd} – признак наличия значимых отличий между любыми двумя группами G_k и G_m ($k, m=\overline{1, N_g}; k \neq m$): $Pr_{sd} = 1$, если для любых двух групп G_k и G_m существует характеристика t_j ($j=\overline{1, N_g}$), для которой выполняется условие (9) и $Pr_{sd} = 0$, если такой характеристики нет.

$$|c_{kj} - c_{mj}| > d_j^{st} / d_j^m \quad (9)$$

В выражении (9): c_{kj}, c_{mj} - значения j -й координаты «образов» центров групп G_k и G_m .

- KS – широко применяемый в теории кластерного анализа критерий «Силуэт», определяемый соотношением (10):

$$KS = \frac{1}{N_p} \cdot \left(\sum_{i=1}^{i=N_p} \left(1 - \frac{a_i}{b_i} \right) \right) \quad (10)$$

В выражении (10): a_i – расстояние от «образа» элемента e_i до «образа» центра группы, которой он принадлежит, b_i – расстояние от «образа» элемента e_i до «образа» ближайшего центра группы, которой он не принадлежит.

- k_{sep1}, k_{sep2} – коэффициенты сепарации, определяемые соотношениями (11), (12):

$$k_{sep1} = \min_{k,m=1, \dots, N_g, k \neq m} \{k_{sep1}^{km}\} \quad (11)$$

$$k_{sep2} = \min_{k,m=1, \dots, N_g, k \neq m} \{k_{sep2}^{km}\} \quad (12)$$

В выражениях (11), (12): $k_{sep1}^{km}, k_{sep2}^{km}$ – парные коэффициенты сепарации групп G_k и G_m , определяемые по формулам (13), (14):

$$k_{sep1}^{km} = D_{km}^{sep} / R_k^{sep} \quad (13)$$

$$k_{sep2}^{km} = D_{km}^{sep} / L_k^{min.av} \quad (14)$$

В выражениях (13), (14): D_{km}^{sep} - диапазон разделения групп G_k и G_m ; R_k^{sep} - радиус группы G_k по линии, соединяющей центры групп C_k и C_m (рис. 3); $L_k^{min.av}$ – среднее значение расстояний между «образами» элементов группы G_k .

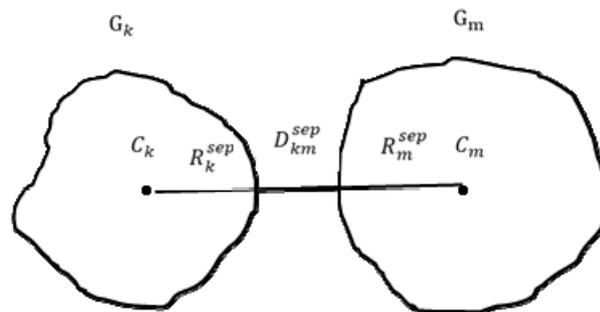


Рис. 3. Графическое изображение параметров $D_{km}^{sep}, R_k^{sep}, R_m^{sep}$ для групп C_k и C_m

Параметры $D_{km}^{sep}, R_k^{sep}, R_m^{sep}$ определяются на базе проекций векторов нормированных характеристик элементов $e_i \in G_k$ и $e_j \in G_m$ на линию, соединяющую центры этих групп C_k и C_m . Для уменьшения влияния шумовых составляющих измерения характеристик объектов параметры $D_{km}^{sep}, R_k^{sep}, R_m^{sep}, L_k^{min.av}, L_m^{min.av}$ определяются с применением статистических методов.

б) Задание области качественного деления S_{qd} .

Для заданного вектора V_{qd} (7) область качественного деления S_{qd} имеет вид (15):

$$S_{qd} = (Pr_{min}^{el} = B_{el}^{min}; Pr_{sd} = B_{sd}; KS \geq B_{KS}; k_{sep1} \geq B_{sep1}; k_{sep2} \geq B_{sep2}) \quad (15)$$

Границы $B_{qd} = (B_{el}^{min}, B_{sd}, B_{KS}, B_{sep1}, B_{sep2})$ области S_{qd} определяются соотношениями (16)-(21):

$$B_{el}^{min} = B_{sd} = 1 \quad (16)$$

$$B_{KS} = \begin{cases} KS_{max}^{itm}, & \text{если: } KS_{min}^c \geq KS_{max}^{itm} \\ KS_{min}^c, & \text{если: } KS_{min}^{itm} > KS_{min}^c > KS_{max}^{itm} \\ KS_{min}^{itm}, & \text{если: } KS_{min}^c \leq KS_{min}^{itm} \end{cases} \quad (17)$$

$$KS_{min}^c = \begin{cases} KS_{min}^*, & \text{если: } k_{sep1} < k_{sep1}^{ks} \\ \lambda_{ks} \cdot KS_{min}^*, & \text{если: } k_{sep1} \geq k_{sep1}^{ks} \end{cases} \quad (18)$$

$$KS_{min}^* = \beta_{ks} - \alpha_{ks} \cdot N_P \quad (19)$$

$$B_{sep1} = \text{const} \quad (20)$$

$$B_{sep2} = \text{const} \quad (21)$$

В уравнениях (17)-(19): KS_{min}^{itm} , KS_{max}^{itm} – заданные минимальное и максимальное значение величины KS_{min} ; k_{sep1}^{ks} , λ_{ks} – заданное пороговое значение коэффициента сепарации k_{sep1} и коэффициент уменьшения величины KS_{min}^c , соответственно; β_{ks} , α_{ks} – заданные коэффициенты зависимости B_{KS} от величины N_P – количества элементов партии P .

Параметры уравнений (16)-(21), определяющие границы B_{qd} области качественного деления S_{qd} определяются экспериментальным путем. Параметры N_{min}^{s1-g} , KS_{min}^{itm} , KS_{max}^{itm} , λ_{ks} , B_{sep1} имеют постоянное значение для всех типов ЭКБ. Параметры β_{ks} , α_{ks} , B_{sep2} , k_{sep1}^{ks} для каждого типа ЭКБ определяются в процессе обучения с применением обучающих выборок.

Предложенная структура V_{qd} (7) и система уравнений (16)-(21), задающих границы B_{qd} области S_{qd} , является результатом большого объема экспериментальных исследований, в ходе которых был определен ряд закономерностей, в частности, необходимость введения обратной линейной зависимости граничного значения критерия «Силуэт» от количества элементов в партии.

Для определения границ области качественного деления используется метод обучения с применением размеченных обучающих выборок (ОВ), состоящих из специально подобранного набора $N_{ОВ}$ обучающих партий ЭКБ заданного типа: $ОВ = \{OP_i (i = \overline{1, N_{ОВ}})\}$. Т.к. алгоритм АГ осуществляет группировку элементов партий ЭКБ в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям, то характеристики V_{qd} и S_{qd} должны задавать различия/сходства между производственными партиями, поэтому OP_i ($i = \overline{1, N_{ОВ}}$), входящие в состав ОВ, должны удовлетворять следующим требованиям:

а) Каждая OP_i ($i = \overline{1, N_{ОВ}}$) состоит из элементов, принадлежащих одной производственной партии.

б) Все OP_i ($i = \overline{1, N_{ОВ}}$) принадлежат разным производственным партиям.

Обучение алгоритма АГ партий ЭКБ заданного типа (определение параметров границ B_{qd}) с использованием ОВ основывается на поиске варианта, обеспечивающего выполнение условий:

а) Все OP_i ($i = \overline{1, N_{ОВ}}$), входящие в состав ОВ, должны быть определены алгоритмом АГ как однородные.

б) Автоматическая группировка алгоритмом АГ элементов парных объединений обучающих партий, входящих в состав ОВ $\{OP_i \cup OP_j (i, j = \overline{1, N_{OB}}; i \neq j)\}$ в группы, соответствующие составляющим их обучающим партиям OP_i и OP_j , должна осуществляться с максимально возможной эффективностью, исчисленной индексом Рэнда I_R^{OB} .

Для подтверждения эффективности работы обученного алгоритма АГ применяются тестовые выборки (ТВ), состоящие из набора $N_{ТВ}$ тестовых партий – партий ЭКБ заданного типа: $ТВ = \{TP_i (i = \overline{1, N_{ТВ}})\}$. К тестовым партиям, входящим в состав ТВ, предъявляются те же требования, что и к обучающим партиям плюс дополнительное требование: $ТВ \cap ОВ = \emptyset$. Оценка эффективности работы обученного алгоритма АГ с приме-

нением ТВ (с исчислением индекса Рэнда $I_R^{ТВ}$) основана на оценке эффективности

АГ элементов парных объединений тестовых партий, входящих в состав ТВ:

$\{TP_i \cup TP_j (i, j = \overline{1, N_{ТВ}}; i \neq j)\}$. Итоговая оценка эффективности работы обученного алгорит-

ма АГ I_R определяется соотношением: $I_R = \min(I_R^{OB}, I_R^{ТВ})$.

Проиллюстрируем работу предложенной методики на примерах обучения алгоритмов АГ для 4-х типов ЭКБ: операционных усилителей 140УД25А производства АО «Восход-КЛРЗ»; диодных сборок 2ДШ2150АС9 производства АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»; логических микросхем 1526ЛА10 и 564ЛА7В производства АО «ОКБ «Экситон». Как было отмечено выше, часть параметров алгоритма АГ определена экспертным путем и постоянна для всех типов ЭКБ: $N_{min}^{el-g} = 10$; $KS_{min}^{lim} = 0,3$; $KS_{max}^{lim} = 0,8$; $\lambda_{ks} = 0,6$; $B_{эфф1} = 0,1$. Другая часть параметров: α_{ks} , β_{ks} , $B_{эфф2}$, $k_{эфф1}^{ks}$ требует индивидуальной подстройки с применением ОВ. Каждая ОВ состоит из 8-и обучающих партий, каждая ТВ содержит 4 тестовых партии.

Итоговые результаты обучения и тестирования алгоритмов АГ представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Итоговые результаты обучения и тестирования алгоритмов АГ для 4-х типов ЭКБ

| Тип ЭКБ | Кол. ТП | I_R^{OB} | I_R^{TB} | I_R | $\alpha_{кс}$ | $\beta_{кс}$ | $B_{сер2}$ | $K_{сер1}$ |
|------------|---------|------------|------------|--------------|---------------|--------------|------------|------------|
| 140УД25А | 9 | 0,819 | 0,931 | 0,819 | 0,0015 | 0,55 | 0,3 | 0,3 |
| 2ДШ2150АС9 | 14 | 0,851 | 0,891 | 0,851 | 0,0015 | 0,75 | 0,7 | 0,35 |
| 1526ЛА10 | 60 | 0,921 | 1,000 | 0,921 | 0,0015 | 0,75 | 0,7 | 0,35 |
| 564ЛА7В | 134 | 0,946 | 1,000 | 0,946 | 0,0015 | 0,75 | 0,7 | 0,35 |
| Ср. знач. | - | 0,884 | 0,956 | 0,884 | 0,0015 | 0,7 | 0,6 | 0,34 |

На основе данных, приведенных в Таблице 1, можно сделать следующий вывод: разработанные алгоритмы позволяют осуществлять АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям со средней эффективностью (по индексу Рэнда) – 0,884.

2. Формирование ТВ для проведения выборочных разрушающих испытаний

В соответствии с действующей методикой формирование ТВ для проведения выборочных разрушающих испытаний осуществляется случайным образом. При наличии информации о характеристиках (ТП) элементов возможно формирование ТВ, используя более эффективные стратегии.

Первая стратегия. Формирование ТВ из элементов, имеющих наибольшее суммарное отклонение характеристик (ТП) от их средних по партии значений. Основанием такой стратегии является утверждение, что если результаты разрушающих испытаний верны для элементов с наибольшим разбросом характеристик (ТП), то эти результаты будут тем более верны для всех остальных элементов партии.

Вторая стратегия. Формирование ТВ из элементов, имеющих наименьший разброс характеристик, как наиболее репрезентативных представителей испытываемой партии ЭКБ.

Третья стратегия. Это комбинированная стратегия: часть ТВ формируется по первой стратегии, часть – по второй.

Возможны и другие стратегии формирования ТВ. Выбор конкретного варианта формирования ТВ определяется особенностями испытываемых типов ЭКБ и состава разрушающих испытаний, применяемого для данного типа ЭКБ.

3. Дополнительные алгоритмы выявления потенциально ненадежных элементов.

Под потенциально ненадежными элементами (ПН-элементами) понимаются электронные компоненты, обладающие скрытыми дефектами, которые могут привести к отказу в течение длительной эксплуатации в условиях космического пространства. Один из простых способов определения ПН-элементов, реализованный в технологии формирования ЭКБ космического применения - это определение в качестве таковых тех элементов, характеристики которых существенно отличаются от средних их значений по партии, справедливо полагая, что такие свойства элементов с большой вероятностью являются признаком наличия у них скрытых дефектов. По существующей технологии определение ПН-элементов осуществляется по каждой характеристике (ТП) элемента, в отдельности.

Предлагается дополнить такой подход алгоритмами, определяющими потенциально ненадежные элементы на базе анализа суммарного (кумулятивного) эффекта от отклонений характеристик (ТП) элементов. В предложенном методе в качестве суммарного показателя отклонений характеристик (ТП) элементов принимается расстояние R_i между «образом» элемента e_i и «образом» центра C_p партии ЭКБ, которой принадлежит этот

элемент, в многомерном пространстве нормированных характеристик элементов, называемое радиусом элемента e_i (см. Рисунок 4). На Рисунке 4 обозначено: символами «•» - «образы» элементов e_i ($i=\overline{1, N_P}$) партии P электронных компонентов; C_P - виртуальный элемент, называемый центром партии P , характеристики которого определяются как средние значения характеристик всех элементов партии P ; R_i - радиус элемента e_i ($i=\overline{1, N_P}$) партии P . Для определения ПН-элементов на базе измеренных характеристик элементов e_i ($i=\overline{1, N_P}$) партии P по определенному алгоритму определяется величина R_{EV} - радиус определения ПН-элементов. ПН-элементом считается элемент e_i партии P , для которого выполняется условие: $R_i \geq R_{EV}$.

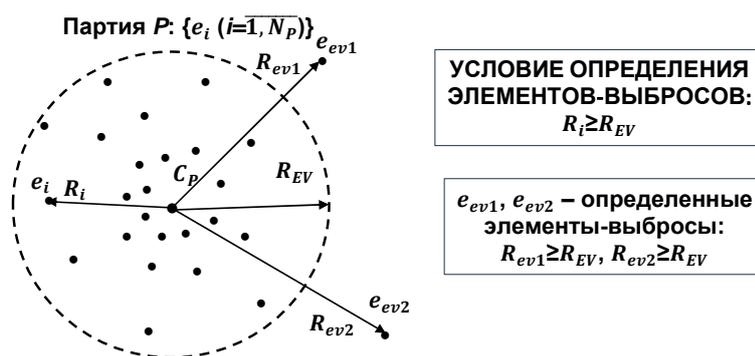


Рисунок 4 – Определение ПН-элементов на базе анализа радиусов элементов партии ЭКБ

Как показывают исследования, применение алгоритмов определения ПН-элементов на основе анализа радиусов элементов в дополнение к существующему методу определения ПН-элементов по каждой характеристике (ТП), в отдельности, позволяет повысить среднюю суммарную эффективность выявления ПН-элементов с 82,0% до 90,6%.

4. Применение методов кластерного анализа при формировании партий ЭКБ космического применения по технологии «специальных партий»

В настоящее время наиболее перспективным считается формирование партий ЭКБ космического применения по технологии «специальных партий». Такая технология означает совместную работу ИТЦ и завода-изготовителя, каждый из которых проводит свою согласованную долю мероприятий по формированию ЭКБ космического применения.

Применение методов кластерного анализа при формировании партий ЭКБ космического применения позволит сразу, на заводе отобрать элементы, имеющие минимально возможный разброс их характеристик, что несомненно скажется на общем качестве сформированной партии ЭКБ космического применения.

Выводы

Как показали исследования, применение современных методов обработки информации, в частности методов кластерного анализа, позволяет повысить эффективность технологии формирования ЭКБ космического применения. Особенно ценным инструментом являются алгоритмы АГ электронных компонентов в соответствии с принадлежностью к разным производственным партиям, особенно в настоящее время, в условиях сложных логистических схем поставок ЭКБ. Без сомнения, разработанные методы могут найти свое применение в других областях науки и техники.

Библиографические ссылки

1. Данилин Н.С. Информационные технологии и сертификация элементной базы новых российских космических телекоммуникаций. Учебно-методическое пособие. - М.: РИО РТА, 2000. - 76с.
2. Орлов В.И., Федосов В.В. Качество электронной компонентной базы – залог длительной работоспособности космических аппаратов//Решетневские чтения. 2013. Т.1, №17. С.238-241.
3. М. Горлов, Л. Ануфриев, А. Строгонов Отбраковочные технологические испытания как средство повышения надежности партий ИС. Chip News. №5. 2001 г. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/01_05/stat-5.htm, дата обращения 30.04.2019.
4. Федосов В. В, Патраев В. Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 10. С. 50-55.
5. Федосов В.В. Комплексный подход к электронной компонентной базе как метод обеспечения длительной работоспособности космических аппаратов // Вестник СибГАУ. - 2014. Специальный выпуск. № 5. - С. 155-160.
6. Программа дополнительных испытаний электрорадиоизделий в испытательных технических центрах для обеспечения комплектации бортовой аппаратуры КА по заказам Генерального заказчика // Железногорск, 2008.
7. Голованов, С. М. Об определении групп однородных элементов методами интеллектуальной обработки данных при высокотехнологическом производстве / С. М. Голованов, Л. А. Казаковцев, Г. Ш. Шкаберина // Индустрия 5.0, цифровая экономика и интеллектуальные экосистемы (ЭКОПРОМ-2021) : Сборник трудов IV Всероссийской (Национальной) научно-практической конференции и XIX сетевой конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 18–20 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – С. 83-85. – DOI 10.18720/IEP/2021.3/19. – EDN FLSYNT.
8. С.М. Голованов, В.И. Орлов, В.В. Федосов. Использование понятий однородности при проведении дополнительных испытаний электронной компонентной базы космического применения. Космические аппараты и технологии. Том 4. №4(34) 2020. С. 209-218. http://journal-niss.ru/archive_view.php?num=235.
9. С.М. Голованов, В.И. Орлов, В.В. Федосов. Определение однородности партии элементов как способ повышения качества тестирования электронной компонентной базы космического применения. Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 4 (263) 2021.с.52-68.

© Голованов С.М., Орлов В.И., Федосов В.В., 2024 г.

ОРБИТАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ: КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ СПУТНИКОВОЙ ТЕХНИКИ

В.А. Бордачев
Научный руководитель – А.В. Кустов

Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: vladimir27032001@mail.ru

Статья обсуждает методы контроля и испытаний спутниковой техники для обеспечения их надежной работы на орбите. Рассматриваются термальное вакуумное тестирование, механические и электрические испытания. Демонстрируют важность тщательного тестирования и контроля для успешных космических миссий.

Ключевые слова: спутники, тестирование, испытания, надежность, космическая техника.

Спутники играют ключевую роль в современной космической эксплуатации, обеспечивая связь, навигацию, научные исследования и многое другое. Однако для обеспечения их надежной работы необходимы строгое тестирование и эффективный контроль в орбите. В этой статье мы рассмотрим важность контроля и испытаний спутниковой техники и основные методы, используемые для обеспечения их успешной работы в космическом пространстве.

Контроль и испытания спутников имеют решающее значение для обеспечения их надежной работы в космической среде. Орбитальные условия, такие как воздействие космических лучей, радиационная обстановка, микрогравитация и температурные перепады, могут оказать серьезное воздействие на электронику и структурные компоненты спутника. Поэтому необходимо проводить тщательные испытания на земле перед запуском и регулярно контролировать состояние спутника в орбите.

Одним из основных методов испытаний спутников является термальное вакуумное тестирование, которое позволяет моделировать экстремальные условия космической среды, такие как экстремальные температурные колебания и вакуум. Во время таких испытаний спутник помещается в специальную камеру, где ему подвергают различным температурным режимам и вакууму, чтобы проверить его работоспособность в условиях космоса.

Другим важным методом являются механические испытания, которые проводятся для оценки прочности и устойчивости конструкции спутника. Эти испытания включают в себя вибрационные и ударные тесты, симулирующие условия старта ракеты и работу в космическом пространстве.

Целью оценочных испытаний является оценка соотношения конструкции КА и его систем к определенным требованиям. Оценочные испытания проводятся на всех этапах разработки. Основные виды данных испытаний - исследовательские испытания, испытания на определение возможности реализации конструкции, инженерные оценочные испытания и квалификационные испытания.[1]

Электрические испытания проводятся для проверки работы электроники и систем связи спутника. Это включает в себя тестирование электрических цепей, проверку работы приборов и оборудования, а также испытания на воздействие электромагнитных помех.

Специализированная безэховая камера (БЭК) размером $17 \times 24 \times 22$ м используется для проведения следующих типов проверок: электромагнитной совместимости бортового оборудования, испытаний и измерений характеристик антенн в автономном режиме, радиочастотных испытаний по открытому каналу. В зоне размером 15×15 м с частотами от 1 до 40 ГГц производится измерение характеристик антенн при помощи сканера ближнего поля. Камера обеспечивает эффективность экранирования на уровне 100 дБ, а коэффициент безэховости составляет 45 дБ. Это помещение предназначено для проведения высокоточных технических испытаний, гарантируя надежность и точность получаемых данных в контролируемой среде.

Испытание на вибростенде проводится по трём осям спутника. Этот этап проверки необходим для подтверждения способности спутника выдерживать вибрационные воздействия. Вибростенд способен создавать усилия до 300 кН в синусоидальном режиме, до 270 кН в случайном режиме и до 600 кН в ударном режиме. При этом на вибростенде можно испытывать спутники массой до 6200 кг при частотах от 5 до 1700 Гц в синусоидальном режиме и от 20 до 2000 Гц в случайном режиме. Эти тесты обеспечивают надежность и долговечность спутниковых систем в условиях эксплуатации.

Исследовательские испытания позволяют определить функциональные свойства элементов, узлов, блоков и систем, которые будут использованы в КА. На основе результатов испытаний разрабатываются структурная и принципиальная схемы систем, а также принимается решение о создании основной конструктивной схемы и об элементной базе, на которой следует строить разрабатываемое устройство [2].

Примером успешной миссии, прошедшей тщательные испытания на земле и успешно работающей на орбите, является спутник Hubble Space Telescope (HST). Перед запуском HST прошел серию термальных, механических и электрических испытаний, чтобы обеспечить его надежность в космосе. HST сделал значительный вклад в науку, обеспечивая уникальные наблюдения космического пространства и позволяя ученым расширять наши знания о Вселенной.

Другим примером успешной спутниковой миссии является спутник Global Positioning System (GPS), обеспечивающий глобальное позиционирование и навигацию для множества приложений. GPS прошел строгие испытания перед запуском, включая тестирование его систем навигации и связи. Сегодня GPS является неотъемлемой частью нашей повседневной жизни, используемый в авиации, судоходстве, автомобильной навигации и многих других областях. После успешного запуска спутника необходимо обеспечить его надежное функционирование в орбите. Это включает в себя постоянный мониторинг состояния спутника, включая его орбитальные параметры, энергопотребление, работу научных приборов и систем связи. Для этого используются различные методы наблюдения, включая земные и космические наблюдательные системы.

Контроль спутников на орбите осуществляется с использованием различных методов и технологий, которые позволяют наблюдать за состоянием спутников, управлять их движением, а также обеспечивать надежную работу всех систем. Основные методы контроля включают в себя телеметрию и телекоманду, системы слежения и навигации, орбитальное управление и мониторинг радиационной обстановки.

Телеметрия и телекоманда позволяют инженерам получать данные о состоянии спутников и отправлять команды для их управления. Эти данные включают информацию о работе систем, энергопотреблении, температуре и орбитальных параметрах. Системы слежения и навигации используются для определения точного положения и скорости спутника в орбите, что необходимо для его управления и коррекции траектории.

Во время запуска ракет-носителей возникают значительные акустические нагрузки, которые могут приводить к раскачке и даже разрушению спутника. Испытания в акусти-

ческой камере позволяют убедиться, что после вывода на орбиту космический аппарат будет исправен.

Акустические испытания космических аппаратов проводятся в условиях воздействия равномерного звукового поля при частотах 25–10000 Гц. Максимальный общий уровень акустического давления при работе камеры составляет 153 дБ. [3]

Особенность камеры состоит в том, что при отражении звука от стенок, покрытых специальной краской с высокой отражательной способностью, в камере создается поле, в котором уровни звукового давления одинаковы в любой точке камеры. Специальные устройства, установленные на спутнике, фиксируют его колебания. На основе этих данных специалисты дают заключение о результатах испытаний.

Орбитальное управление осуществляется с помощью различных методов, включая двигатели на твердом или жидком топливе, электростатические двигатели или солнечные паруса. Эти системы позволяют корректировать орбиту спутника и поддерживать требуемые параметры, такие как высота, наклон и форма орбиты.

Мониторинг радиационной обстановки важен для оценки воздействия космического излучения на электронику и энергопотребление спутника. Проводится постоянный мониторинг радиационной обстановки и разработка защитных механизмов для минимизации воздействия радиации на спутники.

Примеры спутников, поддерживаемых на орбите с помощью указанных методов контроля, включают спутники связи, навигационные спутники (например, GPS), спутники для научных исследований Земли и космоса, а также спутники для мониторинга окружающей среды и климатических изменений. Например:

- Спутники Глонасс (рис.1.) и GPS обеспечивают глобальное позиционирование и навигацию для множества приложений, включая авиацию, судоходство, автомобильную навигацию и мобильные устройства.
- Спутники серии Landsat (рис.2.) и модули Международной космической станции (МКС) используются для мониторинга окружающей среды, изменений климата, изучения Земли и космоса.
- Спутники связи, такие как спутники серии Inmarsat (рис.3.) или спутники для предоставления широкополосного интернета, обеспечивают связь на больших расстояниях и в отдаленных районах.



Рис.1 - Чертеж спутника Глонасс-М.



Рис. 2 - Иллюстрация спутника Landsat 8.



Рис. 3 - Спутник серии Inmarsat.

Эти спутники представляют собой лишь небольшую часть разнообразного спутникового парка, который постоянно контролируется и поддерживается в рабочем состоянии с помощью современных методов контроля и технической поддержки.

Контроль и испытания спутниковой техники играют решающую роль в обеспечении их надежности на орбите. Методы испытаний, такие как термальное вакуумное тестирование и механические испытания, существенны для гарантированного функционирования спутников. Дальнейшее развитие технологий и методов контроля спутников будет способствовать расширению наших знаний о космосе и повышению эффективности космических миссий.

Библиографические ссылки

1. Кубрак М.В., Леонов С.Н. Современные системы испытаний ракетно-космической техники // Решетневские чтения. 2017. №21-1.
2. Марчуков Е. Ю. Испытания и обеспечение надежности авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. пособие / Е. Ю. Марчуков [и др.]. М.: МАИ, 2004. 336 с.
3. Сборка и испытания космических аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprom-spka.ru/ru/uslugi/sborka-integraciya-i-ispytaniya-kosmicheskoi-tehniki/> (Дата обращения: 30.01.2024).

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

М. А. Шикарев, Э. С. Манохина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: 89134467140@bk.ru

Одним из основных и распространённых требований к составным частям изделий ракетно-космической техники (РКТ) является их герметичность. Способ вакуумной камеры является одним из основных способов испытаний на герметичность изделий РКТ. В работе описывается технология испытания изделия РКТ на герметичность методом вакуумной камеры, а также предложены способы совершенствования технологии испытаний.

Ключевые слова: Испытания на герметичность, ракетно-космическая техника, метод вакуумной камеры.

В целом, к изделиям РКТ из-за их дороговизны и сложности традиционно предъявляются высокие требования по надёжности и качеству производимых изделий.

Герметичность изделия позволяет сохранять вакуум или обеспечивать необходимое давление и концентрацию рабочих веществ в полостях изделия. Возникновение негерметичности даже одной небольшой детали такого крупногабаритного изделия, как, например, ракета-носитель может негативно сказаться на рабочих характеристиках всего изделия или привести к его отказу.

Герметичность деталей и сборочных единиц (ДСЕ) изделий РКТ тщательно контролируется. Операции по испытаниям на герметичность на предприятиях являются особо ответственными, то есть от качества выполнения этих операций в большей степени зависит качество конечной продукции.

На этапе разработки технологии производства изделия РКТ необходимо правильно определить те этапы технологического процесса (ТП), на которых возможно и целесообразно контролировать герметичность всех ДСЕ, входящих в состав изделия.

Испытания на герметичность на предприятии проводятся по принципу «от малого к большому» – то есть сначала испытываются отдельные детали, потом эти детали собираются в сборку – испытывается сборка и так далее. Это довольно логичная иерархия испытаний, которая позволяет экономить средства, выделяемые на производство, так как чем ближе изделие к своему финальному виду, тем дороже обходятся его испытания, и устранение потенциального дефекта тоже будет обходиться дороже.

Негерметичность системы характеризуется количеством газа или жидкости, проникающего в систему в единицу времени Q . Поток газа Q в системе измеряется в ваттах (Вт), на производстве РКТ Q также может измеряться в ($л \cdot мкм \text{ рт.ст.} / с$).

Существует большое количество различных методов испытаний изделий на герметичность (методов течеискания). Принцип течеискания основывается на регистрации пробного (контрольного) вещества, проникающего через несплошности (течи) в изделия.

Эффективность того или иного метода течеискания определяется чувствительностью испытаний, то есть способностью регистрировать наименьший поток контрольного ве-

щества через течь. С этой точки зрения наиболее эффективными методами являются газоаналитические методы.

При испытаниях на герметичность газоаналитическими методами предусматривается обеспечение возможности проникновения контрольного вещества сквозь потенциальные течи в изделия Газ, прорывающийся сквозь течи, регистрируется с помощью газоанализаторов (течеискателей) – специальных устройств, настроенных на выявление концентрации пробного газа. Методы газоаналитической группы обладают высокой чувствительностью, находящейся в диапазоне $10^{-8} - 10^{-14}$ Вт [1].

Требования по герметичности разрабатываются исходя из условий работы того или иного узла и агрегата в составе изделия и прописываются в конструкторской документации (КД).

Характеристики изделий РКТ продолжают постоянно улучшаться. Соответственно и требования к ним продолжают ужесточаться. Если раньше речь шла о допустимой общей негерметичности для некоторых частей изделия РКТ в $1 \cdot 10^{-4}$ (л · мкм рт.ст. / с), то сейчас уже речь идёт о цифре $1 \cdot 10^{-5}$ (л · мкм рт.ст. / с) = $1,33 \cdot 10^{-9}$ Вт [2].

Существование подобных требований обуславливает широкую распространённость газоаналитических методов контроля герметичности в ракетно-космической промышленности, так как только они могут обеспечить достаточную чувствительность испытаний.

Наиболее универсальным и широко применяемым газоаналитическим методом испытаний на герметичность считается масс-спектрометрический метод.

Масс-спектрометрический анализ можно представить, как последовательность следующих процессов:

- 1) Прокачка анализируемой газовой смеси через масс-спектрометрическую камеру.
- 2) Преобразование анализируемых молекул смеси в положительные ионы с зарядом e .
- 3) Создание моноэнергетического ионного пучка путём ускорения ионов с помощью продольного электрического поля.
- 4) Разложение ионного пучка на компоненты по значениям m / e , где m – масса заряженной частицы, e – число элементарных зарядов.
- 5) Регистрация и измерение интенсивности выделенного ионного луча с определенным соотношением m / e [3].

Масс-спектрометрический метод может эффективно осуществляться только в условиях высокого вакуума.

Способы реализации масс-спектрометрического метода течеискания выбирают с учетом конструктивно-технологических особенностей и режимов эксплуатации объекта.

Далее будут представлены известные способы реализации масс-спектрометрического метода течеискания согласно ГОСТ 28517-90 (Таблица 1).

Таблица 1 – Способы реализации масс-спектрометрического метода течеискания

| Наименование способа | Номер схемы (рисунок 1) | Вид выявляемой негерметичности | Описание |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Способ обдува | 1 | локальные течи | Откачанный контролируемый объект подсоединяют к течеискателю. При непрерывной откачке объекта течеискателем подозреваемые участки поверхности обдувают пробным газом с одновременной регистрацией сигнала течеискателя |
| Способ камеры (чехла) | 2 | общая негерметичность | Контролируемый объект помещают в камеру (чехол), откачивают и подсоединяют к течеискателю. При непрерывной откачке объекта течеискателем в камеру (чехол) подают пробный газ с одновременной регистрацией сигнала течеискателя |

| | | | |
|-------------------------------------------------|-------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Способ разъемных местных камер (чехлов) | 5 | общая негерметичность | Отдельные участки собранного изделия помещают в разъемные камеры (чехлы), изделие откачивают и подсоединяют к течеискателю. При непрерывной откачке изделия течеискателем в камеру (чехол) подают пробный газ с одновременной регистрацией сигнала течеискателя |
| Способ накопления в вакууме | 1,2,5 | общая негерметичность | Контролируемый объект откачивают и подсоединяют к течеискателю. Пробный газ любым способом подают на объект или подозреваемые участки поверхности. Наличие течей определяют по изменению сигнала течеискателя во времени при изолированных от откачки контролируемом объекте и анализаторе течеискателя |
| Способ вакуумной камеры | 6 | общая негерметичность | Контролируемый объект помещают в вакуумную камеру, соединенную с течеискателем, заполняют пробным газом с одновременной регистрацией сигнала течеискателя |
| Способ щупа | 3 | локальные течи | Контролируемый объект заполняют пробным газом под избыточным давлением. Течи обнаруживают сканированием поверхности объекта щупом течеискателя |
| Способ вакуумной присоски | 4 | локальные течи | Контролируемый объект заполняют пробным газом под избыточным давлением. Локализацию течей осуществляют наложением вакуумной присоски, соединенной с течеискателем, на контролируемые участки поверхности по сигналу течеискателя |
| Способ накопления при атмосферном давлении | 7 | общая негерметичность | Контролируемый объект помещают в камеру (чехол), заполненную воздухом или другими газами, заполняют пробным газом под избыточным давлением. После выдержки в течение определенного времени из камеры (чехла) щупом или другими устройствами отбирают пробу и перепускают в течеискатель, сигнал которого регистрируют |
| Способ опрессовки объекта с замкнутой оболочкой | 8 | общая негерметичность | Контролируемый загерметизированный объект, предварительно опрессованный внешним давлением пробного газа, помещают в камеру, соединенную с течеискателем. Наличие течей в изделии определяют по приросту сигнала течеискателя относительно сигнала от неопрессованного объекта, определенно-го ранее |

На рисунке 1 представлено графическое отображение способов испытаний, представленных в таблице 1.

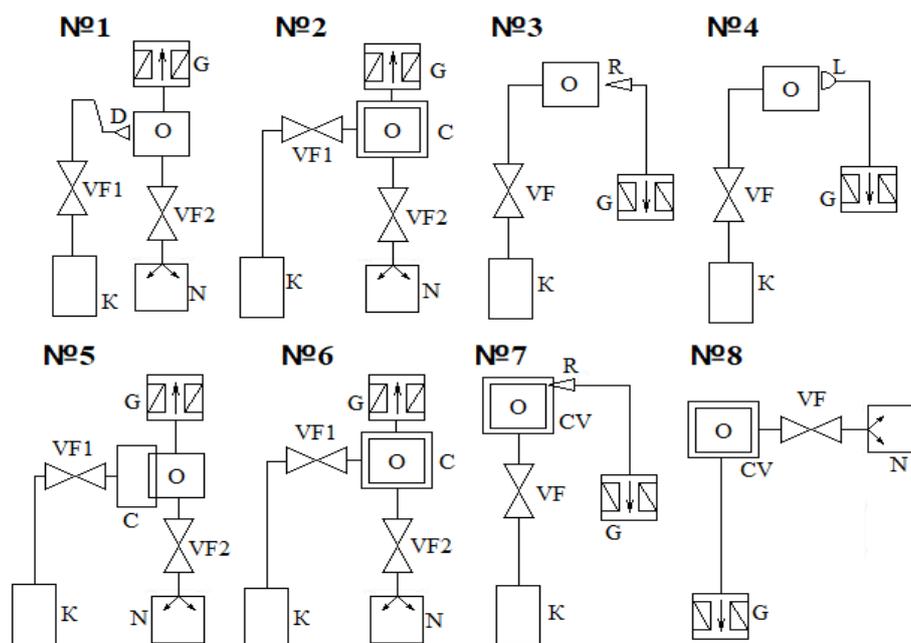


Рисунок 1 – Графическое отображение способов масс-спектрометрических испытаний: О - испытуемый объект; С - течеискатель; R - щуп; VF - клапан регулировочный; N - насос; К - баллон с пробным газом; D - обдуватель; С – камера, наполненная пробным газом; CV - вакуумная камера

Рассмотрим последовательность проведения операций при испытаниях изделия РКТ на герметичность методом вакуумной камеры.

Изделие приходит на испытательный участок. Происходит проверка корректности всех сопроводительных документов на изделие, все предыдущие операции в маршрутной карте должны иметь статус завершенных. Происходит входной контроль изделия. В паспорт изделия отписываются все выявленные при контроле дефекты изделия, принимается решение о допуске изделия к испытаниям.

Первой операцией в ТП испытаний на герметичность выступает мойка/протирка изделия. Эта операция позволяет удалить загрязнения с поверхности изделия, тем самым высвобождая каналы потенциальных течей, которые уже достоверно будут обнаружены в ходе последующих испытаний.

Мойка/протирка изделий разных габаритных размеров существенно различается. Для малогабаритных изделий достаточно вручную произвести протирку тряпкой, смоченной в бензине, ацетоне или спирте. Для мойки крупногабаритных изделий применяются специальные герметизированные моечные установки. В этих установках реализуется струйная мойка, когда поверхности изделия просто омываются струями моющей жидкости или более эффективная мойка парами моющей жидкости. В качестве моющей жидкости в герметизируемых установках могут применяться разные растворители, как правило, высокоагрессивные и даже высокотоксичные жидкости.

После операции мойки следует операция сушки. Сушка может проводиться простым обдувом изделия или в специальных сушильных камерах.

Применяются вакуумные сушильные камеры, позволяющие наиболее быстро удалить влагу из самых небольших микротрещин поверхностей изделия. В качестве сушильных камер могут выступать вакуумные инфракрасные сушильные камеры или термовакуумные камеры.

За операцией сушки следуют испытания изделия на прочность. Изделие транспортируется в бетонированный бокс и устанавливается в испытательную камеру.

Все проводимые с изделием операции при испытаниях на прочность и герметичность могут проводиться только при условии наличия допуска у работников (исполнителей), аттестованности оснастки и испытательного оборудования.

Для крупногабаритных изделий испытательная камера одновременно является приспособлением для герметизации испытываемой полости изделия. Малогабаритные изделия герметизируют только с помощью специальной оснастки.

Начинается подстыковка изделия к пневмо- или гидростенду, установка оснастки. После завершения всех установочных операций, изделие закрывают в испытательной камере, персонал покидает испытательное помещение, двери бокса плотно закрываются. Начинаются испытания на прочность. Опрессовочное давление выдерживается в изделии определённое время, согласно технологическому процессу.

Зачем вообще нужны испытания на прочность? При выявлении общей негерметичности изделия в ходе испытаний на герметичность, необходимо локализовать течи. Для этого применяют способ обдува или метод шупа. Эти методы испытателю необходимо реализовывать, непосредственно контактируя с изделием, находящимся порой под очень высоким избыточным давлением. Для обеспечения безопасности проведения испытаний на герметичность в ТП перед самими испытаниями вводится операция испытаний на прочность (опрессовка). Суть испытаний на прочность заключается в подаче в изделие избыточного давления жидкости или газа, всегда на определённую величину большего, чем для испытаний на герметичность. По результатам испытаний на прочность можно достоверно утверждать, что изделие выдержит испытания на герметичность.

После успешного проведения испытаний на прочность можно приступать к испытаниям на герметичность. Рассмотрим саму операцию испытаний на герметичность методом вакуумной камеры.

Схема испытаний на герметичность методом вакуумной камеры изображена на рисунке 2.

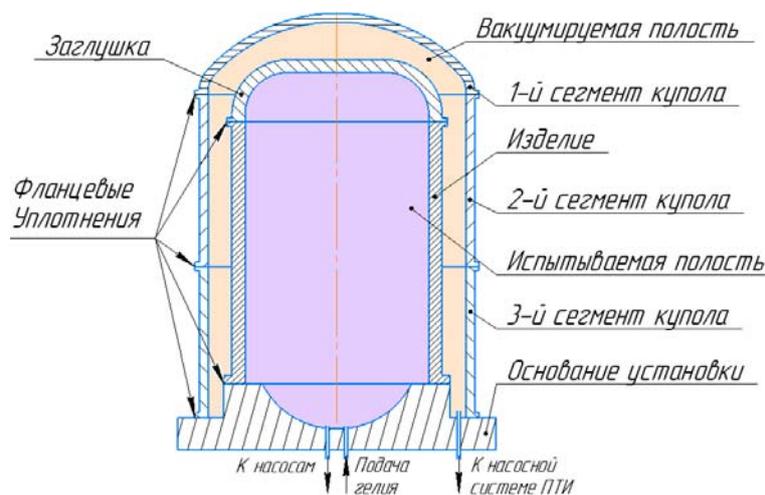


Рисунок 2 – Схема испытаний на герметичность методом вакуумной камеры

До начала откачки необходимо удостовериться в исправности и правильности подключения пневмовакuumной схемы установки, включить течеискатель, присоединить внешнюю контрольную течь с постоянным выпускаемым потоком гелия определённой величины, указанной в ТП, откалибровать течеискатель.

Начинается сам процесс откачки. Полость изделия вакуумируется до давления ≤ 10 мм рт. ст., а установка до давления $\leq 1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

После откачки изделия до необходимого давления определяется чувствительность испытаний и нестабильность фонового сигнала течеискателя. Снимаются нулевые показания течеискателя. Происходит это способом, описываемым ниже.

Сначала на экране течеискателя определяется показатель a_0 – фоновый поток. Далее открывается клапан, соединяющий контрольную течь с откачиваемым объёмом, и определяется показатель a_1 . Затем определяются показания контрольной течи $a_{к.т.} = a_1 - a_0$.

Порог чувствительности течеискания (уверенно обнаруживаемая течь с минимально возможным размером) определяется по формуле:

$$S_Q = Q_{к.т.}^{исп} \cdot a_{мин} / a_{к.т.},$$

где $Q_{к.т.}^{исп}$ – поток гелия от контрольной течи;

$a_{мин} = 2 \cdot \Delta a_{фон}$ – достоверный отсчёт по показаниям рабочего экрана течеискателя (удвоенное значение флуктуации фона гелия в камере).

Порог чувствительности течеискателя должен быть в два раза меньше нормы герметичности по гелию $Q_{доп}$.

Следующим шагом повторно фиксируются установившиеся показания фона гелия в камере a_1' , аналогично измерению a_1 .

Гелий начинает поступать в полость изделия. При достижении испытательного давления происходит выдержка по времени, согласно ТП.

При этом фиксируется реакция течеискателя на поток гелия из течей объекта испытаний $a_{изд}$ при тех же условиях, при которых производилось измерение a_1' .

Если $a_{изд} > a_1'$, то определяется степень негерметичности изделия:

$$Q_{изд} = Q_{к.т.}^{исп} \cdot \frac{a_{изд} - a_1'}{a_{к.т.}} \cdot \frac{100}{C},$$

где C – концентрация гелия в подаваемой в полость изделия газовой смеси.

Если $Q_{изд} > Q_{доп}$, то в камеру напускается атмосфера, камера открывается, но изделие продолжает находиться под испытательным давлением гелия. Происходит перенастройка оборудования для испытаний методом шупа для определения локальной негерметичности.

При негерметичности по местам уплотнения оснастки и по метам подстыковки линий полдачи давления давление в изделии сбрасывается, негерметичности устраняются, испытания повторяются.

При негерметичности самого изделия выносится заключение о браковке изделия или оформляется ремонтный маршрут.

Рассмотрим некоторые способы совершенствования технологии испытаний:

- Внедрение современного испытательного оборудования.

Речь идёт, например, о течеискателях ТИ1-22, ТИ1-30, ТИ1-50. Если говорить о последнем из них, то ТИ1-50 имеет чувствительность порядка – $5 \cdot 10^{-13}$ Вт, обладает современной автоматизированной системой управления, наглядным интерфейсом, имеет меньшую массу и габариты, меньшее время выхода на рабочий режим по сравнению с более ранними моделями [4].

Сегодня продолжает совершенствоваться также вакуумное оборудование. Одной из прогрессивных тенденций является применение безмасляных вакуумных насосов для создания как низкого, так и высокого вакуума.

Сухие пластинчато-роторные, винтовые, спиральные, мембранные, турбомолекулярные насосы – не содержат масла в своей всасывающей камере. Следовательно масляные пары не могут попасть в вакуумную систему, тем самым нарушив вакуум и загрязнив испытываемую полость. Безмасляные насосы могут быть проще в эксплуатации и надежнее, чем масляные, при аналогичных возможностях по созданию вакуума [5].

- Создание автоматизированной системы управления процессом испытаний.

Современное испытательное оборудование входит в состав системы автоматического управления испытательным процессом. Эта система позволяет дистанционно управлять магистральной арматурой, оборудованием; обладает наглядностью и простотой восприятия. В своём составе она имеет механизмы предупреждения и устранения аварийных ситуаций.

Вариант системы автоматического управления испытательным процессом представлена в работе [6]. Результатом применения этой системы является сокращение длительности и трудоёмкости процесса наддува полостей изделия пробным газом при пневмовакуумных испытаниях изделий РКТ в 2,2 раза, по сравнению с ручным методом подачи давления.

- Унификация оборудования и оснастки

Выбор испытательного оборудования происходит исходя из условий проведения испытаний, заложенных в КД и ТП. Наиболее универсальное и многорежимное оборудование можно применять для испытаний большей номенклатуры ДСЕ изделий РКТ.

Интересным вариантом унификации является использование специальных переходных колец для испытаний разногабаритных изделий на одной установке: на основание камеры устанавливается переходное технологическое кольцо, и уже в это кольцо происходит уплотнение испытываемого изделия, диаметр которого меньше посадочного диаметра на основании камеры.

Также современные испытательные камеры можно использовать для проведения мойки изделия, доустановив необходимое оборудование, перекрыв ненужные линии подачи и присоединив нужные через переходники.

Унификация испытательного оборудования позволяет экономить средства на проектирование и производство дополнительного оборудования.

Если говорить о малогабаритных ДСЕ, то для их испытаний имеет смысл использовать нестационарные вакуумные камеры разных размеров и местные вакуумные камеры для ускорения и удешевления испытаний. Один раз произведя подобную оснастку, можно испытывать детали разных изделий РКТ, так как в настоящее время составные части ракет разных поколений не претерпевают революционных изменений - они хоть и отличаются конкретными размерами, но схожи габаритными размерами между собой.

Трубопроводы и иные изделия, длина которых несоизмерима больше их диаметра, испытываются по несколько штук за раз, при этом пробный газ подаётся через коллектор во все испытываемые полости одновременно.

Была рассмотрена принципиальная схема испытаний на герметичность изделий РКТ.

Совершенствование технологии испытаний на герметичность изделий ракетно-космической техники сводится к увеличению чувствительности методов течеискания, снижению дороговизны испытаний при сохранении испытательных характеристик, снижению времени испытаний, что возможно достичь при совершенствовании технологических процессов испытаний и применении более прогрессивного оборудования, которое бы позволяло быстрее выходить на режим самих испытаний.

Библиографические ссылки

1. А. И. Евлампиев, Е. Д. Попов, С. Г. Сажин, и др. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. / М.: Машиностроение, Т. 2; кн. 2, 2003, 331с.
2. Служевский, В. Е. Перспективные методы испытаний на герметичность изделий аэрокосмической техники / В. Е. Служевский, Я. Ю. Бакулин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1, № 12. – С. 205-206.
3. В. А. Ланис, Л. Е. Левина. Техника вакуумных испытаний / М.: Государственное энергетическое издательство, 1963, 260 с.

4. Течеискатель гелиевый масс-спектрометрический ТИ1-50. Руководство по эксплуатации // Вактрон. Вакуумные насосы и течеискатели [Электронный ресурс]. URL: <https://vactron.ru/index.php/library/rukovodstva-po-ekspluatatsii/107-ti1-50-rukovodstvo#6> (дата обращения 29.11.2023).

5. Иванов В. И. Безмасляные вакуумные насосы / М.: Машиностроение, 1980, 160 с.

6. Алиев А. Р. Методики автоматизированного наполнения полостей изделий ракетно-космической техники газом при пневмовакуумных испытаниях : специальность 2.5.10 «Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алиев Андрей Рафаилович ; ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2023. – 18 с.

© Шикарев М. А., Манохина Э. С., 2024

РАССМОТРЕНИЕ ТЕНДЕНЦИЙ В АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЙ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Е. А. Рожкова
Научный руководитель – А.В. Кустов

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

E-mail: e_rozhok@vk.com

Статья обсуждает текущие тенденции и перспективы применения робототехники и искусственного интеллекта в контроле и испытаниях ракетно-космических систем. Обсуждаются примеры применения роботов и систем искусственного интеллекта в различных аспектах контроля и испытаний, а также представлены перспективы их дальнейшего развития. Анализируются потенциальные выгоды, которые могут быть получены от интеграции новых технологий и методов в ракетно-космической отрасли.

Ключевые слова: робототехника, искусственный интеллект, контроль, испытания, ракетно-космическая отрасль, эффективность, безопасность.

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 безопасности полетов и успеха миссий. В последние десятилетия отрасль активно применяет современные технологии автоматизации и роботизации, в том числе робототехнику и искусственный интеллект, для оптимизации контрольных и испытательных процессов.

Роботизация играет важную роль в современной ракетно-космической отрасли, принося новые возможности и повышая эффективность контрольных и испытательных процессов. В этой области широко применяются различные типы роботов, включая автономные роботы, оснащенные разнообразными сенсорами для навигации и выполнения задач в экстремальных условиях космоса. Эти устройства способны работать самостоятельно без постоянного контроля человека, что особенно важно при выполнении задач в условиях, где доступ человека затруднен или опасен.

Одним из ключевых аспектов роботизации является применение манипуляторов и механизмов, которые позволяют роботам выполнять различные операции, такие как захват и перемещение объектов, выполнение точных измерений и манипуляции с инструментами. Эти механизмы могут быть как стандартными, так и специально разработанными для конкретных задач и условий в космосе.

Одними из основных перспективных задач с использованием группы роботов в ракетно-космической отрасли являются [1]:

- Транспортировка деталей
- Использование при покраске
- Контроль качества сварных швов

Дроны также активно применяются в ракетно-космической отрасли для выполнения различных задач, таких как инспекции и мониторинг объектов, транспортировка грузов

и обеспечение связи. Их мобильность и способность быстро перемещаться в трехмерном пространстве делают их ценным инструментом для различных операций в космосе.

Например, дроны, такие как DJI Matrice 300 RTK (рис.1), Parrot Anafi USA и Skydio X2, активно применяются для выполнения различных задач в космической индустрии.

DJI Matrice 300 RTK обладает высокой степенью надежности и точности, что делает его идеальным инструментом для инспекционных работ на космических объектах. Parrot Anafi USA, с компактным размером и высокой производительностью, может эффективно мониторить и обслуживать ракетные пусковые установки. А Skydio X2, обладая развитыми автономными функциями и высокой маневренностью, можно использовать для транспортировки грузов на космические объекты и выполнения сложных операций.



Рис.1. Дрон DJI Matrice 300 RTK.



Рис.2. Комплектующие дрона Parrot Anafi USA.



Рис.3. Дрон Skydio X2 в действии.

Эти дроны обеспечивают дополнительные возможности для ракетно-космических предприятий, позволяя им повысить эффективность и безопасность различных операций, таких как инспекции, мониторинг и транспортировка грузов, что отражает общий тренд в развитии автоматизации и роботизации в данной отрасли.

Еще одним важным направлением роботизации является использование в антенных системах. Роботы могут автоматически настраивать и калибровать антенны, что позволяет оптимизировать качество связи и повысить эффективность работы космических коммуникационных систем.

В системе группового управления роботами (СГУР) могут реализовываться методы:

- Централизованной
- Децентрализованной
- Гибридной

Стратегии управления, особенности которых подробно рассмотрены в монографиях и многочисленных статьях. При реализации методов централизованного управления группа роботов имеет «робота-лидера», вычислительный комплекс которого является технической базой системы управления. На основе информации, поступающей от роботов группы, и информации о задачах, поставленных перед группой системой управления более высокого уровня, СГУР решает задачи формирования подгрупп и распределения задач между ними. [2]

Преимущества роботизации в ракетно-космической отрасли очевидны. Это повышение безопасности работ, увеличение производительности, снижение затрат и улучшение качества выполнения операций. Развитие новых технологий и методов роботизации будет продолжаться, открывая новые возможности для исследования космоса и развития космических технологий. Применение роботов также позволяет проводить испытания в экстремальных условиях, которые опасны или недоступны для человека. Например, роботы могут работать в вакууме или при высоких температурах, обеспечивая непрерывность и безопасность испытаний.

Искусственный интеллект (ИИ) играет ключевую роль в улучшении эффективности и точности контрольных и испытательных процессов. Алгоритмы машинного обучения и анализа данных позволяют автоматически обрабатывать огромные объемы информации, выявлять паттерны и предсказывать возможные отказы.

Одним из примеров применения ИИ является автоматизированное распознавание и классификация дефектов на поверхности ракетных корпусов или двигателей. Благодаря обучению нейронных сетей на больших наборах данных, системы могут точно определять даже мельчайшие дефекты, что позволяет своевременно проводить ремонт или замену компонентов.

О применении робототехники и искусственного интеллекта в ракетно-космической отрасли можно отметить, что технологии автоматизированного распознавания и классификации дефектов с использованием искусственного интеллекта уже успешно применяются на производственных площадках.

Например, многие ведущие компании в области ракетного и космического производства, такие как Boeing, Airbus, SpaceX и другие, активно внедряют системы машинного зрения и нейронные сети для автоматизации процессов инспекции и обнаружения дефектов на поверхности ракетных корпусов и двигателей.

Эти технологии позволяют компаниям эффективно сканировать и анализировать поверхность с высокой точностью и скоростью, обнаруживая даже мельчайшие дефекты. Такой подход позволяет оперативно выявлять проблемы и проводить своевременный ремонт или замену компонентов, что способствует повышению качества и надежности производимых ракетно-космических систем.

Первой ступенью в развитии искусственного интеллекта в области средств измерения является применение технологии самообучения. Технология самообучения начинает внедряться в средства контроля, она позволяет создавать программу измерения, сокращая участие человека в эксплуатации оборудования.[3]

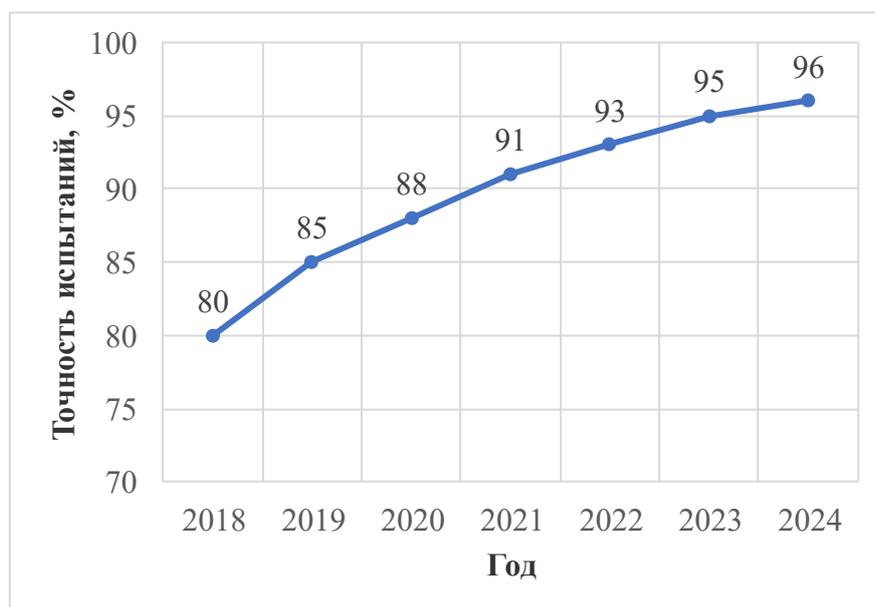


Рис.4. График изменения точности испытаний с течением времени

График (рис.4) демонстрирует динамику изменения точности испытаний в ракетно-космической отрасли в связи с поэтапным внедрением новых технологий робототехники и искусственного интеллекта с 2018 по 2024 год.

В начале рассматриваемого периода, в 2018 году, точность испытаний составляла 80%. С внедрением новых технологий в 2019 году, наблюдается заметный подъем точности до 85%. С каждым последующим годом точность продолжала расти: 88% в 2020 году, 91% в 2021 году, 93% в 2022 году и 95% в 2023 году. К концу периода, в 2024 году, точность испытаний достигла 96%. Этот график подчеркивает положительное воздействие внедрения новых технологий, таких как робототехника и искусственный интеллект, на повышение точности и эффективности испытательных процессов в ракетно-космической отрасли.

Эти данные исследования, проведенного на предприятии, занимающемся производством ракетно-космических систем на предприятии SpaceX. Компания активно занимается разработкой и испытанием ракет и космических аппаратов, и внедрение новых технологий в процессы контроля и испытаний имеет ключевое значение для обеспечения безопасности и надежности их космических миссий.

Данные о изменении точности испытаний с течением времени могут быть получены из анализа результатов испытаний, проведенных на производственных площадках SpaceX. Эти данные помогут инженерам и менеджерам оценить эффективность и влияние внедрения новых технологий, таких как робототехника и искусственный интеллект, на процессы контроля и испытаний ракетно-космических систем.

Например, такие данные могут быть использованы для оценки эффективности автоматизированных систем контроля качества или для анализа улучшения точности обнаружения дефектов на производственной линии. Это позволит SpaceX повысить качество своих ракет и космических аппаратов, уменьшить риск отказов и обеспечить безопасность своих космических миссий.

Применение робототехники и искусственного интеллекта в контроле и испытаниях ракетно-космических систем обладает рядом преимуществ и недостатков (см. таблица 1). Роботы и системы искусственного интеллекта способны обеспечивать высокую точность и надежность выполнения задач, что повышает качество контрольных и испытательных процессов. Они могут обнаруживать даже мельчайшие дефекты и аномалии, что способствует своевременному выявлению потенциальных проблем и снижению риска отказов во время полетов.

Таблица 1.

Преимущества и недостатки применения робототехники и искусственного интеллекта

| Преимущества | Недостатки |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Высокая точность и надежность | Высокие затраты на разработку и внедрение новых технологий |
| Увеличение эффективности | Ограничения в автономности и искусственном интеллекте в сложных сценариях |
| Снижение рисков | Необходимость поддержки и обслуживания роботов и искусственного интеллекта |
| Гибкость и адаптивность | Возможность технических сбоев и ошибок в работе устройств |
| Повышение скорости выполнения задач | Риск потери контроля при полной автономии роботов |
| Работа в опасных условиях | Сложности в обучении и программировании систем искусственного интеллекта |
| Возможность работы в непрерывном режиме | Этические и юридические вопросы, связанные с применением автономных систем |

Кроме того, роботы работают с высокой скоростью и без ошибок, что увеличивает производительность испытательных процессов и сокращает время, необходимое для проведения контрольных мероприятий. Применение роботов также снижает риск для человеческого персонала, особенно в условиях, где испытания могут быть опасными или недоступными для людей, что в свою очередь помогает сократить затраты на обучение, медицинское обеспечение и страхование.

Системы робототехники и искусственного интеллекта легко масштабируемы и адаптированы для различных задач и условий, что обеспечивает гибкость в их использовании. Применение новых технологий способствует также инновациям и развитию новых методов и подходов к контролю и испытаниям, что поддерживает конкурентоспособность отрасли и способствует ее дальнейшему развитию.

Перспективы развития применения робототехники и искусственного интеллекта в контроле и испытаниях ракетно-космических систем обширны и обещают значительные преимущества для отрасли.

Во-первых, ожидается дальнейшее совершенствование технологий робототехники, что приведет к созданию более гибких и адаптивных роботов. Эти устройства будут способны выполнять более широкий спектр задач, в том числе и в условиях, которые ранее были слишком сложными или опасными для автоматизации.

Кроме того, ожидается усовершенствование алгоритмов искусственного интеллекта, что позволит им более точно анализировать данные и принимать решения в реальном времени. Это повысит эффективность контрольных и испытательных процессов и сделает их более адаптивными к изменяющимся условиям.

Мобильные роботы для космоса, включая роботы от NASA и SpaceX: Эти роботы разработаны для выполнения задач в невесомости и обладают способностью переме-

щаться и проводить обследование космических аппаратов. Примером является мобильный робот Astrobee, разработанный NASA, который выполняет различные операции на борту Международной космической станции.

Гибкие роботы, такие как роботы-змеи: Эти роботы способны адаптироваться к сложным средам и перемещаться в узких и труднодоступных местах. Примером может служить робот-змея Xenobot, который разработан для исследования труднодоступных мест в условиях аварийных ситуаций.

Автономные подводные роботы для исследования океана: Эти роботы способны работать в непрерывной среде и автономно собирать данные. Примером является робот-исследователь Sentry, который используется для исследования океанского дна и сбора данных о его структуре и составе.

Эти технологии демонстрируют прогресс в области создания роботов, которые могут эффективно работать в разнообразных условиях, что открывает новые возможности для автоматизации и оптимизации процессов в ракетно-космической отрасли.

Прогнозируется также развитие систем автоматизированного планирования и управления, которые будут способствовать оптимизации испытательных программ и распределению ресурсов. Это позволит сократить время выполнения задач и повысить общую производительность отрасли.

Одним из ключевых направлений развития является интеграция робототехники и искусственного интеллекта с другими передовыми технологиями, такими как квантовые вычисления и нанотехнологии. Это позволит создавать более сложные и интеллектуальные системы, способные решать более сложные задачи и повышать уровень автономности в контроле и испытаниях ракетно-космических систем.

Современный этап развития систем автоматического управления – это освоение методов искусственного интеллекта. Это означает создание нового поколения роботов – интеллектуальных. Аналогично быстро прогрессируют напланетные мобильные роботы (роверы), создаются первые маневрирующие свободно летающие орбитальные роботы. [4]

В целом, перспективы развития применения робототехники и искусственного интеллекта в ракетно-космической отрасли обещают значительные преимущества в виде повышения эффективности, точности и безопасности контрольных и испытательных процессов. Развитие новых технологий и методов будет продолжаться, открывая новые возможности для исследования космоса и развития космических технологий.

Библиографические ссылки

4. Павлов, К. А. Практическое применение роботов в ракетно-космической отрасли / К. А. Павлов, В. Л. Слепихин, В. В. Истомина // Наукосфера. – 2022. – № 1-1. – С. 202-206.
5. Белоглазов Д.А., Гайдук А.Р., Косенко Е.Ю., и др. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. М., 2015. 305 с.
6. Рожкова, Е. А. Методы контроля и испытаний, применяемые на предприятиях, изготавливающих изделия повышенной точности / Е. А. Рожкова, А. В. Кустов // Механика XXI века. – 2023. – № 22. – С. 105-113.
7. Алексеев, В. И. Робототехника в космосе: история и перспективы развития / В. И. Алексеев // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2021. – № 3. – С. 40-52.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ «БАРОКОМПЛЕКС» ПУТЕМ ПРОВЕДЕНИЯ РЕКУПЕРАЦИИ ГЕЛИЯ

Р. М. Туранов, В. П. Назаров

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

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

E-mail: r.turanov@mail.ru

Контроль герметичности (течеискание) с применением контрольного газа герметизируемой продукции входит в систему неразрушающего контроля качества. Такие испытания позволяют оценить прочность и надежность материалов, выявить и ликвидировать возможные дефекты и повреждения, а также подтвердить соответствие производимых изделий требованиям безопасности и качества.

Ключевые слова: Рекуперация, течеискание, гелий, барокомплекс.

Барокомплекс предназначен для очистки, обезжиривания внутренних поверхностей топливных баков и удаления механических загрязнений растворителем, подготовки к высокочувствительному контролю герметичности топливных баков (освобождение сквозных микронеплотностей от закупоривающих загрязнений и влаги) и для высокочувствительного контроля герметичности топливных баков изделия с применением масс-спектрометрических течеискателей. Реализация всех существующих технологических операций на барокомплексе осуществляется в автоматизированном режиме при помощи автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). Предусмотрен и ручной режим работы, который позволяет оператору выполнять действия с барокомплексом, независимо от алгоритма, заложенного в память программируемого логического контроллера. В этом режиме оператор может проводить сервисные работы, диагностические работы, проводить испытания изделий, не включенные в программу испытаний.

Испытания на оборудовании «Барокомплекс» проводится с использованием контрольного газа гелия. Масс-спектрометрический течеискатель — это относительно простой газоанализатор, настроенный, как правило, на регистрацию содержания одного газа (пробного газа) в газовой смеси, в данном случае гелия [1].

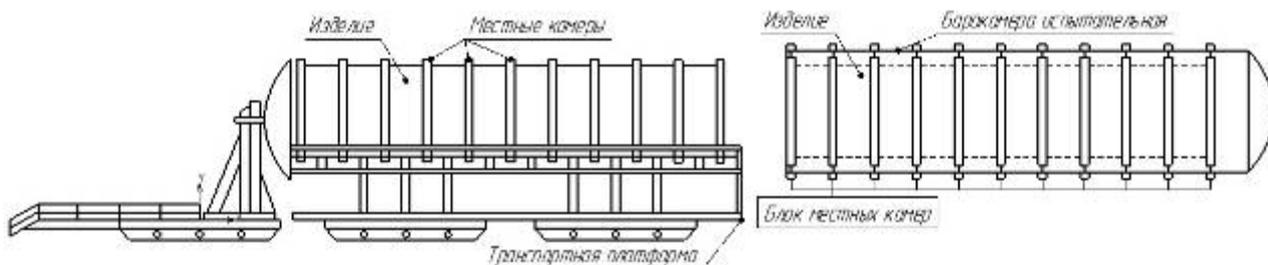


Рисунок 1 – Схема барокомплекса.

Контроль герметичности крупногабаритных изделий ракетно – космической техники, в частности топливных баков двигательных установок летательных и космических аппа-

ратов является ответственной задачей производства, обеспечивающей гарантию качества и надежности изделий.

Внутрибачковые системы изделия проверяют давлением гелиево-воздушной смеси с концентрацией гелия не менее 80%. В случае обнаружения негерметичности, превышающей допустимое значение, применяют метод «щупа» для точного определения места течи [2].

При испытаниях используются большие объемы дорогостоящего газа - гелия. В наше время проблема повторного использования ресурсов набирает свою актуальность. Данное оборудование работает по принципу бережливого производства. С целью повышения технических и экономических показателей барокомплекс имеет систему рекуперации гелия. Рекуперация – это возвращение части материалов или энергии, а в нашем случае гелия, для повторного использования в том же технологическом процессе.

Удаление воздуха и гелиево-воздушной смеси из камеры и испытываемого изделия до остаточного давления осуществляется с помощью вакуумно-откачной системы (ВОС). ВОС представляет собой комплекс, состоящий из безмасляных откачных агрегатов, запорной арматуры, приборов контроля вакуумметрического давления и вакуумных трубопроводов.

В состав ВОС входят форвакуумные винтовые, которые предназначены для форвакуумной откачки камеры. В данном барокомплексе используются насосы серии DRYVAC это винтовой вакуумный насос сухого сжатия, включает 2 ступени откачки, работающие параллельно. Модели серии DRYVAC были разработаны для надежной работы в сверхсложных промышленных процессах. Данные насосы оптимизированы для откачки стандартных газов в технологических процессах. Они отличаются своей высоконадежной конструкцией и удовлетворяют требованиям промышленной безопасности. Данные насосы оснащаются системой продувочного газа, которая позволяет осуществлять продувку ротора и уплотнений вала. Все модели насосов DRYVAC оборудуются одинаковым типом электродвигателя. Соответствующий частотный преобразователь либо интегрируется с насосом, либо устанавливается отдельно на стойке (кронштейне). Насосы водоохлаждаемые. В качестве смазывающих материалов используется либо синтетическое масло, либо ПЭФ (перфторполиэфир). Они оснащаются программируемым контроллером с сенсорным дисплеем и программным обеспечением пользователя для простоты работы и настройки параметров

Для достижения высокого вакуума используются турбомолекулярные насосы с магнитным подвесом ротора серии STP-iXA4506 производства Edwards. Данный насос имеет полностью интегрированный блок питания со встроенным контроллером. Нет необходимости в соединительных кабелях и монтаже контроллера в отдельную стойку. Благодаря экономичной компактной конструкции насос удобен при монтаже и занимает малую площадь. Высокая производительность, высокая пропускная способность. Способен обеспечивать высокую скорость откачки 4300 л/с.

Для более эффективной откачки гелия используются насосы турбомолекулярные, имеющие высокий коэффициент компрессии по гелию. Назначение данного насоса в том, чтобы обеспечить требуемый поток по гелию на входе в теческатель при проверке на суммарную негерметичность изделия [3].

Откачанная гелиево-воздушная смесь попадает в блок рекуперации. Блок рекуперации состоит из следующих элементов: осушителя адсорбционного с холодной регенерацией, он проводит осушку гелиево-воздушной смеси от влаги; термопреобразователя сопротивления, контролирующего температуру гелиево-воздушной смеси; нагревательных элементов, осуществляющих нагрев гелиево-воздушной смеси в осушителе; крана с пневмоприводом, который позволяет регулировать поток рабочей среды при регенерации осушителя; воздушного фильтра, выполняющего роль очистки гелиево-воздушной

смеси; компрессорной установки для перекачки смеси и обратного клапана, не допускающего перепуска рабочей среды в обратном направлении.

Блок сбора и хранения смеси состоит из: воздухоборника, в котором хранится гелиево-воздушная смесь; резервуара для сбора смеси при давлении в изделии меньше атмосферного; кранов и клапанов; рампы баллонной, конструктивно представляющей собой рамную конструкцию, которая обеспечивает вертикальное размещение баллонов с гелием.

Электрооборудование данной системы позволяет получать данные от датчиков и дистанционного управления работой элементов блока рекуперации. В баллонах присутствуют газоанализаторы для определения качественного и количественного состава смесей газов, а также гигрометры кулонометрические, измеряющие объемную долю влаги в смеси.

В заключении стоит отметить, что данная система является экономически выгодной и сокращает время испытаний за счет повторного использования имеющихся ресурсов и материалов без необходимости их повторной закупки и транспортирования к месту испытаний.

Библиографические ссылки

1. Испытание и обеспечение надежности / А. И. Коломенцев, М. В. Краев, В. П. Назаров [и др.] // Сиб. гос. Аэрокосмич. ун-т; Моск. авиац. ин-т. – Красноярск, 2006. – 336 с.
2. В. А. Ланис, Л. Е. Левина. Техника вакуумных испытаний. М.: Государственное энергетическое издательство, 1955, 260 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2 : В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688с.
4. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Со-снин, В.Н. Филипов и др., 1995. 448 с.
5. Промышленные приборы и средства автоматизации [Текст]: справочник / под общ. ред. В.В. Черенкова. -Л.: Машиностроение. 1987. 847 с. – Библиогр.: с. 839. – 20000 экз. (в пер.).

© Туранов Р. М., Назаров В. П., 2024

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ РАКЕТ

В.А. Бордачев, Е. А. Рожкова
Научный руководитель – А.В. Кустов

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

Статья исследует методы обеспечения надежности ракетных компонентов в космосе, включая разрыв композитов, анализ структуры, ультразвуковое тестирование и численное моделирование. Представленные методы позволяют предвидеть поведение материалов при критических условиях, что существенно для совершенствования космических технологий.

Ключевые слова: структура, методы, моделирование, эффективность, композитные материалы

В условиях стремительного развития космических технологий особую важность приобретает обеспечение надежности и стойкости структур ракетных компонентов в космической среде [1]. В данной статье мы глубоко исследуем два ключевых метода по обеспечению надежности и стойкости - метод разрыва компонентов и численный метод, представляя результаты практических испытаний. В дополнение к этому, мы кратко рассмотрим другие методы, такие как анализ структуры, использование неразрушающих методов (ультразвуковое тестирование) и компьютерное моделирование с применением SolidWorks Flow Simulation, даже несмотря на их теоретическую природу, поскольку они предоставляют дополнительный контекст для оценки устойчивости структурных компонентов в условиях космического пространства.

Разрыв композитов. Метод разрыва композитных материалов предоставляет информацию о механической прочности материала при динамических нагрузках, которые могут возникнуть во время старта и полета ракеты. Использование различных типов композитов и моделирование различных сценариев позволяет предвидеть поведение структур при критических условиях [2].

Рассмотрим на примере ПКМ (полимерных композиционных материалов). Для испытания нам потребовалось сделать необходимый материал методом контактного формования, необходимые оборудования, инструменты и материалы: Эпоксидная смола **ЭД – 20**, **Этал 45М**, стеклоткань China, разделительный воск, штангенциркуль, одноразовые стаканчики **0,25 л**, палочки для размешивания, весы, ножницы, валик для укладки, гильотина для обрезки заготовок, испытательная машина **Enrotest T – 50**.

Описание хода работы. Получение пластины из композитного материала методом ручного формования включает в себя следующие этапы: выбор необходимых материалов и нарезка заготовок размером 110×110 мм. Затем готовим 40 г эпоксидной композиции и подготавливаем поверхность для композитной ткани, проводя очистку и нанесение воска.

Далее укладываем композитную ткань на поверхность, предварительно пропитанную связующим, и приглаживаем ее до появления следов смолы на поверхности. Процесс

повторяется, нанося дополнительное количество связующего и покрывая слоем сухой ткани, пока не уложены все слои (рис.1.).

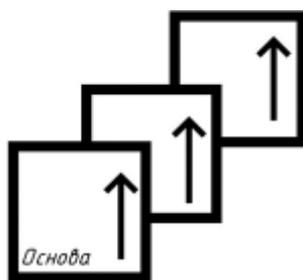


Рис. 1 - Схема армирования материала.

Полученный результат помещается для отверждения в сухом темном месте не менее чем на 24 часа. После отверждения разбираем пакет и обрезаем получившуюся пластину до размеров 100×100 мм. Определяем вес изделия, а затем рассчитываем вес и плотность полученного композитного материала, применяя правило механической смеси.

Пластину распиливаем на ровные полоски шириной 10±0,5 мм с использованием ножовки. При помощи разрывной машины (рис.2.) определяем растяжение и рассчитываем модуль упругости материала. Завершаем процесс, сравнивая рассчитанные величины с экспериментальными и выявляя возможные отклонения. Результаты измерения параметров пластины из км представлены в таблице 1.



Рис.2 -- Разрыв компонента на испытательной машине Eurotest T-50.

Таблица 1

| Ширина | Длина | Толщина (измеренная) | Масса |
|--------|-------|----------------------|---------|
| 100 | 100 | 1,19 | 20,5713 |

Анализ структуры. Анализ структуры материалов при помощи микроскопа Neophot 32 представляет собой важный этап в исследовании материалов, направленном на выяв-

ление потенциальных дефектов, трещин и других аномалий, которые могут возникнуть под воздействием космической среды. Современные методы образования изображений и сканирования, доступные при использовании данного микроскопа, обеспечивают возможность проведения детального анализа как внутренней, так и внешней структуры материалов.

Прежде чем начать анализ, необходимо подготовить образец материала. Образцы могут быть подвергнуты специальной подготовке, например, полировке, для обеспечения лучшей видимости структуры.

Микроскоп Neophot 32 (рис.3.) предоставляет широкие возможности по настройке для достижения оптимальных результатов. Регулировка увеличения, освещения и других параметров позволяет точно настраивать прибор под требования конкретного исследования.



Рис. 3 - Микроскоп Neophot 32.

С использованием микроскопа Neophot 32 проводится детальный просмотр внешней структуры материала. Это включает в себя изучение поверхности образца на наличие дефектов, трещин, пор, и других аномалий, которые могут быть визуализированы при достаточном увеличении.

Микроскоп позволяет проводить анализ внутренней структуры материала. Это особенно важно для выявления микроструктурных особенностей, скрытых дефектов и прочих характеристик, которые могут быть невидимы на поверхности.

Современные микроскопы, такие как Neophot 32, обычно оснащены возможностью фотографирования. Полученные изображения могут быть использованы для документирования результатов и последующего анализа.

Полученные данные анализируются с использованием соответствующего программного обеспечения, позволяющего выделить особенности структуры, измерить размеры частиц и провести другие количественные и качественные оценки.

Использование Neophot 32 значительно облегчает процесс анализа структуры материалов, предоставляя исследователям мощный инструмент для выявления и изучения различных характеристик, необходимых для обеспечения надежности и долговечности материалов в различных условиях, включая космическую среду.

Использование неразрушающих методов. Ультразвуковое тестирование. В ракетно-космической отрасли для проверки материалов используют методы, которые не разрушают образцы. Один из таких методов - ультразвуковое тестирование. Он позволяет обнаруживать внутренние проблемы и изменения в материалах, не повреждая их. Это важно, чтобы выявить скрытые дефекты, которые могут появиться из-за воздействия космической среды.

Этот метод полезен, потому что:

- Он помогает выявить трещины, включения и другие неисправности внутри материала.
- Позволяет обнаружить изменения в структуре материала, вызванные различными факторами, такими как высокие температуры или радиация.
- Он способен выявлять проблемы, которые не видны глазу или не могут быть обнаружены стандартными методами.

В ракетно-космической отрасли России широко используется ультразвуковое тестирование для контроля материалов. Например, при производстве ракетных двигателей ультразвуковые методы применяются для выявления внутренних дефектов в металлических деталях, таких как турбинные лопатки или сопловые сегменты.

Также ультразвуковые технологии используются при изготовлении компонентов для космических аппаратов. Например, при производстве обшивки космических кораблей ультразвуковое тестирование помогает выявлять потенциальные проблемы в структуре материала, что важно для предотвращения возможных повреждений в условиях космоса.

В отрасли оборонного производства тоже используют ультразвуковые методы. Например, при создании композитных материалов для защиты корпусов бронетехники. Ультразвуковое тестирование позволяет выявлять скрытые дефекты, которые могут снизить прочность материала и повлиять на его эффективность в боевых условиях.

Применение ультразвукового тестирования в ракетно-космической отрасли помогает улучшить безопасность и надежность материалов, сэкономить время и ресурсы при обслуживании, и обеспечивает высокий контроль качества в процессе производства. Этот метод также помогает адаптироваться к трудным условиям космоса, где материалы подвергаются различным воздействиям.

Численное моделирование. Использование программного обеспечения для создания численных моделей, которые позволяют анализировать поведение материалов при различных условиях космической среды. Это включает в себя моделирование тепловых процессов, воздействия радиации и других факторов [3].

Рассмотрим пример расчета на основе образца, который был приведен в разделе про разрыв компонента на рисунке 4.

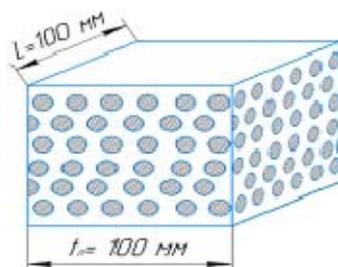


Рис. 4 - Схема армирования (расчетная схема)

Проведем расчет на основании следующих данных:

Результаты расчета параметров пластины из км представлены в таблице 2.

Найдём объёмное содержание волокон:

$$m_{\text{стлкани}}^1 = S * \rho_{\text{пов.в}}^{\text{стлкани}} = 10 * 10 * 0,0271 = 2,71 \text{ г}$$

$$m_{\text{стлкани}} = m_{\text{стлкани}}^1 * n_{\text{стлкани}} = 2,71 * 3 = 8,13 \text{ г}$$

$$m_M = m_{\text{км}} - m_{\text{стлкани}} = 20,5713 - 8,13 = 12,4413 \text{ г}$$

$$V_{\text{стлкани}} = \frac{m_{\text{стлкани}}}{\rho_{\text{стлкани}}} = \frac{8,13}{2,48} = 3,278 \text{ см}^3$$

$$V_M = \frac{m_M}{\rho_M} = \frac{12,4413}{1,134} = 10,97 \text{ см}^3$$

$$V_{\text{км}} = V_M + V_{\text{стлкани}} = 10,97 + 3,278 = 14,248 \text{ см}^3$$

$$\vartheta_{\text{стлклани}} = \frac{V_{\text{стлклани}}}{V_{\text{км}}} = \frac{3,278}{14,248} = 0,23$$

Определим плотность КМ:

$$\rho_{\text{км}} = (1 - \vartheta_{\text{стлклани}})\rho_{\text{м}} + \vartheta_{\text{стлклани}}\rho_{\text{стлклани}}$$

$$\rho_{\text{км}} = (1 - 0,23) * 1,134 + 0,23 * 2,48 = 1,444 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

$$\rho_{\text{км}} = 1,444 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

Толщину пластины получим из формулы:

$$V_{\text{км}} = \frac{m}{\rho} = \frac{20,5713}{1,444} = 14\,246 \text{ мм}^3$$

$$h_{\text{км}} = \frac{V_{\text{км}}}{S_{\text{км}}} = \frac{14\,246}{100 * 100} = 1,4246 \text{ мм}$$

Модуль упругости при растяжении:

$$E = \frac{1}{2} E_{\text{стлклани}} \vartheta_{\text{стлклани}} + E_{\text{м}} \vartheta_{\text{м}}$$

$$E = 0,5 * 65 * 0,23 + 8,5 * (1 - 0,23) = 14,02 \text{ ГПа}$$

Предел прочности при растяжении:

$$\sigma = \frac{1}{2} \sigma_{\text{стлклани}} \vartheta_{\text{стлклани}} + \sigma_{\text{м}} \vartheta_{\text{м}}$$

$$\sigma = 0,5 * 1800 * 0,23 + 55 * (1 - 0,23) = 249,35 \text{ МПа}$$

Таблица 2

| Объемное содержание волокон | Плотность КМ | Толщина расчетная | Модуль упругости | Предел прочности |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| $\vartheta_{\text{стлклани}} = 0,23$ | $\rho_{\text{км}} = 1,444 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ | $h_{\text{км}} = 1,4246 \text{ мм}$ | $E = 21,495 \text{ ГПа}$ | $\sigma = 249,35 \text{ МПа}$ |

Также численный метод можно использовать с помощью программирования на языке C++. Пример программы и её результаты показаны на рисунке 5:

```

29
30 cout << "Введите массу КМ: ";
31 cin >> m;
32 cout << endl << endl;
33
34 float n_v_st = S * n_st * p_pover_st;
35 cout << "Масса волокон стеклоланта: " << setprecision(3) << n_v_st << endl;
36
37 float n_n = m - n_v_st;
38 cout << "Масса матрицы: " << setprecision(3) << n_n << endl;
39
40 float V_st = n_v_st / p_st;
41 cout << "Объем стеклоланта: " << setprecision(3) << V_st << endl;
42
43 float V_n = n_n / p_matrix;
44 cout << "Объем матрицы: " << setprecision(3) << V_n << endl;
45
46 float V_km = V_st + V_n;
47 cout << "Объем КМ: " << setprecision(3) << V_km << endl;
48
49 float pfi_st = V_st / V_km;
50 cout << "Объемное содержание стеклоланта: " << setprecision(3) << pfi_st << endl;
51
52
53
54 float p_km = (1 - pfi_st) * p_matrix + pfi_st * p_st;
55 cout << "Плотность КМ: " << setprecision(4) << p_km << endl;
56
57 float E = 0.5 * E_st * pfi_st + (1 - pfi_st) * (float)E_n;
58 cout << "Модуль упругости при растяжении: " << E << endl;
59
60 float sigma = 0.5 * sigma_st * pfi_st + (1 - pfi_st) * (float)sigma_n;
61 cout << "Предел прочности стеклоланта вдоль волокон: " << sigma << endl;
62

```

Рис. 5 - Часть программы на языке C++ по расчету пластины из КМ.

Компьютерное моделирование с использованием SolidWorks Flow Simulation.

Одним из ключевых методов, применяемых в разработке исследуемых методов оценки стойкости структур к воздействию космической среды, является компьютерное моделирование с применением программы SolidWorks Flow Simulation. Этот инновационный подход позволяет провести детальный анализ воздействия космической среды на структурные компоненты, предоставляя важные данные для повышения их устойчивости.

Программа SolidWorks Flow Simulation используется для создания виртуальных моделей и анализа течения газов и теплообмена в различных сценариях (рис.6). Это обеспечивает возможность предсказывать тепловые и гидродинамические условия, с которыми сталкиваются материалы в условиях космического пространства. Моделирование таких условий становится крайне важным для определения того, какие факторы могут повлиять на структурные компоненты, и предоставляет инженерам ценные инсайты для разработки более стойких и эффективных материалов в космических миссиях [4].

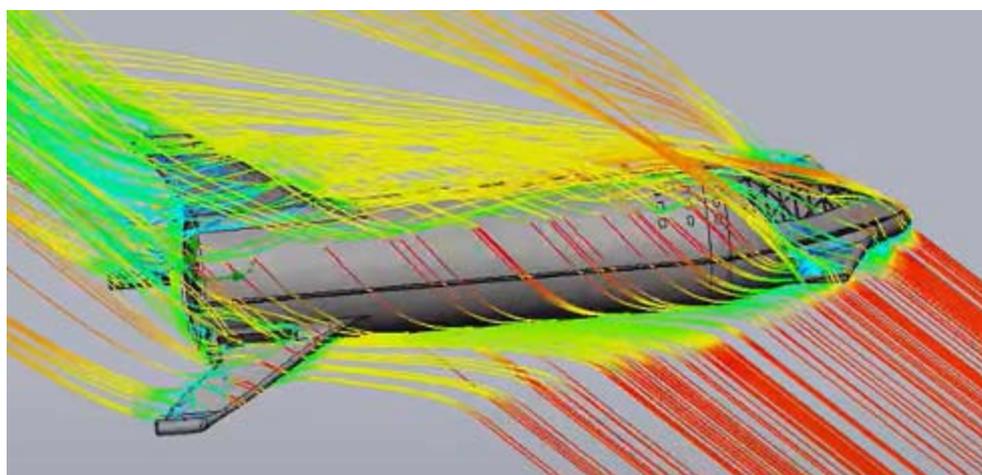


Рис. 6 - Анализа течения газов в программе SolidWorks Flow Simulation.

В итоге, наш анализ разработки методов оценки стойкости структурных компонентов ракет к воздействию космической среды выявил важные аспекты, включая метод разрыва компонентов с Eurotest T-50, анализ структуры с микроскопом Neophot 32 и численный метод с использованием различных программ. Эти инновационные подходы не только углубляют понимание воздействия окружающей среды на структурные элементы, но и становятся основой для разработки более прочных материалов. Такие методы, включая SolidWorks Flow Simulation, открывают перспективы для совершенствования ракетных технологий, обеспечивая устойчивость в условиях современной космической эксплуатации.

Библиографические ссылки

8. Рожкова, Е. А. Передовые материалы и производственные инновации для аэрокосмической отрасли / Е. А. Рожкова // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 102-5. – С. 139-141.
9. Кустов, А. В. Композиционные материалы в ракетно-космической отрасли / А. В. Кустов, Е. А. Рожкова, В. А. Бордачев // Наука, технологии, общество - НТО-II-2022 : сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции, Красноярск, 28–30 июля 2022 - С. 101-109.
10. Rozhkova, E. A. Comparative analysis of the use of composite materials in ultra-light rockets / E. A. Rozhkova // , 08–10 ноября 2023 года, 2023. – P. 44-46. – EDN JVERGL.

11. Бордачев, В. А. Исследование возникновения кавитации заборном устройстве топливного бака / В. А. Бордачев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 10–14 апреля 2023. – С. 96-98.

© Бордачев В.А., Рожкова Е.А., 2024

МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ РДМТ, РАБОТАЮЩЕГО НА НОВЫХ КОМПОНЕНТАХ

Э.С. Манохина, Н.А. Кудрявцев, М.О. Сычев, В.Ю. Журавлев, М.А. Шикарев

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

E-mail: xim96@inbox.ru

Представлена методика модернизации конструкции стенда для огневых испытаний РДМТ, изготовленного методом SLM печати, при переходе с газообразных компонентов кислород-метан на газожидкостные компоненты кислород-керосин,

Ключевые слова: ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии, стенд для огневых испытаний.

Непрерывное совершенствование ракетно-космической техники для повышения ее энергетической эффективности и параметров надежности, снижения стоимости и продолжительности цикла производства требует поиска новых подходов к проектированию и новаторским технологическим решениям. Одним из перспективных и активно развиваемых направлений технологии изготовления ракетных двигателей в настоящее время является группа методов 3D-печати и в частности метод селективного лазерного плавления – печати, позволяющий создавать изделия сложной формы, значительно сократив количество деталей, время их изготовления и сборки.

Интерес к ракетным двигателям малой тяги (РДМТ) обусловлен современными тенденциями развития ракетно-космической техники. Характерные для РДМТ малые размеры камеры двигателя и ограниченное число смесительных элементов в камере сгорания существенно осложняют ее конструкцию [1, 2]. Применение метода SLM печати для изготовления камеры РДМТ позволяет в небольшом пространстве смесительной головки двигателя разместить необходимое количество каналов для формирования необходимого факела распыла компонентов и обеспечить надёжный запуск и работу РДМТ на непрерывном и импульсном режимах.

Для отработки технологии изготовления двигателей методом SLM печати необходимо апробация различных режимов печати для получения изделий с необходимыми свойствами материала и высоким качеством поверхностей рабочих полостей двигателя. Для этого ведется отработка РДМТ на различных парах компонентов. В качестве первой пары компонентов были выбраны кислород и метан. Это было обусловлено простотой конструкции смесительной головки и более простой конструкцией системы подачи компонентов на огневом испытательном стенде (рис. 1). Компоненты подавались из баллонов высокого давления через регулирующие редукторы. При проектировании огневого стенда и экспериментальной отработке двигателя вопрос измерения параметров газовых потоков компонентов в магистралях стенда решался однотипно.

К основным вопросам, требующих конструктивного решения систем испытательного стенда можно отнести:

- система зажигания компонентов – свеча зажигания, устанавливаемая в резьбовое отверстие смесительной головки через алюминиевый уплотняющий вкладыш, подвержена высокотемпературному воздействию продуктов сгорания и способна осуществлять ограниченное количество срабатываний;
- измерение малого расхода газообразных компонентов с приемлемой точностью требует разработки, изготовления и настройки мерного стенда для получения градуировочной характеристики;
- разработка смесительной головки двигателя для изготовления методом SLM печати, обеспечивающей необходимое соотношение компонентов при одинаковом давлении на срезе форсунок и их равномерный распыл в камере сгорания.

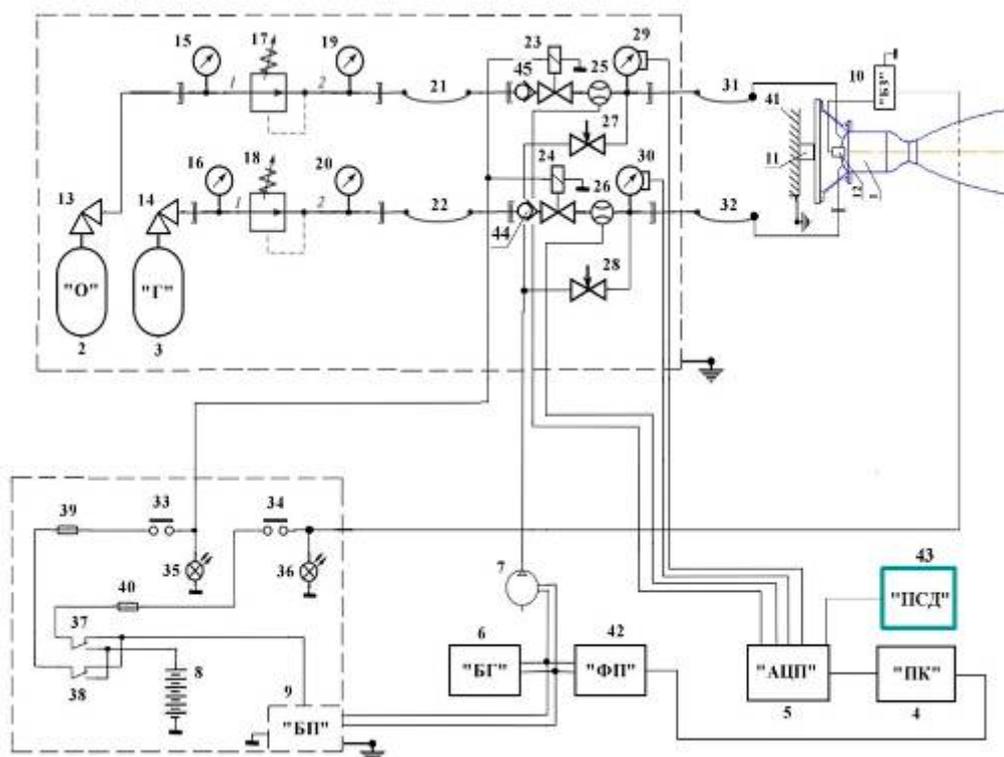


Рис.1. Электропневмосхема огневого стенда на компонентах кислород-метан
 1 – камера двигателя; 2 – емкость окислителя; 3 – емкость горючего; 4 – компьютер;
 5 – АЦП; 6 – электрогенератор бензиновый; 7 – компрессор воздушный; 8 – батарея аккумуляторная; 9 – блок питания; 10 - блок зажигания; 11 – измеритель силы; 12 – устройство запальное; 13,14 – вентиль угловой; 15, 16, 19, 20 – манометр; 17,18 – редуктор; 21, 22, 31, 32 – рукав гибкий; 23, 24 – клапан газовый электрический; 25, 26 – расходомер газовый; 27, 28 – вентиль; 29, 30 – манометр преобразователь; 33, 34 – выключатель; 35, 36 – индикатор; 37, 38 – переключатель; 39, 40 – предохранитель, 41 – рама стенда; 42 – фильтр питания.

При модернизации камеры ЖРДМТ и огневого испытательного стенда для компонентов кислород-керосин основными вопросами, требующими конструктивного решения систем испытательного стенда относятся:

- проектирование смесительной головки камеры двигателя с каналами и форсунками для жидкого компонента;
- разработка технологии SLM печати смесительной головки двигателя, обеспечивающей необходимое соотношение компонентов при одинаковом давлении на срезе форсунок, при малых размерах поперечного сечения каналов форсунок керосина;

- экспериментальная отработка необходимого равномерного факела распыления керосина форсунками;
- измерение малого расхода жидкого компонента с приемлемой точностью.

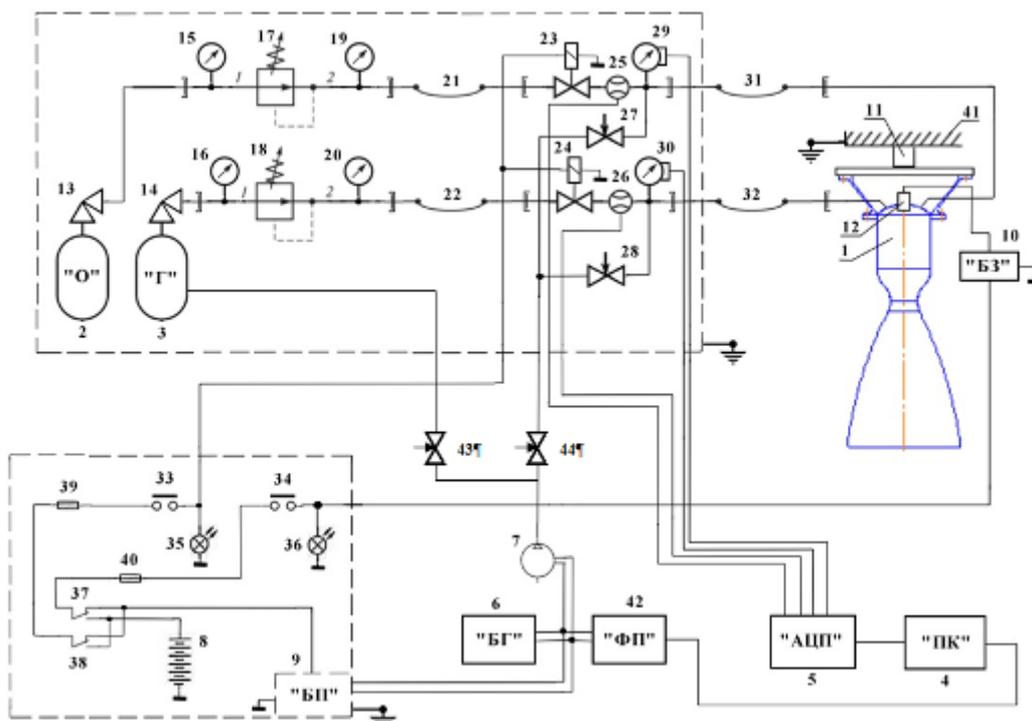


Рис.2. Электропневмосхема огневого стенда на компонентах керосин кислород
 1 – камера двигателя; 2 – емкость окислителя; 3 – емкость горючего; 4 – компьютер;
 5 – АЦП; 6 – электрогенератор бензиновый; 7 – компрессор воздушный; 8 – батарея аккумуляторная; 9 – блок питания; 10 - блок зажигания; 11 – измеритель силы; 12 – устройство запальное; 13,14 – вентиль угловой; 15, 16, 19, 20 – манометр; 17,18 – редуктор; 21, 22, 31, 32 – рукав гибкий; 23, 24 – клапан газовый электрический; 25, 26 – расходомер газовый; 27, 28 – вентиль; 29, 30 – манометр преобразователь; 33, 34 – выключатель; 35, 36 – индикатор; 37, 38 – переключатель; 39, 40 – предохранитель, 41 – рама стенда; 42 – фильтр питания, 43, 44- вентиль.

Наиболее часто в конструкциях ЖРДМТ для организации рабочего процесса используются центробежные форсунки [5]. Выбор конструкции смесительных элементов форсуночных головок, обеспечивающий требуемые характеристики вновь создаваемого ЖРДМТ, проводится по результатам проектных расчетов и экспериментальных исследований.

Согласно методике источников [3, 4] был определен массовый расход компонентов через 8 центробежных форсунок.

За исходные данные принимались:

- температура керосина $T=293\text{K}$;
- плотность керосина $\rho=819 \text{ кг/м}^3$;
- вязкость $\eta=1,49 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- угол распыливания $2\alpha = 60^\circ$;
- перепад давления на форсунке $\Delta P=0,5 \text{ МПа}$;
- площадь сечения $1,8869 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- коэффициент трения с $\lambda = 0,03245$.

При гидравлических исследованиях работы форсунок необходимо определить коэффициенты расхода форсунок, корневые углы факела распыленной жидкости и распределение расходонапряженности по сечению факела. Для холодных испытаний узлов и агрегатов ЖРД используют специальный проливочный стенд. Для подачи реальных компонентов или моделируемой жидкости к испытываемому объекту используется вытеснительная система подачи. Рабочим телом вытеснения являются сжатый воздух или азот. В качестве моделируемых жидкостей при холодных испытаниях РД применяются дистиллированная вода, водно-спиртовой раствор или другие жидкости. В состав проливочной установки входят бак с рабочей жидкостью, магистраль повода жидкости из бака к форсунке или смесительной головке РД, система вытеснения жидкости из бака сжатым газом, запорная арматура, средства изменения давлений, массы, прошедшей через форсунку или смесительную головку жидкости и времени.

Гидравлическая система испытательного стенда выполняется в виде замкнутого контура по схеме: расходная емкость – всасывающий трубопровод – насос – напорный трубопровод – испытуемое изделие – расходная емкость.

Для подобия двух и большего количества гидродинамических процессов должны быть одинаковыми одноименные коэффициенты Eu и Re . Таким образом, гидродинамическое подобие магистралей компонентов топлива в двигательной установке и на стенде будет достигнуто соответствием коэффициентов:

$$Eu = \frac{P^*}{\rho C^2} \text{ и } Re = \frac{CL}{\nu}$$

где C – скорость; ν – кинематическая вязкость; L – диаметр сопла форсунки; ρ – плотность; P – давление

Для Керосина ($T=293 \text{ K}$):

Кинематическая вязкость $\nu = 0,00000182 \text{ м}^2 / \text{с}$, плотность $\rho = 819 \text{ кг} / \text{м}^3$

$$Re = \frac{29,11 * 1,55 * 10^{-3}}{0,00000182} = 24791,5$$

$$Eu = \frac{0,4 * 10^6}{819 * 29,11^2} = 0,576$$

$$C = \frac{\dot{m}}{\rho F_c} = \frac{0,06765}{819 * 2,837 * 10^{-6}} = 29,11 \text{ м} / \text{с}$$

Для Метана ($T=293 \text{ K}$):

Кинематическая вязкость $\nu = 0,00001168 \text{ с}^2 / \text{с}$, плотность $\rho = 668,2 \text{ кг} / \text{м}^3$.

$$Re = \frac{186,8 * 1,55 * 10^{-3}}{0,00001168} = 24790$$

$$C = \frac{\dot{m}}{\rho F_c} = \frac{0,0563}{668,2 * 2,837 * 10^{-6}} = 186,8 \text{ м} / \text{с}$$

$$Eu = \frac{13,43 * 10^6}{668,2 * 186,8^2} = 0,576$$

Найденные коэффициенты Eu и Re равны, следовательно, гидродинамические процессы в магистралах компонентов топлива в двигательной установке и на стенде подобны и удовлетворяют требованиям для работы двигателя.

Библиографические ссылки:

1. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. И доп./ Под ред. Д.А. Ягодникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 488с.:
2. Салич В.Л., Шмаков А.А., Ваулин С.Д. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги. Уч. пособие. – Челябинск: ЮУрГУ., 2006. – 51 с.
3. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др.; под ред. В.М. Кудрявцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 703 с.
4. Семкин Е.В. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования центробежной форсунки ракетного двигателя тягой 13 Н. Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение», 2012. С. 4-12.
5. Салич В.Л. Экспериментальные исследования по созданию ракетного двигателя малой тяги на топливе «газообразный кислород + керосин» // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 4. С. 129-140.

© Манохина Э.С., Кудрявцев Н.А, Сычев М.О., Журавлев В.Ю., Шикарев М.А., 2024

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ И ТЕХНОЛОГИИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ, ИЗГОТОВЛЕННОГО СПОСОБОМ SLM-ПЕЧАТИ

Г. А. Кирушкин *, В. В. Алексеенко, В. И. Шестерня.

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

*E-mail: kirushkingrisha@mail.ru

Представлены особенности методики и технологии стендовых испытаний ракетного двигателя малой тяги – демонстратора, изготовленного по технологии SLM-печати.

Ключевые слова: ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии, огневые испытания, стенд для огневых испытаний, стендовое оборудование.

Цель наземной отработки РДМТ заключается в обеспечении требуемых уровней надежности двигателей наиболее экономически доступными средствами, что достигается частичной заменой реальных летных испытаний стендовыми. Из этого следует, что результаты стендовых испытаний могут быть достоверными только при их полном соответствии условиям эксплуатации. Для этого должно быть соблюдено статическое и динамическое подобие или имитация условий летных испытаний изделий на стенде.

Поскольку количество испытаний ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) в натуральных условиях эксплуатации (летных испытаниях) весьма ограничено, а в большинстве случаев вообще исключается вследствие их высокой стоимости, следует добиваться предельной эффективности их наземной отработки. Эффективность наземной (стендовой) отработки обеспечивается имитацией условий натуральных испытаний и учетом влияния всех эксплуатационных факторов, воздействующих на достоверность оценки показателей надежности при конструкторской отработке в наземных условиях. Особое место в вопросах достижения эффективности испытаний занимают требования по обеспечению точности и достоверности результатов испытаний.

Реализация сложной экспериментальной программы требует специального стендового оборудования, наличия совершенной системы телеметрического контроля, включая измерительную аппаратуру, отработка запуска и выключения РДМТ высотных ступеней возможна при создании таких стендовых систем, как барокамеры с вышибными заглушками, вакуумные системы и установки в виде эжекторов и т. п.

Рассматривая динамику РДМТ в полете на маршевом режиме, в предпусковой период, при запуске и при выключении, можно прийти к выводу, что каждый из этих режимов характеризуется комплексом определенных факторов. Так, например, контроль за условиями окружающей среды и температурным режимом, которые определяются в основном атмосферными условиями или микроклиматом стартового сооружения, характеризуют предпусковой период и запуск двигателя.

Известно, что создание РДМТ во многом базируется на результатах экспериментальной отработки опытных образцов двигателей и эмпирической интерпретации теоретических закономерностей гидрогазодинамики и химической кинетики.

При испытаниях РДМТ импульсные режимы его работы приводят к возбуждению колебаний в системах испытательного стенда, которые в общем случае способствуют получению недостоверных оценок характеристик двигателя по результатам испытаний. Волновые явления в топливных магистралях приводят к различию между требуемым и фактическим характером рабочего процесса, а также заданными и фактическими значе-

ниями давлений компонентов топлива на входе компонентов в двигатель. Колебания элементов тягоизмерительного устройства искажают оценки текущих значений тяги и характера ее изменения во времени.

Исключение влияния колебательных процессов в стендовых системах на результаты огневых испытаний РДМТ в импульсных режимах является важным условием для организации этих испытаний [1].

Проектирование, термодинамические и газодинамические расчеты камеры двигателя-демонстратора выполнялись 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 [2,3].

Разработанный двигатель-демонстратор имеет следующие технические характеристики:

- тяга $P = 200$ Н;
- окислитель O_2 (кислород – газ, $T = 298$ К);
- горючее CH_4 (метан – газ, $T = 298$ К);
- массовый расход окислителя $\dot{m}_o = 0,04316$ кг/с;
- массовый расход горючего $\dot{m}_r = 0,02439$ 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.

При подготовке двигателя к испытаниям производится выполнение установленной последовательности действий по определению параметров двигателя.

Для оценки характеристик РДМТ требуется определять текущие значения тяги и характер ее изменения во времени. Этот параметр является основным при оценке качества РДМТ, и к точности его определения предъявляют повышенные требования. Отмечается, что в настоящее время для реализации изложенных требований отсутствуют стандартные средства измерения, позволяющие с необходимой точностью измерять мгновенные значения тяги. Поэтому при организации испытаний РДМТ необходимо разрабатывать и использовать специальные измерительные средства и методы измерения [4].

Размещение всех узлов и элементов стенда производится в соответствии с разработанной схемой. Фиксируются шкафы хранения газовых баллонов, затем происходит установка заправляемых емкостей «Г» и «О». Далее размещается и фиксируется стальная часть трубопроводов на двух опорах, устанавливаются вентили на стальные трубы.

Гибкие магистрали прокладываются от стальной части к баллонам «Г» и «О», от стальной части к огневому щиту и от компрессорной станции к стальной части трубопровода. Затем устанавливаются редукторы ВД на вентили «Г» и «О», устанавливаются манометры на трубопроводы и РДМТ на огневой щит.

Процесс подготовки испытательного стенда к эксплуатации проходит следующим образом: проводится проверка подачи электропитания, программного обеспечения и проверка на получение данных с датчиков давления, температуры и расходомеров. Затем, при выявлении неисправностей проводится замена программы или проводится допустимый ремонт в полевых условиях, в зависимости от неисправности. Так же проводится проверка системы видеотрансляции и аварийной остановки подачи компонентов.

После подготовки стенда проводят испытания на герметичность собранных магистралей методом мыльного раствора и звукового анализа совместно с открытым электроклапаном. После всех проверок испытательный стенд готов к проведению огневых испытаний образцов РДМТ.

Циклограмма работы двигателя состоит из 5 включений двигателя. Перед запуском магистрали подачи компонентов продувают воздухом 200 с. Далее окислитель и горючее попадают в камеру сгорания двигателя РДМТ и подается управляющий сигнал с пульта управления на работу блока зажигания, подается напряжение на электросвечи и проис-

ходит воспламенение компонентов топлива. Двигатель работает на основном режиме. После работы двигателя на основном режиме в течении 1,5 с подается команда на останов, закрываются электроклапана окислителя и горючего и компоненты прекращают поступать в камеру сгорания. Затем снова магистрали подачи компонентов продувают воздухом в течение 200 с.

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 ($p_k = 1$ МПа). При этом достигнутое 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).

После демонтажа стенда был проведен внешний осмотр поверхностей двигателя (дефектация изделия). При этом обнаружены незначительные дефекты:

- на свече зажигания присутствовал незначительный нагар;
- на поверхности входных каналов смесительной головки замечено изменение цвета соответствующий температуре нагрева;
- в зоне соединения камеры сгорания и смесительной головки присутствовали тонкие полосы цвета побежалости металла;
- в зоне критического сечения и на внутренней поверхности расширяющейся части сопла имеются дефекты цветов побежалости, соответствующие температурному нагреву.

Однако эти поверхностные дефекты не являются критичными и позволяют провести повторное испытание двигателя.

Таким образом, первые стендовые испытания РДМТ, изготовленного методом SLM-печати, прошли удовлетворительно и свидетельствуют о перспективе использования аддитивных технологий в ракетном двигателестроении.

Библиографические ссылки

1. Назаров В. П., Пиунов В. Ю., Яцуненко В. Г., Савчин Д. А. Особенности испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 339–354.

2. Акбулатов, Э. Ш. Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии / Э. Ш. Акбулатов, В. П. Назаров, Е. В. Герасимов // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т. 24, № 4. – С. 682-696. – DOI 10.31772/2712-8970-2023-24-4-682-696. – EDN QTCXOU.

3. Фоменко А. А. Изготовление камеры ракетного двигателя методом аддитивных технологий / А. А. Фоменко, В. В. Гордеев, П. А. Бривкальн [и др.] // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции. Красноярск, 2022. С. 205-207.

4. Шемет Д. В. Проектирование системы измерения тяги для испытаний двигателей, изготовленных методом аддитивных технологий / Д. В. Шемет, И. А. Батранюк, Р. В. Коваль // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика: Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2023. С. 164-169.

© Кирюшкин Г. А., Алексеенко В. В., Шестерня В. И., 2024

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПЛАНЕРА ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ «БУРАН» В ПРОЦЕССЕ НАЗЕМНОЙ ПОДГОТОВКИ К ПЕРВОМУ 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
E-mail: emd1958@mail.ru

В данной статье основное внимание уделено исследованию разработанных методов, средств и технологии неразрушающего контроля (НК) материалов и составных частей планера многоразового орбитального корабля «Буран» перед первым полетом

Ключевые слова: орбитальный корабль, углерод-углеродный композиционный материал, неразрушающий контроль, методы, средства, технологии, теневой метод, дефектоскопы, герметичность, негерметичность

Орбитальный корабль (ОК) «Буран» был многоразовым космическим кораблем, предназначенным для полета в космосе и в атмосфере Земли, что естественно отразилось на решении задач неразрушающего контроля (НК) для обеспечения надежности и безопасности при выполнении программы полета.

Особенностью конструкции ОК «Буран» являлось, то, что она должна была надежно работать в условиях комбинированного воздействия высоких температур, плазмы, статических, динамических, вибрационных и акустических нагрузок. Поэтому разработчики вынуждены были создать и использовать целый ряд новых конструкционных, жаропрочных и теплозащитных материалов, а для этого потребовалось создать новое технологическое оборудование, включая методы, средства и технологии контроля по всем жизненным циклам ОК «Буран».

В условиях того времени обеспечение надежности ОК потребовало выявлять не только дефекты сплошности и оценивать их геометрические размеры, снижающие несущую способность изделия, но и диагностировать состояния, предшествующие появлению этих дефектов. Именно поэтому, помимо традиционных задач дефектоскопического контроля целостности материалов и конструкций, появилась насущная необходимость качественной и количественной оценки физико-механических параметров объектов контроля, таких, как прочность, плотность, модуль Юнга и др. При этом погрешность определения большинства этих параметров диктовались требованиями надежности ОК «Буран» не должна была превышать 10% [1].

Впервые в отечественной практике был определен физически обоснованный уровень допустимых дефектов для материалов и конструкций, периодичность контроля для каждого этапа жизненного цикла ОК. Это предопределило выбор существующих и необходимость разработки новых средств контроля, поиск информативных параметров физических полей и излучений, используемых в методах контроля для оценки и прогнозирования технического состояния деталей и агрегатов. Для контроля ОК «Буран» использовались все имеющиеся в мировой практике виды НК, в том числе ранее не применявшиеся в промышленности.

Создание и внедрение технологий НК для планера ОК «Буран» потребовало решить следующие задачи:

– установить основные закономерности взаимодействия физических полей и излучений, используемых в НК, с новыми типами материалов и конструкций, позволяющие оценивать их техническое состояние;

- исследовать и оптимизировать существующие и разработать необходимые новые средства НК материалов и конструкций для определения их физических, структурных и дефектоскопических характеристик с требуемой точностью и достоверностью;
- обеспечить контролепригодность деталей, узлов и конструкций изделий для условий производства, испытаний и эксплуатации;
- создать компьютерную систему сбора, хранения, обработки и анализа результатов НК с возможностью оценки и прогноза вероятных изменений технического состояния изделия и его систем, своевременной доработки конструкторской документации и оптимизации регламента работ по НК.

Для ОК «Буран» была разработана и внедрена система управления качеством средствами НК, являющаяся составной частью общей системы управления качеством и охватывающая весь жизненный цикл изделия.

Разработанная технология НК полностью обеспечила дефектоскопический контроль и контроль физико-механических свойств (плотность, прочность, модуль Юнга и др.), которые ранее определялись лишь по образцам с помощью разрушения. Контроль осуществлялся с использованием как отдельных методов и средств, так и их различных сочетаний.

В области радиационного контроля (радиационной дефектоскопии) были разработаны алгоритмы формирования и обработки изображений, повысившие чувствительность и разрешающую способность томографической системы. Основой алгоритмов служат методы обратного проецирования с фильтрующей сверсткой. Высокочастотная фильтрация, использующая операцию двойного дифференцирования, позволила сократить время обработки и улучшить качество изображения. В результате этих исследований был создан рентгеновский вычислительный томограф ВТ-300 [1, 2].

В тепловом НК были учтены новые закономерности распространения тепловой энергии в анизотропных средах, разработаны способы бесконтактного импульсного нагрева, созданы цифровые программируемые тепловизионные измерительные системы с расширенным спектральным диапазоном.

В радиоволновом НК созданы новые способы формирования и регистрации СВЧ-полей на базе широкополосных генераторов полосковых структур и цифровых способов обработки информации, состоящей из многих параметров. Это позволило изготовить и внедрить принципиально новые средства, такие, как влагомер СВ-10АМ, толщиномер СТ-10И, плотномер СП-10А [1, 2].

В вихретоковом НК были исследованы и использованы новые способы пространственного формирования сканирующих электромагнитных полей и цифровые методы обработки многомерных сигналов связанных с контролируемыми параметрами исследуемой среды сложными нелинейными функциональными зависимостями. В этой области был создан базовый вихретоковый дефектоскоп ВД-65, визуализирующий электромагнитное поле в объекте контроля, что дало возможность видеть дефект и определять его геометрические размеры [1,2].

В области акустического НК были разработаны эффективные способы формирования акустических полей заданной формы, отражения и приема акустических сигналов, систем звуковидения и методы распознавания типов дефектов и оценки их размеров.

Для вибродиагностики были созданы новые типы преобразователей, способы повышения чувствительности, точности и достоверности контроля, способы бесконтактного измерения вибрации, дозированного удара с применением лазерных, волоконно-оптических и других методов [1, 2].

Были изучены и применены ряд новых методов, в частности электромагнитной эмиссии, используемой для прогнозирования ресурса теплозащитных покрытий, метод динамического индентирования для измерений механических свойств материала демпфи-

рующей подложки, плиточной теплозащиты и физико-механических параметров металлов [1, 2].

С использованием акустических, тепловых, вихретоковых, радиационных, СВЧ-полей и излучений разработано, изготовлено и испытано более 96 типов средств НК различного назначения. Большинство их стали прототипами серийных приборов, не уступающих лучшим зарубежным образцам, что позволило на качественно новом уровне начать переоснащение средствами контроля отечественной промышленности [1].

Новые и наиболее сложные задачи были решены в области теплозащитного покрытия.

На ОК были применены разные виды теплозащиты.

Плиточное теплозащитное покрытие (ПТП), состоявшее из 10 новых компонентов разработанных в ОМПП «Технологии», ранее в промышленности не применявшихся. Эти компоненты позволили крепление ПТП к аэродинамической поверхности конструкции ОК. ПТП были созданы из тонкого кварцевого волокна. Была также создана гибкая теплозащита. Также был разработан в кооперации ВИАМ с НИИГрафит, НПО «Молния» и ВНИИВ углерод-углеродный композиционный материал Гравимол (а в дальнейшем «Гравимол-В»), из которого были изготовлены жаропрочные носки фюзеляжа и крыла (жесткая теплозащита) [1, 3]. Основные места расположения некоторых теплозащитных покрытий показаны на рис.1.

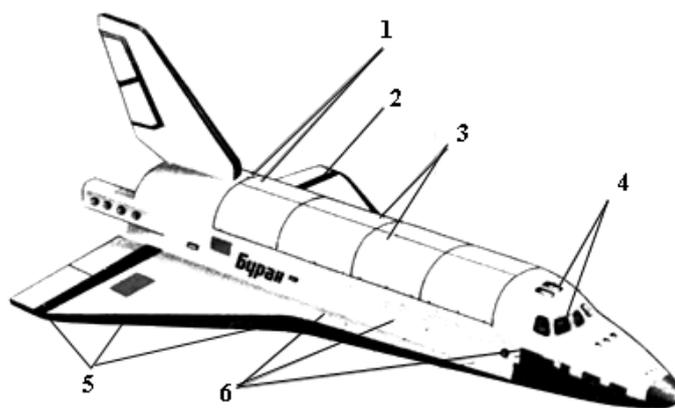


Рис. 1. Теплозащитные покрытия на орбитальном корабле «Буран»:

1 – высокотемпературные щеточные и ленточные уплотнения; 2 – элероны из абляционных материалов; 3 – створки отсеков полезного груза из полимерных композитов; 4 – остекление кабины; 5 – углерод-углеродный материал Гравимол; 6 – керамическая теплозащита

В силовых конструкциях планера общей поверхностью более 120 м² впервые на практике был широко применен углепластик [1].

В табл. 1 приведены основные контролируемые параметры и методы контроля их по плиточной теплозащите и показано как изменился перечень контролируемых параметров и применявшиеся для их контроля физические методы.

Также можно привести далеко не традиционно перечни контролируемых параметров для углепластиков, материала Гравимол для теплозащиты.

Был разработан и внедрен комплекс межотраслевых нормативно-технологических документов распространенный на кооперацию создателей ОК «Буран», устанавливающий единые правила и нормы метрологического сопровождения средств НК, стандартных образцов и методики аттестации и метрологического обслуживания средств НК.

Разработали полномасштабную базу данных (БД) по НК, которая хранила всю информацию по деталям, агрегатам и узлам, начиная с этапа проектирования и кончая их утилизацией. Упорядоченная информация БД использовалась для диагностики деградации материалов, конструкций и позволяла с высокой степенью надежности прогнозировать их техническое состояние.

В табл. 2 представлена вероятность выявления дефектов для различного браковочного уровня дефектации методов НК в металлоконструкциях ОК «Буран».

Из приведенных данных в табл. 2 следует, что для достижения заданного уровня вероятности выявления дефектов необходимо либо проектировать изделие таким образом, чтобы реализовать в нем уровень контролепригодности, обеспечивающий максимальную чувствительность методов НК, либо увеличивать уровень допустимых дефектов. Для условий космической промышленности необходимо было задействовать НК на самых ранних стадиях проектирования, чтобы обеспечить максимальную контролепригодность.

Таблица 1

Основные контролируемые параметры и методы НК, используемые для контроля плиточной теплозащиты [1]

| Объект контроля | Контролируемый параметр (свойство) | Метод контроля |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Высокопористый материал плитки | Прочность | -ультразвуковой, -импульсный бесконтактный, -динамического индентирования, -радиографический |
| | Инородные включения Неравноплотность материала Содержание кристобалита | -радиографический, -радиоволновый, -радиометрический |
| Плитка с покрытием и поверхностью приклейки (6-я поверхность) | Толщина покрытия Целостность покрытия | -радиометрический, -радиоволновый, -газожидкостной, -спиртовой, -акустико-эмиссионный |
| | Коэффициент поглощения Прочность материала поверхности склеивания Зажиренность поверхности | -оптический, -статического индентирования, -люминесцентный |
| Демпфирующая подложка | Упругие свойства растяжения (неравножесткость) | -УЗК импульсный бесконтактный, -динамического индентирования, -радиометрический |
| | Толщина подложки | -вихретоковый, -инструментальный |
| | Локальная плотность материала | -радиометрический, -радиоволновый |
| Плитка с наклеенной под- | Толщина клеевого слоя | -радиографический |
| Плитка на борту | Прочность на отрыв | - акустико-эмиссионный |
| | Расслоение в подложке | -электромагнитных сигналов, -механорезистивный |
| | Деформация подложки | -инструментальный |

| | |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Благосодержание | -тепловой, - радиоволновый, -емкостный, -нейтронный |
| Зазоры и выступания | -инструментальный, -оптический |
| Коэффициент поглощения солнечной радиации | -оптический |

Таблица 2

Вероятность выявления дефектов различными методами на металлоконструкциях ОК «Буран» [1]

| Вид контроля | Вероятность выявления дефектов при различных требованиях к чувствительности | | |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------|
| | Предельная чувствительность метода контроля | Превышение величины дефекта по отношению к предельному, % | |
| | | 50...60 | 100...120 |
| Радиографический | 0,5...0,75 | 0,75...0,9 | 0,9...0,95 |
| Вихретоковый | 0,65...0,75 | 0,7...0,95 | 0,95...0,97 |
| Магнитный | 0,65...0,75 | 0,8...0,9 | 0,9...0,95 |
| Акустический | 0,4...0,75 | 0,7...0,85 | 0,9...0,93 |
| Проникающих веществ | 0,8...0,9 | 0,9...0,95 | 0,95...0,98 |
| Визуальный | 0.5...0.7 | 0.75...0.85 | 0.85...0.9 |

На практике было установлено, что вероятность выявления дефектов увеличивается для различных сочетаний методов НК.

Некоторые сочетания для ОК «Буран» представлены в табл. 3.

Таблица 3

Вероятность выявления минимально допустимых дефектов при различных сочетаниях методов НК [1]

| Сочетание методов НК | Вероятность выявления предельных дефектов | Местоположение дефектов (трещин) |
|------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
| Радиографический - акустический | 0,7...0,9 | внутренние |
| Магнитный - акустический | 0,75...0,9 | подповерхностные |
| Вихретоковый - проникающих веществ | 0,85...0,93 | поверхностные |

Из табл. 3 видно, что вероятность выявления дефектов при использовании двух методов увеличивается, но это обстоятельство приводит к значительному временному и финансовому удорожанию НК.

Удельный вклад в общую трудоемкость НК отдельных видов контроля для различных этапов жизненного цикла ОК «Буран» представлен в таб. 4.

Таблица 4

Относительная трудоемкость различных методов в общем объеме работы по НК ОК «Буран» [1]

| Методы контроля | Относительная трудоемкость контроля, % | | |
|-----------------|----------------------------------------|---------------|------------------|
| | в производст- | на испытаниях | при эксплуатации |
| Радиационные | 83 | 65 | 50 |

| | | | |
|---------------------------------|-----|----|----|
| Акустические | 8 | 4 | 10 |
| Вихретоковые, магнитные, капил- | 5,5 | 14 | 5 |
| Визуально-оптические | - | 12 | 12 |
| Тепловые, радиоволновые | 3,5 | 3 | 23 |

Из табл. 4 видно, что в условиях производства традиционные методы контроля (радиационные, акустические) превалировали над новыми для промышленности методами (оптические, тепловые, радиоволновые, акустическая эмиссия и др.), однако в условиях эксплуатации эти соотношения меняются, что позволило резко снизить трудоемкость контроля.

Для выявления наиболее эффективного метода НК изделий из углерод-углеродных композиционных материалов были проведены предварительные исследования. При этих исследованиях использовали следующие низкочастотные акустические методы, опробование которых проводилось на образцах с искусственными дефектами: амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый способы импедансного метода (дефектоскопы АД-40И и ИАД-3); амплитудный способ импедансного метода, реализуемого с использованием раздельно-совмещенного преобразователя (дефектоскопы АД-60С, АД-10Уи АЧД-2М); фазовый и временной способы велосиметрического метода (дефектоскоп АД-10У); спектральный способ метода свободных колебаний (дефектоскопы АД-60С и АД-50У), а также амплитудный способ метода прохождения в теновом варианте (дефектоскопы УД-23УМ, ДУК-66ПМ, УДМ-1Ми УДМ-3). Последний метод для краткости стали называть теновым методом [3, 4].

По результатам предварительных исследований были выявлены наиболее эффективные методы контроля полуфабрикатов и деталей из материалов с углеродной матрицей импедансный метод в двух его вариантах – при использовании совмещенного и раздельно-совмещенного преобразователей; метод свободных колебаний, реализуемый с использованием преобразователя с микрофонным приемником, и теновой метод, при реализации которого используются преобразователи с эластичными протекторами.

Результаты производственных испытаний системы ориентации при контроле крупногабаритной детали сложной формы («кок»), произведенных на Московском электродном заводе, позволили сделать вывод о высокой эффективности системы [3].

Наиболее достоверным и надежным методом контроля полуфабрикатов и изделий из углерод-углеродных материалов в достоверный и надежный метод НК полуфабрикатов и изделий из углерод-углеродных композиционных материалов в условиях производства – акустический теновой метод [3].

Кроме НК тепловой защиты проводился контроль герметичности, который является одним из видов дефектоскопии. Этот вид контроля занимал значительное место в производстве ОК. На герметичность проверялись элементы конструкции ОК, которые имели существенное различие в габаритах, материалах, степени завершенности в изготовлении, условиях эксплуатации и допустимых нормах негерметичности. Что и стало определяющим в выборе основных методов контроля герметичности: изобарный (для определения суммарной массы воздуха, натекающего или вытекающего через разъемные и неразъемные соединения, стыки, крепеж и уплотнения планера), акустический (для контроля герметичности уплотнений планера), компенсационно-дифференциальный (для измерения абсолютных значений и приращений термодинамических параметров, определяющих состояние рабочего газа), масс-спектрометрический (для контроля герметичности пневмогидравлических агрегатов и систем) и радиационных индикаторов (для контроля герметичности пневмогидравлических систем и агрегатов в условиях возросших требований - малые допустимые нормы негерметичности гидротопливных систем, заправленных рабочими средами, с необходимостью количественной их оценки). Эти

методы НК регистрировали проникающие через течи вещества и позволяли выявить сквозные дефекты, не поддающиеся другим методам [5].

Рассмотрим один из этих методов - изобарный метод контроля герметичности. Этот метод заключается в поддержании постоянного давления или разрежения в планере.

Расход наддуваемого или откачиваемого воздуха определяется расчетным путем по перепаду давления в пневмосистеме на сужающем устройстве при установившемся давлении в планере с учетом температуры воздуха.

Допустимая суммарная негерметичность планера ОК «Буран» при нормальных условиях ($P_0 = 760$ мм рт.ст., $T_0 = 288^\circ\text{K}$) и при разрежении внутри фюзеляжа определяется перепадом давления

$$\Delta P = P_{\text{пл}} - P_0,$$

где $P_{\text{пл}}$ – давление в планере.

Зависимость приведенной суммарной негерметичности от перепада давления [5] показана на рис. 2.

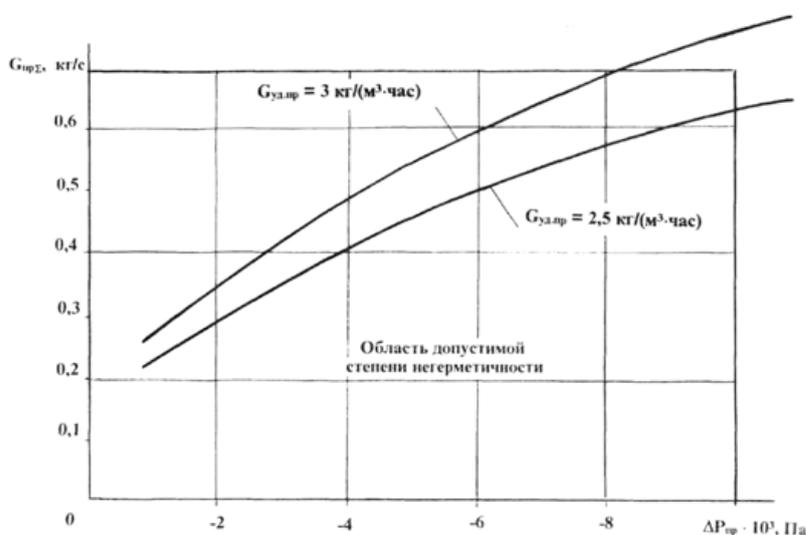


Рис.2. Зависимость суммарной степени негерметичности планера от перепада давления

При постоянном перепаде давления расход воздуха $G_{гр}$ служит мерой негерметичности.

На этапе изготовления отдельных агрегатов конструкции ОК «Буран» (крыло, вертикальное оперение и др.) допускаемая норма негерметичности - $2,5$ кг/(м³·ч), что при объеме планера 850 м³ составляло $G_{гр} \leq 2550$ кг/ч. [5]

Для определения суммарной негерметичности конструкции планера ОК был создан специальный стенд (рис. 3).

Для эжекции воздуха использовался сжатый воздух заводской магистрали. Эжектор рассчитан на создание разрежения в планере до $P = - 9,8 \times 10^3$ Па при допустимой величине негерметичности.

В трубопроводе стенда размещено мерное сопло, которое служит для определения расхода воздуха.

Массовый расход определялся по формуле

$$G = \alpha \varepsilon \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \sqrt{2 \Delta P_c \rho}, \quad (2)$$

где α – коэффициент расхода,

ε – коэффициент расширения воздуха,

d – диаметр мерного сопла, ΔP_c - перепад давления на сопле,

ρ – плотность воздуха.

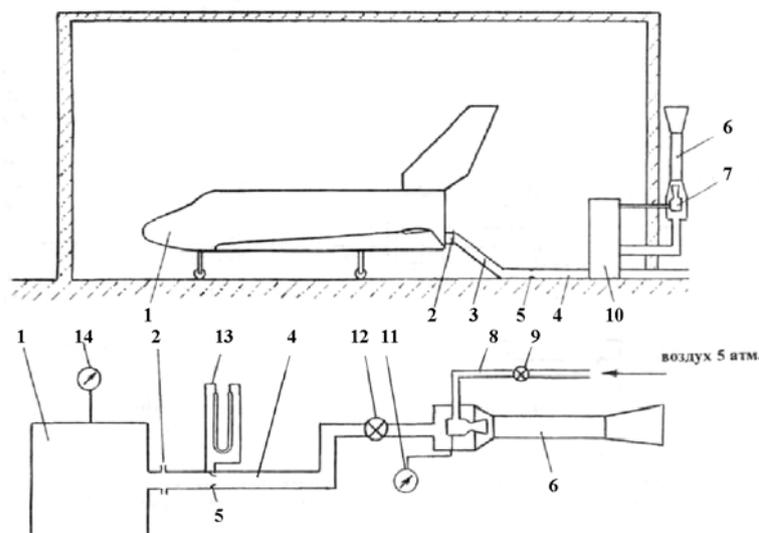


Рис. 3. Схема экспериментального стенда:

1 – изделие; 2 – разъем; 3,4 – трубопровод; 5 – мерное сопло; 6 – камера смещения; 7 – сопло; 8 - трубопровод высокого давления; 9 – редуктор; 10 – пульт; 11,14 – манометр; 12 – задвижка; 13 – пьезометр [5]

Условия работы корпуса планера ОК характеризуются как положительным, так и отрицательным перепадом давления в нем, обусловленным профилем полета. Регулирование давления в корпусе планера осуществляется створками системы наддува и вентиляции. В этой связи крайне важно наличие информации о суммарной величине негерметичности планера, учет которой позволяет повысить точность регулирования давления в корпусе планера.

Вместе с тем, значение расхода воздуха определяемого суммарной негерметичностью через соединения планера, необходимо для расчета энергетических характеристик технологического оборудования, обеспечивающего условия полета по давлению в корпусе планера в наземных условиях в течение длительного времени, требуемого для определения локальной негерметичности уплотнений створок и крышек люков.

Рассмотренный метод был впервые применен для определения суммарной негерметичности планера ОК «Буран».

Все остальные методы контроля на герметичность планера хорошо рассмотрены в источнике [5].

И последнее о чем надо рассказать в этой статье это неразрушающий контроль бортовых систем ОК «Буран».

В процессе наземной подготовки ОК «Буран» к первому полету аппаратура его бортовых систем подвергалась входному контролю пред установкой на планер ОК в лабораториях входного контроля с помощью специализированной КПА в объеме автономных испытаний (АИ). В ходе АИ контролировались целостность электрических цепей и сопротивление изоляции электрически разобщенных цепей, функционирование и допусковый контроль точностных параметров, а также устранялись выявленные неисправности. По результатам входного контроля судили об исправности бортовой аппаратуры и возможности ее установки в ОК.

Штатные бортовые системы также устанавливались на комплексный стенд КС-ОК для проведения электрических испытаний, о чем было сказано в источнике [6]. Все бортовые системы для КС-ОК подвергались входному контролю, так же как и системы, устанавливаемые на штатное изделие.

Для ОК «Буран» была создана целая система контроля и диагностики (КиД), которая объединялась в единое целое для получения максимальной информации о техническом состоянии ОК и возможности его эксплуатации по техническому состоянию. Информация КиД закладывалась в общую единую систему управления бортовыми системами с целью минимизировать влияние любой нештатной ситуации.

Заключение

1. Правильность выбора методов, средств и эффективность разработанных технологий НК планера была полностью подтверждена в результате успешного полета ОК «Буран».

2. Технология неразрушающего контроля ОК «Буран» позволила с высокой надежностью контролировать более 50 физических параметров, характеризующих состояние материалов, конструкций, стабильность различных технологических процессов и обеспечить необходимый уровень качества.

3. После полета многоразового орбитального корабля «Буран» из 38 тыс. теплозащитных плиток отвалились всего шесть, а осмотр носового кока фюзеляжа и передних кромок крыльев показал, что все детали из углерод-углеродного композиционного материала могут быть использованы и при дальнейших полетах.

4. Свою практическую эффективность подтвердили и методы контроля герметичности при создании и производстве.

5. Контроль бортовых систем ОК так же дал положительные результаты в результате своей работы на орбите и при автоматической посадке.

6. Стоимость действующей технологии контроля ОК «Буран» составляла примерно 12% сметной стоимости проекта и при учете накопленного опыта вполне могла быть в 1,5...2 раза сокращена для следующих поколений многоразовых ОК.

Библиографические ссылки

1. Коннов, В.В. Технология неразрушающего контроля и технической диагностики орбитального корабля «Бурана» / В.В. Коннов // Авиационно-космические системы: Сборник статей под ред. Г.Е. Лозино-Лозинского и А.Т. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 1997. – С. 174-182.

2. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. /Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение. 2008. 864 с.

3. Мурашов, В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического корабля «Буран» // Авиационные материалы и технологии. 2013. Спецвыпуск - С. 152-157.

4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник /Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение. 1976. Кн. 2. С. 260.

5. Черноусов, В.Н. Методы и средства контроля герметичности конструкции ОК «Бурана» / В.Н. Черноусов // Авиационно-космические системы: Сборник статей под ред. Г.Е. Лозино-Лозинского и А.Т. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 1997. – С. 183-195.

6. Евтифьев, М.Д. 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.

© М. Д. Евтифьев, 2024

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ, РАБОТАЮЩЕГО НА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОМ ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ

В. И. Шестерня*, Р. В. Коваль, Г. А. Кирюшкин

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

*E-mail: shesternyavova@yandex.ru

Представлена разработка конструкции стенда для огневых испытаний РДМТ, работающего на газообразных экологически чистых компонентах топлива: кислород O_2 , метан CH_4 .

Ключевые слова: ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии, огневые испытания, стенд для огневых испытаний.

На этапе технического проектирования в большинстве случаев важно учитывать все конструкторские решения и технологические факторы, влияющие на работоспособность и надежность ракетных двигателей (РД). Надёжность – одна из характеристик качества. Однако в инженерной практике при проектировании и планировании производства расчёты на надёжность производят не во всех случаях. Это объясняется сложностью теории надёжности, отсутствием простых схем, методик расчёта и т.д. Несмотря на опыт, достигнутый в исследовании и проектировании РД, достоверное заключение о надежности созданных двигателей возможно только на основе проведения комплекса испытаний, охватывающих все этапы создания.

Современное состояние теории и практики конструирования РД не позволяет осуществлять разработку нового двигателя, отличающегося от предыдущего схемой, материалами, топливами, более высокими механическими и тепловыми нагрузками и другими параметрами, без испытаний их натуральных образцов в реальных условиях либо в условиях, приближенных к ним. Испытания являются важной частью программ разработки, опытной отработки и создания высокоэффективных, надёжных РД. Основная цель испытаний заключается в получении информации о состоянии испытываемого изделия. В дальнейшем полученная информация используется для решения различных задач.

Стендовые огневые испытания являются основной частью всех видов испытаний. Они проводятся на испытательном стенде, который позволяет воспроизвести с определенной степенью адекватности натурные или ресурсные условия испытаний. При стендовых испытаниях оценивают надежность изделия и выявляют виды и характер разрушения деталей, сборочных единиц и двигателя в целом. Программы стендовых испытаний включают оценку состояния изделий после испытания, обработку результатов измерения, анализ результатов и оформление протокола [1].

При создании ракетных двигателей малой тяги (РДМТ) для космических летательных аппаратов в процессе конструкторской отработки внимание уделяется вопросам методологии стендовых испытаний, техническому оснащению стендов, имитирующих воздействие физических условий космического пространства, а также применению диагностических методов и аппаратуры для проведения различных физических исследований и измерений. В программах обеспечения надежности РДМТ испытания являются важнейшей частью, требующей значительных затрат. Так как количество испытаний РДМТ в натуральных условиях эксплуатации ограничено, следует добиваться предельной эффективности их наземной отработки. Эффективность стендовой отработки обеспечивается

имитацией условий натуральных испытаний и учетом влияния всех эксплуатационных факторов, воздействующих на достоверность оценки показателей надежности при конструкторской отработке в наземных условиях.

Особое место в вопросах достижения эффективности испытаний занимают требования по обеспечению точности и достоверности результатов испытаний. К стендам для огневых испытаний РДМТ предъявляются требования, основные из которых:

- достижение степени соответствия высотных условий;
- создание динамического подобия характеристик систем питания РДМТ компонентами топлива;
- обеспечение соответствия законов изменения входных давлений в двигатель, давлений в камере сгорания;
- обеспечение в заданных пределах значений температуры компонентов топлива.

Большинство РДМТ работают при низких давлениях окружающей среды, поэтому значительный объем испытаний при их отработке следует проводить на стендах, оборудованных вакуумными системами. Для достоверного определения характеристик двигателя во время испытаний необходимо обеспечить соответствие динамических процессов, возникающих в стендовых магистралях, процессам, возникающим в подводящих топливных магистралях в двигательных установках с РДМТ.

Для оценки экономических характеристик РДМТ определяются текущее значение тяги и характер ее изменения во времени. Этот параметр является основным при оценке качества двигателя, и к точности его определения предъявляют повышенные требования.

Следует отметить, что в настоящее время для реализации изложенных требований практически отсутствуют стандартные средства измерения, позволяющие с необходимой точностью измерять мгновенные значения тяги и расходов компонентов топлива. Поэтому при испытаниях РДМТ приходится разрабатывать и использовать специальные измерительные средства и методы измерения [2].

В настоящее время активно развиваются аддитивные технологии изготовления изделий из различных материалов. Одним из актуальных направлений является изготовление изделий из металла. Можно выделить основные проблемы при изготовлении металлических деталей SLM-печати: повышенная пористость, шероховатость поверхностей, дополнительные деформации после отжига и точность изготовлений отверстий малого размера для форсунок.

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 РДМТ в целом.

Функциональное назначение ранее созданного двигателя-демонстратора [3-4] заключается в проведении модельных стендовых испытаний без имитации условий космического пространства. Предусмотрено использование экологически безопасных компонентов топлива: газообразный кислород O_2 (окислитель) и газообразный метан CH_4 (горючее).

Для испытания камеры-демонстратора РДМТ разработан стенд для огневых испытаний, принципиальная электропневмосхема (ЭПС) представлена на рисунке 1. Особенностью огневого стенда является возможность испытания модели РДМТ с измерением рабочих режимных характеристик.

Стендовое оборудование состоит из следующих основных блоков:

- блок бесперебойного электрического питания;
- блок контроля и управления;

- блок системы подачи газообразных компонентов топлива горючего метана и окислителя кислорода в камеру сгорания двигателя;
- блок тягоизмерительного устройства.

Пространственно-габаритное расположение элементов стенда представлено на рисунке 2.

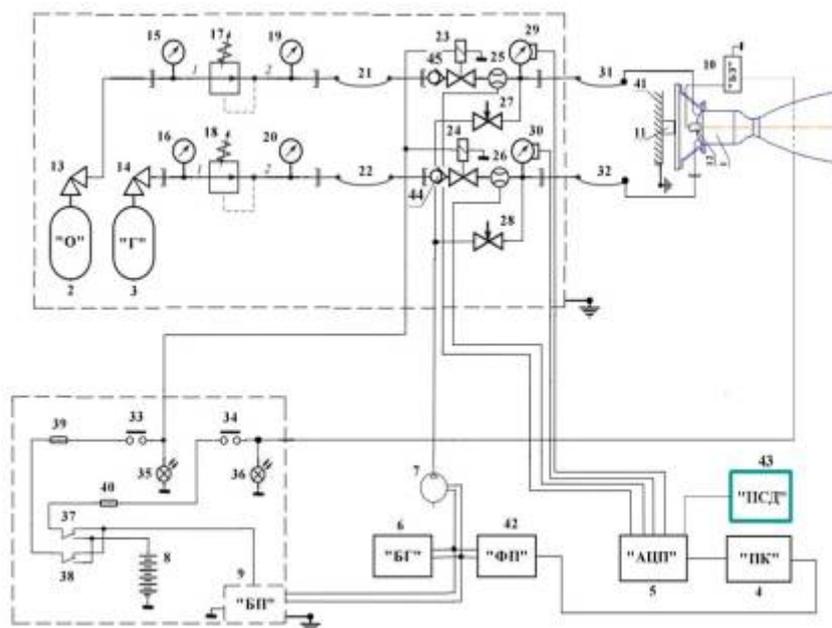


Рис.1. Электропневмосхема стенда

1 – КД; 2 – емкость окислителя; 3 – емкость горючего; 4 – компьютер; 5 – АЦП; 6 – электрогенератор бензиновый; 7 – компрессор воздушный; 8 – батарея аккумуляторная; 9 – блок питания; 10 - блок зажигания; 11 – измеритель силы; 12 – устройство запальное; 13,14 – вентиль угловой; 15, 16, 19, 20 – манометр; 17,18 – редуктор; 21, 22, 31, 32 – рукав гибкий; 23, 24 – клапан газовый электрический; 25, 26 – расходомер газовый; 27, 28 – вентиль; 29, 30 – манометр преобразователь; 33, 34 – выключатель; 35, 36 – индикатор; 37, 38 – переключатель; 39, 40 – предохранитель; 41 – рама стенда; 42 – фильтр питания; 43 – программируемый сенсорный дисплей; 44, 45 – обратный клапан.

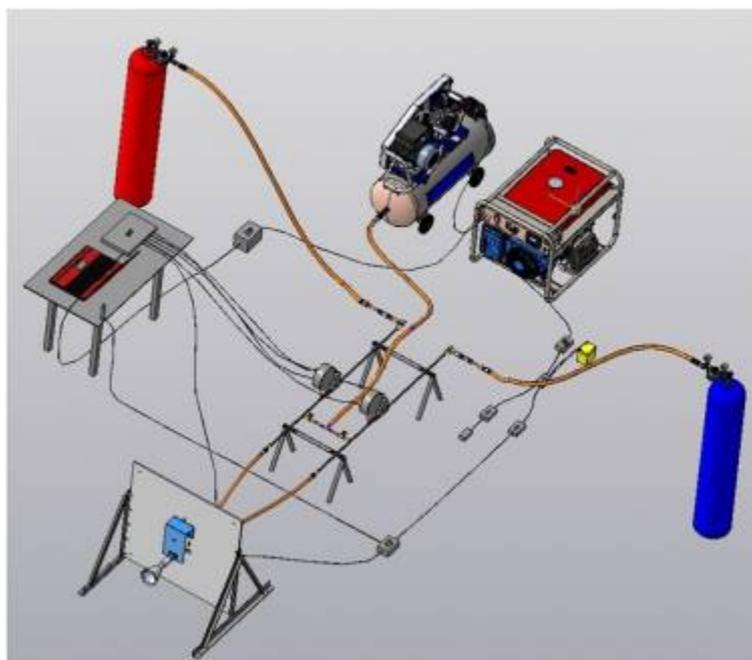


Рис.2. 3D-модель ЭПС стенда

Для обеспечения подачи компонентов спроектированы магистрали, состоящие из баллонов сжатого газа, редукторов давления, электропневмоклапанов. Для воспламенения используется батарея аккумуляторная, блок питания, блок зажигания. Управление пуском стенда осуществляется командой оператора с помощью программы на компьютере. Измерение параметров компонентов по каждой магистрали осуществляется датчиками давления, датчиками расхода. Для измерения тяги двигателя спроектировано тягоизмерительное устройство [5]. Стенд позволяет изменять давление в камере РДМТ в пределах от 0,4 до 1 МПа, что позволяет достигать тяги камеры двигателя от 80 до 200 Н.

Для обеспечения безопасности проведения испытаний спроектирована и изготовлена железобетонная несущая конструкция стенда (рис. 3), состоящая из следующих зон:

- зона баллона окислителя;
- зона баллонов горючего;
- зона оператора;
- зона магистралей;
- зона камеры двигателя.

При подготовке стенда к испытаниям выполняются следующие работы:

- размещение узлов и элементов стенда в соответствии с разработанной схемой;
- фиксация шкафов хранения газовых баллонов, огневого щита на бетонном основании площадки;
- установка заправленных емкостей Г и О в шкафы хранения;
- размещение и фиксация стальной части трубопроводов на двух опорах, установка вентиля на стальные трубы, соединение вентиля стальным тройником;
- прокладка гибких магистралей от стальной части к баллонам Г и О, прокладка гибких магистралей от стальной части к огневому щиту, прокладка гибкого трубопровода от компрессорной станции к стальной части трубопроводов;
- установка редукторов ВД на вентили Г и О, установка РДМТ на огневой щит, установка манометров на трубопроводы;
- стыковка и ручная затяжка резьбовым соединением обратного клапана и электроклапана со стальным трубопроводом по магистрали Г и О;
- стыковка и ручная затяжка резьбовых соединений гибких магистралей по всей линии Г, О и продувки, выходные концы гибких трубопроводов к камере РД остаются герметизированы стальными заглушками;
- прокладка электрических проводов и их соединение с СУ, системой наблюдения, БП, бензогенератором, ПУ, ПК;
- затяжка резьбовых соединений по линиям подачи компонентов Г и О двумя разводными ключами с усилием 40-60 кг.

При стендовых огневых испытаниях реальных двигателей на различных участках магистралей компонентов топлива с высокой частотой регистрируются и обрабатываются более ста параметров: температура, давление, расход, тяга и т.д.

Задачи, решаемые при огневых испытаниях РДМТ, требуют измерения и определения с высокой точностью мгновенных и средних значений параметров, характеризующих условия испытаний и определяющих показатели энергетического состояния двигателя.

Источниками информации являются измерительные приборы для фиксирования установившихся или быстроменяющихся процессов. К ним относятся различного рода датчики замера давления, секундных расходов, температуры, датчики контроля прохождения различных команд. Данная информация со стенда передается к устройствам памяти. По общему объему параметрическая информация является самой значительной. Это позволяет вести практически непрерывную запись всех основных параметров РДМТ, не исключая быстропеременные процессы и их высокочастотные колебания.

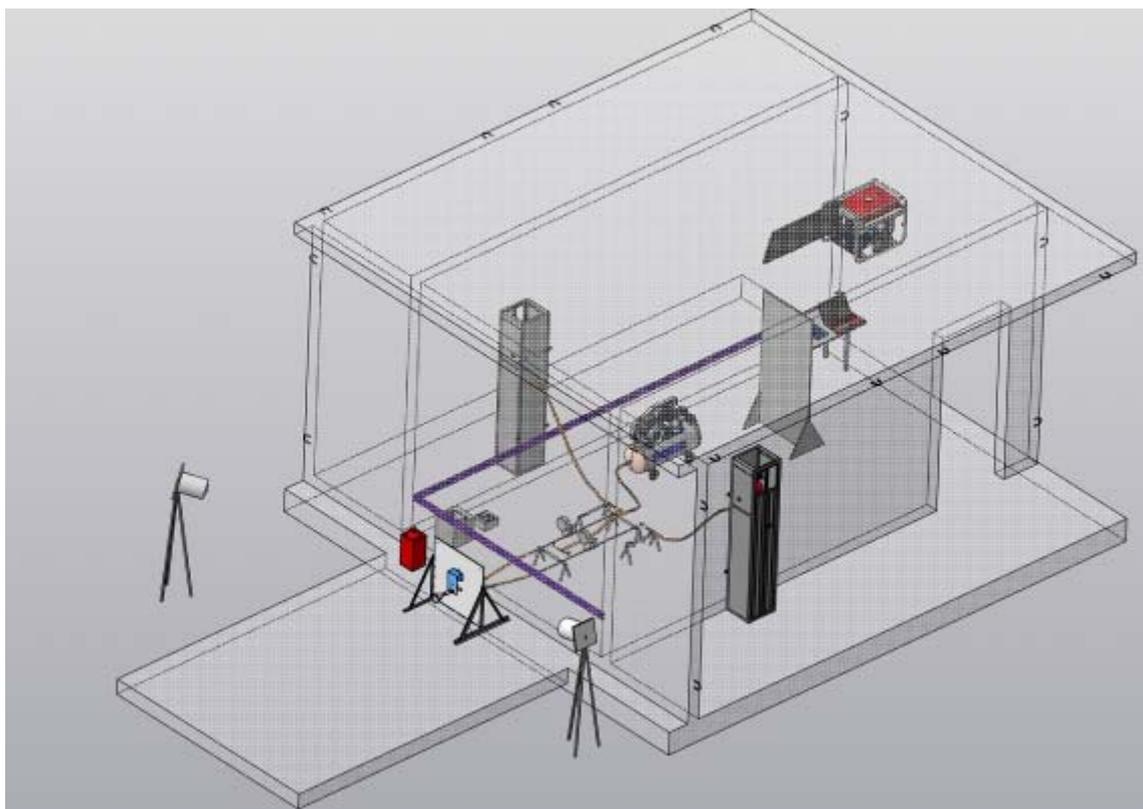


Рис.3. Стенд испытаний ракетных двигателей сибирского аэрокосмического университета

Таким образом, разработанный стенд имеет практическую значимость. Объем информации, полученный во время испытаний, дает практически полное представление о физических процессах и техническом состоянии изделия при его функционировании в любой момент времени, в том числе в момент проявления отказа.

Библиографические ссылки

1. Коломенцев А. И., Краев М. В., Назаров В. П. [и др.]. Испытание и обеспечение надежности ракетных двигателей. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т; Моск. авиац. ин-т. 2006. 336 с.
2. Назаров В. П., Пиунов В. Ю., Яцуненко В. Г., Савчин Д. А. Особенности испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 339-354.
3. Фоменко А. А. Изготовление камеры ракетного двигателя методом аддитивных технологий / А. А. Фоменко, В. В. Гордеев, П. А. Бривкальн [и др.] // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции. Красноярск, 2022. С. 205-207.
4. 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.
5. Шемет Д. В. Проектирование системы измерения тяги для испытаний двигателей, изготовленных методом аддитивных технологий / Д. В. Шемет, И. А. Батранюк, Р. В. Коваль // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2023. С. 164-169.

МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОННОГО ЭТАЛОНИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОРМЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Вотяков К.А., Назаров В.П., Надежин М.Н., Карабонцева М.В., Брижинская Н.В.

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kirillvotyakov_96@mail.ru

Изготовление и монтаж трубопроводов двигателей летательных аппаратов является сложной технологической задачей, связанной с размещением магистралей в ограниченном пространстве по причине плотной компоновки двигателя. В настоящее время данная задача требует большого количества ручного труда и не гарантирует обеспечение оптимальной конфигурации и надлежащего качества продукции.

В статье предлагается решение по автоматизации процесса изготовления трубопроводов, направленное на повышение производительности и качества выпускаемой продукции.

Ключевые слова: производство, технологический процесс, автоматизация, жидкостный ракетный двигатель.

В настоящее время координатно-измерительные машины (КИМ) являются наиболее перспективными средствами измерений размеров, формы и расположения поверхностей. Известно, что в современном производстве экономически развитых стран свыше 80% операций размерного контроля осуществляются на прецизионных КИМ. Многие из операций контроля современных изделий сложной формы в наукоемких производствах и высоких технологиях в силу наличия жестких требований к точности измерений и оперативности их проведения могут осуществляться только на прецизионных КИМ. В ракетно-космическом комплексе прецизионные узлы ракетносителей контролируются только с применением КИМ.

Координатно – измерительные машины набирают популярность среди универсальных средств определения геометрических характеристик деталей (ДСЕ). Применение и последующее внедрение в производство КИМ позволило повысить производительность и значительно снизить трудозатраты.

Совершенствование процесса контроля геометрических характеристик деталей с пространственно сложными поверхностями на предприятиях ракетно-космической промышленности актуально, так как схема измерений обладает высокой гибкостью и высокими точностными показателями, позволяя однообразно определять параметры пространственно сложных поверхностей, такие как длину, ширину, радиус кривизны, положение и ориентацию в пространстве, деформацию или перемещение. Учитывая высокие требования к точности изготовления современных двигателей летательных аппаратов, их узлов и агрегатов и жесткие допуски при стыковке, сборке их узлов и агрегатов, а также высокую степень автоматизации производственных процессов – задача контроля геометрических характеристик стыкуемых конструкций требует создания новых прогрессивных измерительных технологий, методик и их рационального внедрения в серийное производство.

Объемный контроль геометрии сложных деталей и узлов ЖРД достаточно проблематично обеспечить контактным методом, поэтому на их смену приходят новые

технологии с применением высокоточных 3D-сканеров, работающих на специальном программном обеспечении, портативных КИМ с лазерным сканером. 3D-сканер представляет собой автоматизированную машину с подвижной измерительной головкой. Возможность оборудования позволяет произвести оцифровку поверхности и сопоставить данные сканирования с исходной САД-моделью. По результатам такого сравнения создается отчет с картой отклонений геометрии детали от исходной САД-модели [1]. Лазерное сканирование широко применяют для получения 3D-моделей отдельных деталей, узлов, поэтому портативные КИМ стали оснащать лазерными сканерами. Сканирующим устройством в данной установке является лазерный дальномер, приспособленный для замера изделия. Полученные данные обрабатываются штатным программным обеспечением по сложным алгоритмам и преобразовываются в так называемое трехмерное облако точек, которое характеризует положение большего числа координат измеряемой детали относительно друг друга. В последующем программа фильтрует данные и накладывает оставшиеся точки на полигональную сетку или модель и получается трехмерное изображение измеряемого изделия [2]. Погрешность современных лазерных сканеров составляет 1,9 мкм, что соответствует точности КИМ оснащенными тактильными датчиками.

Трубопроводные системы летательных аппаратов (ЛА) являются сложными объектами производства в части их проектирования, изготовления, монтажа и контроля. Сложность связана со спецификой плотной компоновки магистралей трубопроводов в ограниченных пространствах. (рис. 1). В связи с этим, трубопроводы имеют следующие конструктивные особенности [1]:

- отсутствие или незначительное число прямолинейных участков;
- колебание конечных координат стыковки трубопровода к элементам ЛА;
- значительный ассортимент применяемых труб.



Рис.1. Примеры компактного расположения трубопроводов со сложной пространственной геометрией на ракетных двигателях.

К трубопроводам предъявляются высокие требования по прочности, жесткости, герметичности, коррозионной стойкости, а также по геометрической точности и состоянию поверхности. В соответствии с заданными нагрузками и условиями эксплуатации основными материалами для изготовления трубопроводов являются легированные хромоникелевые стали (12X18H10T, X18H9T), алюминиевые сплавы (Д16, АМг6), титановые

сплавы (ОТ4, ВТ6), жаропрочные сплавы (ХН60ВТ, ХН77ТЮР) и другие материалы с высокими физико-механическими характеристиками.

В настоящее время многие предприятия ракетно-космической промышленности при серийном производстве двигателей летательных аппаратов применяют метод эталонирования трубопроводов. В качестве эталонов для изготовления и приёмки трубопровода используются эталонный трубопровод и соответствующий шаблон. При проектировании изделий инженеры-конструкторы работают с физическими образцами, примеряя их на макете изделия, а по результатам примерки вносят в случае необходимости корректировки в конструкторскую документацию (КД). Изготовление трубопроводов с таким подходом требует организации участка для хранения эталонов, проведения работ по проверке и ремонту эталонов и шаблонов, изготовлению контрольной и рабочей оснастки, что не обеспечивает сокращения циклов разработки и постановки на производство перспективных ДЛА, а также не соответствует современным мировым тенденциям по внедрению цифровых технологий в производственные процессы.

Эталонные трубопроводы необходимо изготавливать из прочного материала для сохранения конфигурации при эксплуатации в цеховых условиях (условиях серийного производства). Как правило, при изготовлении эталонного трубопровода небольшого диаметра используется металлический прут, для больших диаметров используется труба с увеличенной толщиной стенки [2].

Существующее применение эталонов в качестве основы для изготовления трубопроводов имеет ряд сложностей и недостатков:

- конструкторская документация в неполной мере определяет геометрию трубопровода, что соответственно требует наличие эталона трубопровода;
- высокая трудоемкость и сложность изготовления эталонов при внедрении в серийное производство;
- невозможность применения эталонов к машинной гибке без доработки конструкции;
- необходимость ручной доработки производимых изделий;
- необходимость использования больших площадей для хранения эталонов, макетов и других референтных элементов на производстве;
- высокая степень участия человеческого фактора в производстве [4].

Существует другой подход в производстве трубопроводов на основе электронного эталонирования. Такой эталон создается в специализированных программах САПР (CAD) и включает в себя информацию о геометрических характеристиках, материале, конфигурации, а также всю технологическую информацию, достаточную для подготовки производства и серийного изготовления.

Внедрение данного метода в производство современных ДЛА имеет ряд преимуществ, основными из которых являются:

- ускорение технологической подготовки производства;
- упрощение подготовки программ для гибочных станков с ЧПУ;
- возможность использования контрольно-измерительной машины (КИМ) с компьютерным управлением для контроля геометрии трубопроводов в сравнении с 3D-моделью вместо эталона;
- снижение трудоемкости производства каждого из трубопроводов и уменьшение количества сварных швов (при внедрении современных технологий машинной гибки и формообразования);
- освобождение площадей, занятых для хранения эталонов и рабочих шаблонов.

Вместе с тем переход от производства, основанного на «эталонном методе» к автоматизированному изготовлению требует решения ряда конструкторских, технологических и организационных вопросов:

- обработка технологии снятия с эталонов 3-х мерных электронных моделей с помощью контрольно-измерительной машины (КИМ);
- адаптация геометрии трубопровода для повышения технологичности гибки с помощью станков с числовым программным управлением;
- разработка системы позиционирования элементов сварных трубопроводов для прихватки/сварки (внедрение универсальной сварочной оснастки и роботизированной сварки);
- внедрение системы электронного документооборота как внутри предприятия-изготовителя, так и между конструкторским бюро (разработчиком) и изготовителем.

Алгоритм работы автоматизированной системы изготовления трубопроводов. На предварительном этапе производится определение длины заготовки трубопровода. Для трубопроводов, имеющих изгибы и прямолинейные участки, длина заготовки рассчитывается методом развертки осевой линии:

$$L = \sum_1^i l_i + \sum_1^i R_i \cdot \varphi_i$$

где $\sum_1^i l_i$ – сумма длин прямолинейных участков; $\sum_1^i R_i \cdot \varphi_i$ – сумма длин криволинейных участков; R_i – радиус кривизны осевой линии трубопровода на i -участке; φ_i – угол изгиба на i -участке.

Исходные геометрические параметры и данные по конфигурации узла трубопровода можно получить двумя способами:

- измерив эталон-трубопровод с помощью современных контрольно-измерительных машин (рис. 2). Данный способ наиболее подходит для внедрения системы на этапе серийного изготовления двигателей ЛА;



Рис. 2. Алгоритм работы системы (вариант 1).

- получив геометрические параметры трубопровода из созданной конструктором 3D-модели двигателя (при этом необходимо корректировать координаты мест стыковки путем их измерения контрольно-измерительной машиной и внесения соответствующих изменений в 3D-модель) (рис. 3, рис. 4). Этот способ предназначен для внедрения автоматизированной системы на этапе отработки (освоения) производства современных изделий, поскольку они проектируются с применением 3D моделирования.



Рис. 3. Алгоритм работы системы (вариант 2).

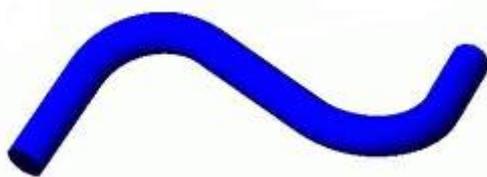


Рис. 4. 3D-модель трубопровода.

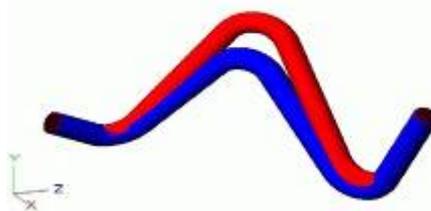


Рис. 5. Графическое представление результатов измерения изготовленного трубопровода в сравнении с эталонной 3D-моделью.

На следующем этапе необходимо создать управляющую программу (УП) для осуществления гибки трубы на станке с числовым программным управлением, для чего может использоваться специальное технологическое программное обеспечение (например, TezetCAD). Затем данные управляющей программы необходимо внести в блок управления станка с ЧПУ для осуществления гибки трубы с последующим контролем конфигурации при помощи КИМ (путем сравнения исходной 3D-модели и данных, полученных в процессе измерения изготовленного трубопровода) (рис. 5). В случае успешного прохождения операции контроля труба допускается в дальнейшую работу.

Заключение. Предлагаемая методика позволяет выявить ключевые технологические процессы, для которых смена концепции «эталонного» производства трубопровода на «цифровое производство» имеет наибольшее влияние. К этим процессам, в первую очередь, относятся: гибка трубопровода, последующий контроль его геометрии, а также сборочно-сварочные операции. Можно выделить основные достоинства технологии производства при использовании электронного эталонирования:

- Отказ от хранения эталонов и шаблонов трубопроводов и экономия производственных площадей;
- Возможность отрезки заготовок в точный размер, отказ от вспомогательных операций по отрезке и технологического припуска, экономия материала. Возможность автоматизированного расчета оптимального раскроя длинномерных труб для минимизации числа обрезков;
- Снижение трудоемкости изготовления трубопроводов и ускорение цикла производства. Увеличение точности изготовления и повторяемости.
- Отказ от хранения контрольной оснастки. Возможность получать точные величины

отклонений профиля изогнутой трубы от электронного эталона по каждому гибу и участку трубопровода;

Переход к технологии на основе электронного эталонирования и использование современного компьютеризированного оборудования позволяет наладить выпуск серийной продукции со стабильными размерами и точной геометрией, повысить качество выпускаемых трубопроводов, а также отказаться от большого количества эталонов и шаблонов, занимающих значительные складские площади.

Библиографические ссылки

1. Обеспечение качества ракетного двигателя путем внедрения автоматизированной системы изготовления и монтажа трубопроводов сложной конфигурации / Е. Н. Ярцев, В. П. Назаров, Н. С. Теряев // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной международной науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – Ч. 1. – С. 205-206.
2. ОСТ 92-1600-84 Производство трубопроводов. Общие технические условия. Эталонирование трубопроводных систем, гибка труб и формообразование концов трубопроводов.
3. ОСТ 92-1601-84 Производство трубопроводов. Общие технические условия. Сборка, окраска, маркировка, очистка, контроль и монтаж трубопроводов.
4. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов / С. И. Феоктистов и др. М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Комсомольский-на-Амуре гос. технический ун-т". - Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре гос. технический ун-т, 2013. - 88 с.
5. McAllister E. W. Pipeline rules of thumb handbook: a manual of quick, accurate solution to every day pipeline engineering problem / E. W. McAllister. – Burlington, Ma: Gulf professional publ., 2009. – 747 p.

© Вотяков К.А., Назаров В.П., Надежин М.Н., Карабонцева М.В., Брижинская Н.В. 2024

ПРИМЕНЕНИЕ ВОДЫ КАК РАБОЧЕГО ТЕЛА В ДВИГАТЕЛЯХ

И. Я. Шестаков, В. И. Шестаков, В. А. Романов

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

В работе проводится анализ теоретических и экспериментальных разработок по применению воды в качестве рабочего тела в теплосиловых установках различного типа, рассмотрено физико-химическое описание процессов получения энергии из воды. Показано, что использование воды в качестве второго рабочего тела позволяет увеличить тягу двигателя, повысить его КПД, при этом расход воды существенно превышает расход традиционно применяемых видов топлива. Описаны технические решения по применению воды в ракетных двигателях, в том числе в двигателе Романова.

Ключевые слова: вода, двигатель, тяга, КПД, ракетный двигатель, двигатель Романова.

Схема парогазовой установки, работающей на смеси продуктов сгорания и водяных паров приведена в технической термодинамике [1]. Использование воды в качестве второго рабочего тела приводит к увеличению общей энтальпии и КПД установки.

Известно применение воды для форсирования турбореактивного двигателя [2]. Впрыск воды в компрессор приводит к увеличению тяги двигателя, но сопровождается большим расходом жидкости – при форсировании двигателя на 30% расход воды в 2–2,5 раза превышает расход топлива.

В книге [3] приводятся сведения о том, что Браун Ю. построил автомобиль, в бак которого заливается обычная вода. Принцип работы и конструкция мотора неизвестны. Там же упоминается изобретатель Бакаев А. Г., который предложил “приставку”, позволяющую переделать любой автомобиль для работы на воде (Пермь 1995 г.).

Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования подтверждают необычные свойства воды, которые могут быть использованы для повышения эффективности работы теплосиловых установок.

Мелкодисперсная распыленная вода, в сочетании с водородно-кислородной смесью, является экологически чистым возобновляемым топливом для двигателей внутреннего сгорания [4].

Одним из источников экологически чистой энергии является вода. В настоящее время используется лишь незначительная часть её потенциальных энергетических возможностей, которые скрыты в энергии химических связей её молекул. До сих пор эти возможности оставались не выявленными и потому не подвергались глубокому анализу. Теперь такая попытка сделана. Теоретически и экспериментально показана возможность извлечения энергии из химических связей молекул воды. Установлено, что при обычном и плазменном электролизе воды электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии с показателем эффективности больше единицы [5]. Предполагается, что источником дополнительной энергии является синтез атомов и молекул водорода [6].

В работе [7] одна из глав посвящена практическому использованию колебательно-неравновесных процессов, происходящих в жидкой и газообразной воде, находящейся в устройствах. Показано использование воды в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания и в других устройствах, генерирующих “лишнюю” энергию. Автор подчёрки-

вает, что эта энергия образуется за счёт энергии межмолекулярных и межатомных связей молекул H_2O , и вода выступает в качестве “топлива”. Физико-химические процессы, происходящие в этих устройствах описываются теорией, изложенной в вышеприведённой работе.

Известно, что КПД ракетносителя не превышает 3% [8]. Это связано с тем, что продукты сгорания выбрасываются в окружающую среду при высокой температуре (более 2000 К) и давление на срезе сопла не равно давлению окружающей среды.

Известно техническое решение с применением воды в ракетных двигателях [9]. В бак ракеты закачивается перегретая вода. Имеется перекись водорода, которая, проходя через катализатор, разлагается с выделением тепловой энергии. Благодаря этому вода превращается в пар, который выходит через сопло, создавая тягу. В другом варианте в качестве источника теплоты предлагается использовать гидрореагирующее вещество или тепловой аккумулятор.

Известен ракетный двигатель Романова [10], в котором в качестве дополнительного рабочего тела используют парообразующую жидкость, например воду или атмосферный воздух, подавая их в продукты сгорания топлива перед расширением в сопле. Источник парообразующей жидкости размещается на борту ракеты. При движении летательного аппарата в атмосфере Земли используется окружающий воздух. Если аппарат движется над- или под водой, используется забортная вода. По мнению автора изобретения термический КПД рабочего цикла газопарового двигателя составит более 80%.

Использование в рабочих циклах ракетных двигателей воды позволяет более полно использовать выделяемую источниками тепла тепловую энергию для совершения полезной работы за счет расширения температурного диапазона рабочего цикла.

Трансформация тепловой энергии в потенциальную энергию давления пара или газопаровой смеси обеспечивает улучшение таких параметров как удельная тяга, удельный расход топлива, удельный вес, при использовании забортной воды или воздуха обеспечивается увеличение коэффициента полезной нагрузки.

Значительное снижение удельного расхода топлива в газопаровых жидкостных и твердотопливных ракетных двигателях соответственно обеспечивает и снижение количества и токсичности выхлопных газов, так как основное количество газопарового выхлопа будут составлять пары воды, а в ядерном – только водяной пар. Все варианты двигателей по сравнению с известными обеспечивают не менее чем двукратное снижение потерь теплоты с рабочим телом в окружающую среду и повышение экологической безопасности, снижается тяжесть последствий при аварийных ситуациях (аварийный подрыв ракеты, отказ двигателя, падение ракеты при отрыве от стартового стола).

В газопаровых ракетных двигателях обеспечивается менее теплонапряженный режим работы двигателя, что позволяет упростить конструкцию камеры газопарогенератора и сопла, исключив систему охлаждения – рубашку, использовать для критической части сопла менее термостойкие и дорогостоящие материалы и снизить стоимость их изготовления.

При использовании прямоочных газопаровых и паровых ядерных ракетных двигателей для объектов, перемещающихся в воде или в атмосфере, обеспечивается снижение лобового сопротивления среды.

При использовании газопаровых ракетных двигателей для торпед и зенитных ракет повышается маскирующий эффект, так как уменьшаются размеры и интенсивность инверсионного следа в водной среде (несконденсировавшегося водяного пара), в воздушной среде снижается интенсивность инфракрасного излучения выхлопа, состоящего в основном из низкотемпературного водяного пара.

Применение газопаровых и парового ракетного двигателя для транспортных средств, космических ракет, ракетного оружия позволит снизить себестоимость их производства и эксплуатации.

При запуске космических объектов с использованием прямоточного ядерного ракетного двигателя (ПЯРД) обеспечивается возможность его многократного использования. С целью исключения радиационной опасности старт и разгон ракеты с ПЯРД, работающего по одноконтурной схеме, может осуществляться газопаровыми пороховыми ускорителями. После окончания работы и остановки реактора ПЯРД с помощью спускаемого аппарата возвращается на Землю и может после перезарядки ядерным топливом использоваться повторно, т.е. многократно.

Библиографические ссылки

1. Вукалович М. П., Новиков И. И. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1968, 496 с.
2. Справочник авиационного техника. М.: Воениздат, 1964, 512 с.
3. Николаев Г. В. Тайны электромагнетизма и свободная энергия. Томск: ООО "НТЦ НЭД", 2002. 152 с.
4. Фролов А. В. Новые источники энергии. – 9-е изд. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 219 с.
5. Шестаков И. Я., Фадеев А. А., Докучаев В. Н., Ремизов И. А. Особенности нагрева воды и водных растворов переменным электрическим током. Вестник СибГАУ, 2016. Том 17, № 4. С. 1097-1104.
6. Канарёв Ф. М. Вода – новый источник энергии. – 2-е изд. перераб. и доп. Краснодар: Изд-во Кубанского аграр. ун-та, 2000. 155 с.
7. Рассадкин Ю. П. Вода обыкновенная и необыкновенная. М.: Галерея СТО, 2008. 840 с.
8. Коротеев А. С. Мы предложили совершенно иной подход. Вестник федерации космонавтики России, 2013. №2(6). С. 24-25.
9. Григорьев С. С., Мосесов С. К. Пароводяной ракетный двигатель. Патент РФ № 2099565 С1, опубл. 20.12.1997.
10. Романов В. А. Способ работы ракетного двигателя и ракетный двигатель Романова. Патент РФ № 2380563, опубл. 27.01.2010.

© И. Я. Шестаков, В. И. Шестаков, В. А. Романов, 2024

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Шамлицкий А. Я., Крашенинникова О.В.

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

В работе представлено исследование современных технологий в диагностике авиации, их значимость, современные подходы и будущие направления развития отрасли

Ключевые слова: Инновации, диагностика, перспективы развития, автоматизация, техническое обслуживание, профилактика поломок

В наше время авиационная промышленность стоит перед постоянным вызовом обеспечения безопасности полетов и надежности воздушных судов. В этом контексте диагностика играет ключевую роль, позволяя своевременно выявлять потенциальные проблемы и предотвращать аварийные ситуации. Стремительное развитие технологий и внедрение инноваций в методы диагностики приводят к изменениям в отрасли, открывая новые перспективы для улучшения процессов обслуживания и безопасности полетов. В данной статье будет проведен анализ современных тенденций и перспектив развития инновационных методов диагностики в авиационной промышленности, выявлены вызовы перед отраслью и предложены пути их преодоления.

В современной авиации, где безопасность играет определяющую роль, внедрение инновационных методов диагностики является неотъемлемой частью обеспечения высокого уровня надежности и безопасности полетов. Отслеживание состояния техники в реальном времени становится все более важным, а новейшие технологии позволяют делать это более эффективно.

Среди инновационных методов выделяются интеллектуальные системы мониторинга, базирующиеся на анализе данных с датчиков и использовании алгоритмов машинного обучения. Такие системы способны предсказывать возможные отказы до их возникновения, что помогает проводить профилактические работы и уменьшает вероятность аварийных ситуаций. Благодаря автоматизированным методам диагностики стало возможным быстро и точно определять даже мельчайшие неисправности, что позволяет экономить время на обслуживании и снижает риски при эксплуатации воздушных судов [1].

Современные методы диагностики в авиации не только повышают уровень безопасности полетов, но и способствуют оптимизации процессов обслуживания и эксплуатации воздушных судов. Постоянное совершенствование технологий и внедрение инноваций в эту область позволяют авиационной промышленности эффективно справляться с вызовами современности и обеспечивать высочайший уровень безопасности для пассажиров и экипажа.

Рассмотрим конкретные примеры методов диагностики в авиационной промышленности с количественными показателями:

1. Ультразвуковой контроль: Примером может служить измерение толщины стенки металлического компонента. Например, при диагностике структурного элемента самолета-

та проводится измерение толщины алюминиевой панели. Показатель толщины должен соответствовать допустимым значениям для конкретного компонента. Например, допустимая толщина алюминиевой панели может быть 2 мм, и любое уменьшение этого значения может указывать на износ или деформацию.

2. Магнитоповерхностный контроль: При обнаружении дефектов в металлических деталях, например, трещин, используется данный метод. Количественный показатель - размер трещины, который измеряется и сравнивается с допустимыми значениями для безопасной эксплуатации. При выявлении трещин размер дефекта может быть оценен количественно в миллиметрах, и для безопасности это значение должно быть ниже определенного порога.

3. Испытания на прочность: При проведении испытаний на вибрацию двигателя самолета, количественный показатель - уровень вибрации, который измеряется и сравнивается с установленными стандартами для нормальной работы двигателя. Допустимый уровень вибрации для двигателя может быть задан в миллиметрах в секунду или в герцах, и превышение этого значения может требовать дополнительной диагностики или обслуживания.

4. Анализ масла: При проведении анализа масла двигателя, одним из количественных показателей может быть наличие металлических частиц в масле (например, количество частиц на миллион). При превышении определенного порога, это может свидетельствовать о истирании деталей двигателя. Например, допустимое количество частиц железа на миллион частиц масла может быть менее 50 частиц, и превышение этого уровня может указывать на износ деталей двигателя.

Эти количественные показатели имеют значительное значение для оценки технического состояния авиационных систем и принятия решений о необходимости проведения технического обслуживания или ремонта. Они позволяют определить степень износа, повреждения или неисправности, что помогает обеспечить безопасность полетов и эффективное функционирование авиационных систем [2].

Для примера рассмотрим диагностику пассажирского самолета с реактивным двигателем. Для обеспечения безопасности полетов и поддержания высокой надежности самолета, регулярно проводится диагностика состояния двигателя через анализ масла.

1. На основе расписания технического обслуживания, инженеры авиакомпании снимают образец масла из двигателя для последующего анализа. Образец масла маркируется и отправляется в лабораторию для проведения анализа.

2. Анализ масла в лаборатории, специалисты проводят анализ образца масла на предмет содержания металлических частиц (например, железа), окислов, загрязнений и других параметров. Проводится количественная оценка содержания важных компонентов.

3. После анализа специалисты получают количественные показатели, такие как количество металлических частиц на миллион частиц масла. Например, выясняется, что содержание частиц железа превышает допустимый уровень.

4. При обнаружении превышения допустимых значений металлических частиц, инженеры принимают меры: это может включать дополнительное диагностирование двигателя для выявления причины источника металлических частиц, проведение ремонта или замену деталей.

Таким образом, анализ масла является важным методом диагностики в авиации, который помогает рано выявлять потенциальные проблемы с двигателем, обеспечивая безопасность и эффективную эксплуатацию воздушного транспорта.

Сегодняшние тенденции в области диагностики в авиационной промышленности направлены на интеграцию новейших технологий, в том числе датчиков высокой точности, систем мониторинга состояния оборудования в реальном времени и алгоритмов искусственного интеллекта. Эти технологии позволяют не только оперативно выявлять неис-

правности, но и предсказывать их возможное появление на основе данных аналитики и предыдущих инцидентов.

Важным направлением развития становится использование машинного обучения для анализа больших объемов информации и выявления скрытых закономерностей, что позволяет улучшить качество диагностики и снизить количество ложных срабатываний систем. Также стоит отметить рост популярности беспилотных технологий в проведении проверок и диагностики оборудования, что увеличивает скорость и эффективность проведения работ.

Одним из ключевых аспектов современных тенденций является переход к цифровизации данных и процессов диагностики. Умение работать с большими объемами информации, быстро обрабатывать данные и выявлять аномалии становится важным навыком как для специалистов по техническому обслуживанию, так и для инженеров разработчиков новых систем диагностики [3].

Следовательно, современные тенденции в области диагностики в авиации направлены на повышение автоматизации, точности и оперативности процессов контроля оборудования, что в конечном итоге способствует обеспечению безопасности полетов и эффективности воздушных перевозок. В сфере авиационной диагностики существует несколько ключевых вызовов, стоящих перед отраслью и требующих комплексного подхода для их решения.

Один из главных вызовов заключается в необходимости постоянного обновления и адаптации инновационных методов диагностики к быстро меняющейся технике воздушных судов. С появлением новых моделей самолетов и различных технических систем, специалистам требуется постоянное обновление знаний и навыков, чтобы эффективно применять современные методы диагностики [4].

Другим вызовом является сложность данных, с которыми приходится работать. Большие объемы информации, поступающей от датчиков и систем мониторинга, требуют эффективных методов их анализа и интерпретации. Борьба с ложными срабатываниями и обработка огромного потока данных становятся непростой задачей для специалистов в области авиационной диагностики.

Для преодоления данных вызовов необходимо инвестировать в подготовку квалифицированных кадров, способных осуществлять диагностику с использованием новейших технологий. Также важно продолжать исследования в области машинного обучения и искусственного интеллекта для создания более точных и надежных систем диагностики. Сотрудничество между авиационными компаниями, производителями оборудования и научными центрами позволит объединить усилия в разработке инновационных решений для эффективной диагностики и обслуживания воздушных судов.

Только совместными усилиями и постоянным стремлением к совершенствованию можно успешно преодолеть вызовы перед авиационной отраслью и обеспечить высокий уровень безопасности и надежности воздушных перевозок в будущем.

Один из основных аспектов контроля качества – это обеспечение соответствия применяемых методов диагностики стандартам и регулятивным требованиям. Постоянное обновление процедур и требований к диагностике, а также их строгое соблюдение, позволяют минимизировать риск ошибок и повысить точность выявления неисправностей.

Кроме того, важно обеспечить высокий уровень подготовки специалистов, проводящих диагностику, через систему сертификации и периодическое профессиональное обучение. Только квалифицированные специалисты с должным опытом и знаниями могут обеспечить надежность и эффективность диагностических процедур.

Регулярный аудит процессов диагностики, внедрение новейших технологий контроля качества и систематический анализ результатов помогают выявлять уязвимые места в системе диагностики и оперативно корректировать их. Это необходимо для непрерывно-

го улучшения процессов, повышения эффективности и снижения вероятности аварийных ситуаций [5].

Таким образом, контроль качества процессов диагностики является одним из ключевых элементов обеспечения безопасности в авиации, и его значимость не может быть недооценена в условиях постоянного развития технологий и усложнения авиационной техники.

Библиографические ссылки

1. Инновационные подходы к обеспечению авиационной безопасности: анализ и перспективы [Электронный ресурс] /URL: <https://apni.ru/article/8403-innovatsionnie-podkhodi-k-obespecheniyu-aviat> (дата обращения 11.02.2024 г.).

2. Диагностирование технического состояния авиационных систем [Электронный ресурс] / URL: <http://oobskspetsavia.ru/2015/11/06/diagnostirovanie-texnicheskogo-sostoyaniya-aviacionnyx-sistem/> (дата обращения 11.02.2024 г.).

3. Функциональная диагностика в гражданской авиации [Электронный ресурс] / URL: http://www.biosoft-m.ru/Функциональная_диагностика_в_гражданской_авиации (дата обращения 11.02.2024 г.).

4. Перспективы развития методов диагностирования [Электронный ресурс] / URL: <https://studfile.net/preview/2216279/page:17/> (дата обращения 11.02.2024 г.).

5. Перспективы внедрения диагностических систем для решения продления ресурса авиационной техники [Электронный ресурс] / URL: <https://eco-oos.ru/biblio/konferencii/prioritetnye-napravleniia-razvitiia-nauki-i-tehnologii-ix/41/> (дата обращения 11.02.2024 г.).

© Шамлицкий А.Я., Крашенинникова О.В. 2024 г.