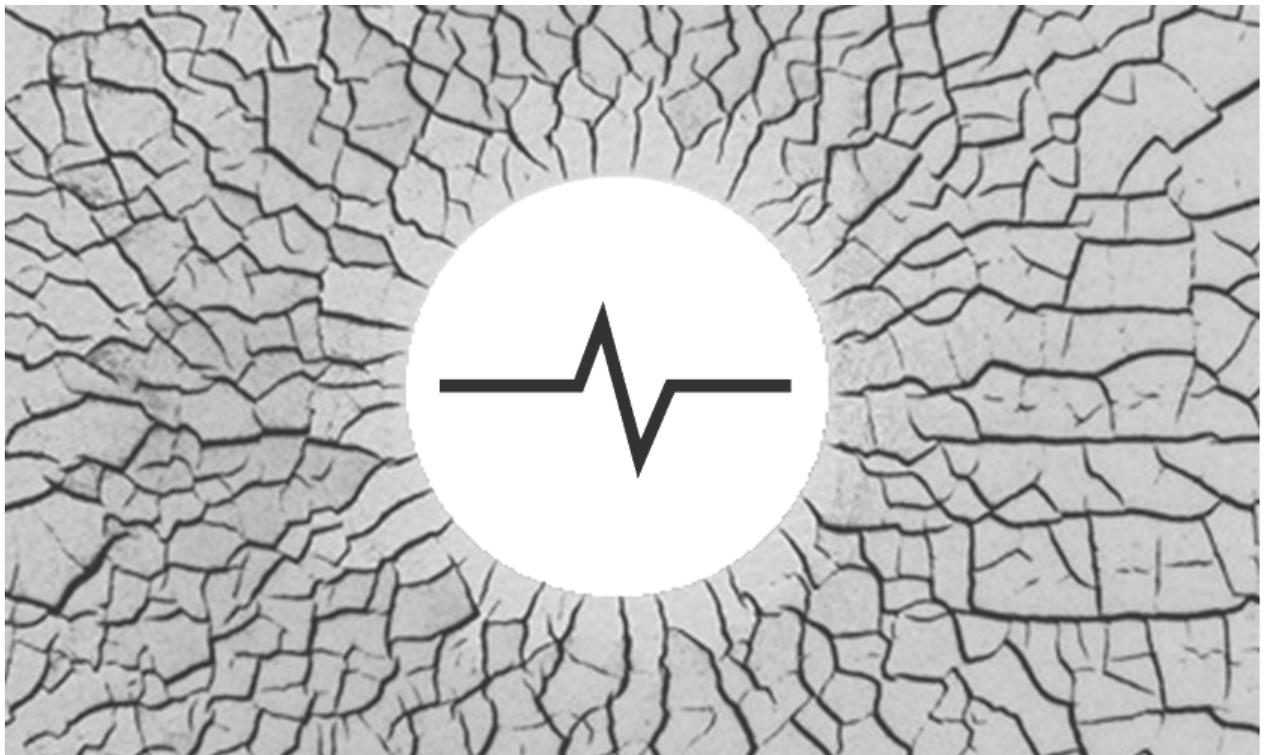




Сибирский государственный университет
науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



КРАСНОЯРСК 2023

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 V Всероссийской научно-практической конференции
(27–28 февраля 2023 г., Красноярск)*

Электронное издание

Красноярск 2023

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2023

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 V Всерос. науч.-практ. конф. (27–28 февраля 2023 г., Красноярск). – Электрон. текстовые дан. (1 файл, 6,85 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, 2023. – Режим доступа: <https://www.sibsau.ru/scientific-publication/>, свободный. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-86433-326-6

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: 12.04.2023.

Объем 6,85 МБ. С 723/23.

Корректурa, макет и компьютерная верстка *П. С. Бороздова*.

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: rio@sibsau.ru. Тел. (391) 291-90-96.

ISBN 978-5-86433-326-6



9 785864 333266

СОДЕРЖАНИЕ

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

Секция

«Современные методы испытаний и диагностики изделий»

| | |
|---|----|
| Санников Д. Н. Разработка и моделирование снегопередающего ограждения для защиты автомобильных дорог от снежных заносов | 8 |
| Крашенинникова О. В., Шамлицкий А. Я. Сравнительный анализ редукторов для ARM-манипулятора | 13 |
| Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Кишкин А. А., Капуцак К. И., Келлер А. И. Прототипирование микротурбогенератора и постановка задачи исследования | 17 |
| Дударьков Д. О., Журавлев И. М., Лысенко И. Е. Учет этапа комплексных испытаний радиоэлектронной аппаратуры как средство повышения уровня подготовки обучающихся | 21 |
| Манохина Э. С., Журавлев В. Ю. особенности механических свойств материала Inconel 718, полученного методом SLM-печати | 25 |
| Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Кишкин А. А., Капуцак К. И., Келлер А. И. Основные термо- и газодинамические соотношения для формирования алгоритмов обработки данных по сжимаемым жидкостям | 28 |
| Бразговка О. В., Сугак Е. В. Статистическое моделирование параметрической надежности элементов технических систем | 32 |
| Румынин А. А., Евтифьев М. Д. Ультразвуковой контроль сварных швов на изделиях ракетно-космической техники | 40 |
| Крашенинникова О. В. Сравнительный анализ материалов для аддитивных технологий на примере эксплуатации редуктора | 47 |
| Сугак Е. В. Прикладная теория надежности как методологическая основа оценки и обеспечения техносферной безопасности | 51 |

Секция

«Контроль и диагностика технологических процессов машиностроения»

| | |
|---|----|
| Устюгов-Грицай А. В., Петецкая А. Е. Повышение надежности изготовления нетехнологичных поверхностей типа отверстие малого диаметра | 60 |
| Иванов П. А., Левко В. А. Технологический процесс обработки абразивным потоком криволинейных каналов трубных заготовок | 64 |

| | |
|---|----|
| Левко В. А., Теряев Н. С. Повышение надежности обработки абразивным потоком закрытых каналов заготовки за счёт уменьшения погрешности базирования и закрепления в приспособлении | 67 |
| Петецкая А. Е., Устюгов-Грицай А. В. Обоснование критериев выбора технологий финишной обработки деталей, полученных методом селективного лазерного сплавления | 73 |
| Литовка О. В., Левко В. А. Влияние формы абразивного зерна на обработку абразивным потоком | 77 |

Секция

«Испытания, контроль, надежность систем автоматического управления»

| | |
|---|----|
| Алилекова К. С., Назаров И. В. Транспондер в системах спутниковой связи | 83 |
| Головко И. Д., Чебыкин А. К. Современные методы тестирования и диагностики лидаров | 86 |
| Алилекова К. С. Испытания беспилотных летательных аппаратов | 89 |
| Широков А. Д., Феоктистов Д. А., Орешенко Т. Г. Общий алгоритм работы стенда огневых испытаний двигателей малой тяги | 92 |
| Головко И. Д. Интеграция машинного зрения в систему управления квадрокоптером | 97 |

Секция

«Контроль и испытания ракетно-космической техники»

| | |
|---|-----|
| Шикарев М. А., Журавлев В. Ю. Особенности циклограммы стендовых испытаний ракетного двигателя-демонстратора, изготовленного методами 3D-печати | 100 |
| Шевчук А. А., Пастушенко О. В., Двирный В. В., Двирный Г. В., Снежко А. А., Сидорова Е. С. Совершенствование методов термовакуумных испытаний размеростабильных конструкций космических аппаратов | 105 |
| Иванов А. В. Наземная экспериментальная отработка прецизионного композитного рефлектора высокочастотной антенной системы телекоммуникационного космического аппарата | 111 |
| Карабонцева М. В. Применение метода 3D-сканирования для контроля точности процесса селективного лазерного сплавления экспериментальной камеры ракетного двигателя малой тяги | 119 |
| Пастушенко О. В., Снежко А. А., Двирный В. В., Двирный Г. В., Козловский М. С., Шевчук А. А. Способ обеспечения спектрального соответствия комбинированного имитатора внеатмосферного солнечного излучения | 124 |

| | |
|---|-----|
| Кирюшкин Г. А., Алексеенко В. В., Шестерня В. И. Особенности конструкции и методы контроля геометрии охлаждающего тракта камер ЖРД, изготовленных по технологии 3D-печати | 131 |
| Манохина Э. С., Журавлев В. Ю., Коваль Р. В. Принципиальная схема стенда для ракетного двигателя-демонстратора малой тяги | 135 |
| Шестерня В. И., Алексеенко В. В., Кирюшкин Г. А. Разработка методологии испытаний камер ракетных двигателей, изготовленных с использованием аддитивных технологий | 139 |
| Назаров В. П., Голиковская К. Ф., Назарова Л. П. Методика и технология балансировки роторов турбоагрегатов ракетных двигателей | 142 |
| Назаров И. В. Разработка привода солнечной батареи для малых космических аппаратов типа CUBESAT | 149 |
| Чуева Е. Д., Федорова Е. А., Демин Е. А., Харлашина С. В. Огневые и холодные стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей | 153 |
| Черненко В. В., Черненко Д. В. Баллансовые испытания в методике исследования проточной части лопаточного нагнетателя | 157 |
| Степанищев Ю. Ю., Зуев В. В., Коровин Д. А., Беккер Н. А., Коваль Р. В. Конструкция стенда для испытания ракетного двигателя малой тяги – демонстратора, изготовленного методами аддитивных технологий | 160 |
| Шемет Д. В., Батранюк И. А., Коваль Р. В. Проектирование системы измерения тяги для испытаний двигателей изготовленных методом аддитивных технологий | 164 |
| Кузовников А. В., Кочура С. Г., Максимов И. А., Сомов В. Г., Дианова О. В. Оценка воздействия излучения передающих антенн на бортовую аппаратуру космического аппарата | 170 |
| Максимов И. А., Кочура С. Г., Сомов В. Г., Шепета Н. А., Малышев Д. О. Анализ помеховой обстановки при обеспечении электромагнитной совместимости космического аппарата | 176 |
| Шестаков И. Я., Шестаков В. И. Особенности электро-контактно-химической обработки монокристаллического кремния в щелочном электролите | 180 |

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

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

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

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

УДК 624

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЕГОПЕРЕДУВАЮЩЕГО
ОГРАЖДЕНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ
ОТ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ**

Д. Н. Санников

Научный руководитель – В. В. Серватинский

Сибирский федеральный университет

Инженерно-строительный институт

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

E-mail: BrownGp2@yandex.ru

В данной статье рассмотрена разработка снегопередувающей конструкции путем программного моделирования. Приводятся основные данные по оценке наиболее эффективной формы, с помощью которых можно защитить автомобильные дороги от возникновения снежного заноса. Кроме этого, в статье показаны графические представления снегопередувающих конструкций и их аэродинамические показатели.

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

В зимний период времени во многих регионах Российской Федерации наблюдается ухудшение условий дорожного движения. Главной проблемой такой неблагоприятной ситуации на автомобильных дорогах являются снежные отложения, которые образуются во время метелей и снегопадов. Эффективная борьба со снежными заносами на автомобильных дорогах возможна при внедрении новых методов борьбы со снегом, а также в доработке и улучшении существующих методов, но, по разным рода причинам, утратили свою эффективность [1].

Для автомобильных дорог согласно нормативным требованиям не допустимы снежные отложения на проезжей части [4]. Для обеспечения снегонезаносимости таких автомобильных дорог требуется разработка и применение эффективных и экономически целесообразных мероприятий который будут обеспечивать защиту дорог от снегопадов и снежных метелей.

Для решения данных задач был проведен анализ среди различных снегопередувающих и снегозащитных ограждений. Важными отличиями этих двух типов является то, что снегозащитные ограждения задерживают снег около искусственных сооружений, а снегопередувающие ограждения способствуют передуванию снега через дорогу и обеспечивают дальнейшее складирование [1; 6].

По результатам оценки снегозащитных и снегопередувающих конструкций, разработан прототип снегопередувающей конструкции. Данная модель имеет форму эллиптического полушария, такая форма будет способствовать ускорению перемещения снежной метели над дорогой за счет округлой формы. В этой конструкции поток воздуха,

сконцентрированный и ускоренный в нижнем зазоре ограждения, и поток воздуха, отклоняемый пластиной в верхней части, создают разные потоки воздуха над и под ограждением, а поток воздуха, сконцентрированный на нижней стороне сдувает снег с дорожного покрытия, чтобы снег не накапливался. Просветы в верхней и нижней части пластины, сформированные в форме крыла, наиболее эффективной аэродинамической формой создающую разность давлений на верхней и нижней сторонах пластины, возникающей согласно закону Бернулли: на нижней поверхности давление оказывается ниже, чем на верхней, поэтому благодаря образуемой разности давлений и возникает завихрение воздушного потока, тем самым увеличивая его кинетическую энергию и способность снегопереноса. Зазор в нижней части будет способствовать ускорению прохождения снежной метели, увеличение скорости выдувания будет способствовать переносу и сдуванию снега с дорожного покрытия [5] (рис. 1).

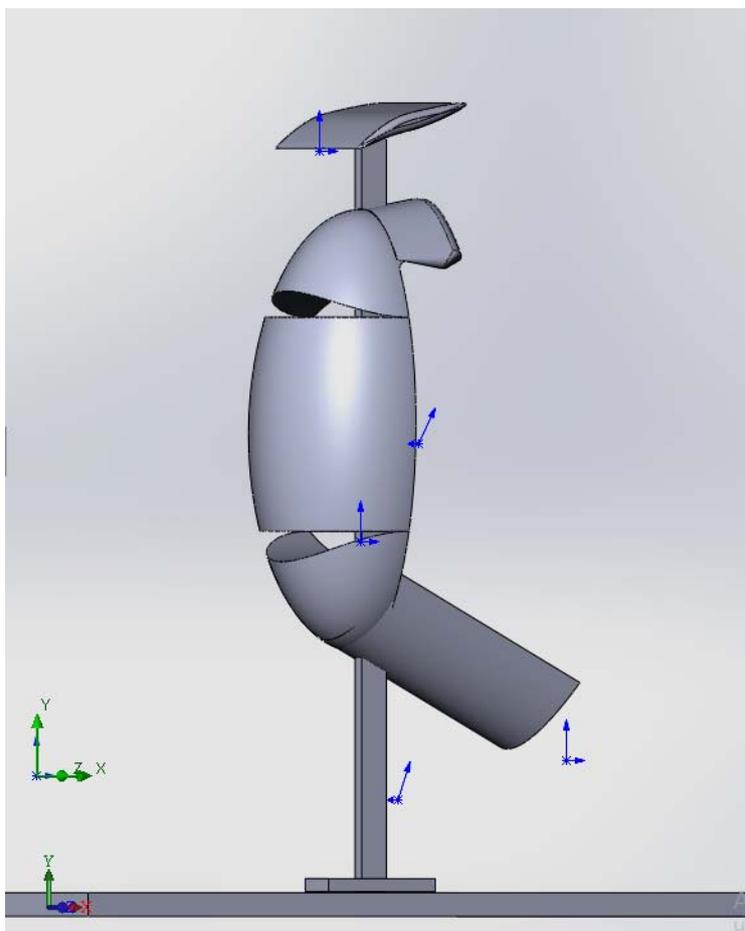


Рис. 1. Модель снегопередувающего ограждения, созданная в программе SolidWorks

В программе SolidWorks была создана модель снегопередувающего ограждения, представленная на рисунке. Основными количественными значениями, определяющими качеством передвигаемого снега, выступили следующие параметры: общая высота снегопередувающего ограждения, отношение верхней панели к нижнему зазору, угол наклона нижнего выдувающего отрезка, угол наклона панели к горизонту.

Провели ряд исследований с моделью, представленной на рисунке, изменяя угол наклона нижнего отрезка и зазор между снегопередувающей конструкцией и дорожным покрытием. Данное исследование проводилось в программе SolidWorks с помощью расширения Flow Simulation, позволяющим создать эффект аэродинамической трубы.

В ходе моделирования использовалось десять конструкции снегопередающего типа с разным зазором между конструкцией и дорожным полотном в определённом масштабе. В качестве текущей среды для аэродинамического эффекта использовался воздух плотностью $1,225 \text{ кг/м}^3$. Температура воздушной среды составляла 293 K и давление 101325 Pa . Воздушный поток распределяли на всю поверхность снегопередающей конструкции со скоростью 20 м/с . Данные моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты моделирования снегопередающих ограждений

| № | Угол наклона панели к горизонту | Угол наклона нижнего выдувающего отрезка | Отношение панели и зазора, % | Ширина зоны выдувания |
|----|---------------------------------|--|------------------------------|-----------------------|
| 1 | 90 | 90 | 65:35 | 3,4Н |
| 2 | 90 | 95 | 71:29 | 3,8Н |
| 3 | 90 | 99 | 74:26 | 4,8Н |
| 4 | 90 | 107 | 78:22 | 6,2Н |
| 5 | 90 | 110 | 80:20 | 8,5Н |
| 6 | 90 | 113 | 83:17 | 8Н |
| 7 | 90 | 115 | 84:16 | 7,7Н |
| 8 | 90 | 117 | 86:14 | 6,8Н |
| 9 | 90 | 125 | 88:12 | 4,5Н |
| 10 | 90 | 133 | 90:10 | 4Н |

По результатам моделирования снегопередающих конструкций, составлена таблица. Из таблицы видно что, наилучший результат показала конструкция под номером 5 с шириной зоны выдувания $8,5 \text{ Н}$. За счет оптимального нижнего отрезка, данная модель позволяет эффективно ускорить воздушный поток и снизить завихрение, отрицательно сказывающиеся на видимости и качестве снегопереноса.

На рис. 1 и 2, демонстрируется визуализация распределения воздушных потоков для конструкций под номером 1 и 5. Конструкция под номером 1 с углом наклона нижнего отрезка показала наихудший результат, за счет отсутствия сжатия на нижнем отрезке, воздушный поток теряет свою скорость относительно обычной скорости воздушного потока, а также вследствие этого происходит завихрение за снегопередающей конструкцией, которое отрицательно сказывается на снегопереносе.

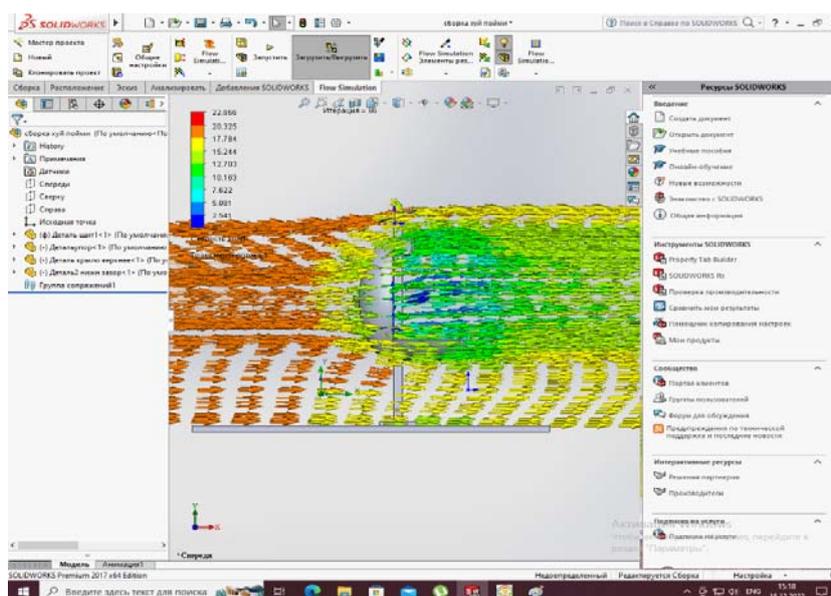


Рис. 1. Результат моделирования распределения воздушных потоков для снегопередающей конструкции под номером 1

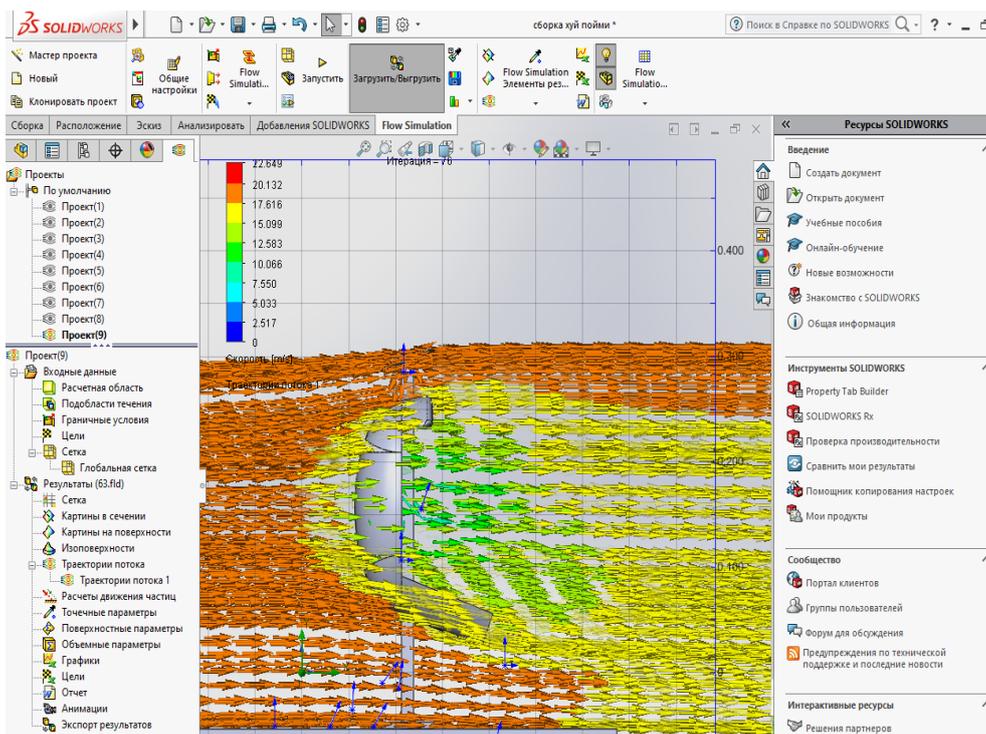


Рис. 2. Результат моделирования распределения воздушных потоков для снегопередающей конструкции под номером 5

Для практического смысла была составлена таблица, в которой в качестве примера использована снегопередающая конструкция высотой 5 метров и произведены расчеты предполагаемой зоны выдувания. По данным таблицы оптимальным вариантом выступает модель под номером 5 с максимальной зоной выдувания 42,5 м. Так же такие расчеты возможно произвести и для конструкций разной высоты в зависимости от исходных данных и потребностей установки ограждений. Полученные данные для конструкции высотой 5 метров представлены в табл. 2.

Таблица 2

Пример расчёта для снегопередающего ограждения высотой 5 метров

| № | Высота ограждения, м | Размер нижнего зазора, м | Размер зоны выдувания | Отношение панели и зазора, % |
|----|----------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1 | 5 | 1,75 | 17 | 65:35 |
| 2 | 5 | 1,45 | 19 | 71:29 |
| 3 | 5 | 1,3 | 24 | 74:26 |
| 4 | 5 | 1,1 | 31 | 78:22 |
| 5 | 5 | 1 | 42,5 | 80:20 |
| 6 | 5 | 0,85 | 40 | 83:17 |
| 7 | 5 | 0,8 | 38,5 | 84:16 |
| 8 | 5 | 0,7 | 34 | 86:14 |
| 9 | 5 | 0,6 | 22,5 | 88:12 |
| 10 | 5 | 0,5 | 20 | 90:10 |

Выводы. В статье рассматриваются вопросы, связанные с моделированием снегопередающей конструкции для защиты автомобильных дорог от снежных заносов. Обосновывается утверждение о том, что в настоящее время существуют проблемы в неэффективной очистке дорог от снега. Решением данной проблемы может послужить установка снегопередающих конструкций. На основе проведенного исследования получили следующие результаты.

1. Из серии экспериментов можно утверждать, что модель, построенная в программе SolidWorks и смоделированная в расширении Flow Simulation, имеющая форму эллиптического полушария, показала положительный результат.

2. Методом моделирования получили оптимальную форму снегопередающей конструкции, которая сможет обеспечить эффективное выдувание снега на ширину зоны выдувания равную 8,5 Н.

3. Сравнили модели и выявили ряд факторов в форме снегопередающей конструкции, которые могут влиять на ширину зоны выдувания.

Библиографические ссылки

1. Зимнее содержание автомобильных дорог / Г. В. Бялобжеский, А. К. Дюнин, Л. Н. Плакса, Л. М. Рудаков, Б. В. Уткин ; под ред. А. К. Дюнина. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1983. 197 с.

2. Бабков В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения. М. : Транспорт, 1970. 256 с.

3. Васильев А. Л. Состояние дорог и безопасность движения автомобилей в сложных погодных условиях. М. : Транспорт, 1976. 224 с.

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., 2023

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕДУКТОРОВ ДЛЯ ARM-МАНИПУЛЯТОРА

О. В. Крашенинникова, А. Я. Шамлицкий
Научный руководитель – В. Г. Сидоров

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

В данной работе рассматриваются два вида редукторов для ARM-манипулятора: циклоидальный и планетарный, представлены их схемы и модели, распечатанные на 3D-принтере.

Ключевые слова: редукторы, циклоидальный редуктор, планетарный редуктор, ARM-манипулятор.

В современном мире, когда говорят о роботах, в основном различают их по производственным и сервисным средствам. Промышленные роботы появились относительно недавно [1], к ним можно отнести роботизированные руки на сборочных линиях. А к сервисным роботам относят роботы-пылесосы, роботы-проводники, дроны и т. п.

ARM-манипуляторы приводятся в действие с помощью сервоприводов или шаговых двигателей с редукторами. При проектировании роботизированной руки нужно добиться точности выполнения команд. Два основных компонента, которые влияют на точность: шаг двигателя и редукторы.

Двигатели, которые используют в реальных промышленных роботах, как правило, являются синхронными двигателями постоянного тока [2]. Такие двигатели позволяют добиться достаточно точных движений ARM-манипулятора, но их система привода не подходит для компактных моделей. Вместо синхронных двигателей постоянного тока можно использовать компактные шаговые двигатели, они так же обладают хорошей точностью, погрешность в движении вала двигателя составляет всего от 3 до 5 процентов от величины шага, при этом ошибка не накапливается от шага к шагу, но их крутящий момент меньше, так как он зависит от размера двигателя. Чтобы решить проблему невысокого крутящего момента, двигатель оснащают редуктором. Редуктор используется для увеличения выходного крутящего момента за счет уменьшения выходной скорости.

Небольшие ARM-манипуляторы, в настоящее время представленные на рынке, работают с помощью двигателей с планетарными редукторами, так как имеют большие передаточные отношения и работают практически бесшумно. Для того чтобы сохранить точность двигателя при одновременном уменьшении размера, в таких моделях используют встроенный привод с замкнутым контуром [3]. Контур таких шаговых систем замыкается с помощью устройства обратной связи, что дает возможность проверять и контролировать пропущенные шаги, а так же определять потерю скорости двигателя.

Для примера рассмотрим Open Source проект японского автора 稚暉君 [4]. Большая часть деталей ARM-манипулятора, представленного на рис. 1 изготовлена из алюминия, что значительно повышает стоимость модели. Все устройства управления встроены в корпус роботизированной руки, что позволяет сократить длину кабеля и дает возможность ARM-манипулятору поворачиваться на 360 градусов. Вся электронная сис-

тема включает в себя силовые модули, приводы и вычислительные модули, микроконтроллеры разных типов. Данная модель имеет 6 степеней свободы.

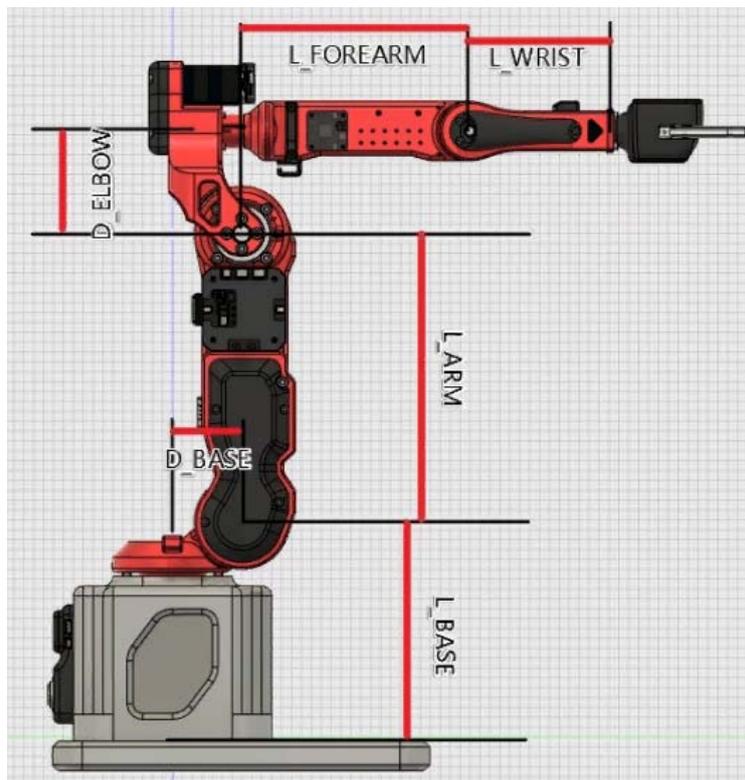


Рис. 1. Модель ARM-манипулятора

При проектировании АРМ-манипуляторов и выборе составляющих необходимо иметь четкое представление возможностей его составляющих. Одним из компонентов АРМ-манипулятора является редуктор. Различные типы редукторов могут приводить к различным результатам при их применении. Для этого рассмотрим более подробно циклоидальный и планетарный.

Циклоидальный редуктор представляет собой передачу с высокими показателями удельной мощности и большими передаточными отношениями. Входной вал циклоидального редуктора приводит в действие подшипник, который, в свою очередь, приводит в движение циклоидальный диск. К достоинству циклоидального редуктора можно отнести то, что при низкой скорости работы редуктор обладает высоким крутящим моментом за счет использования скользящего контакта. Недостатком циклоидального редуктора является то, что если циклоидальный диск не уравновесить вторым диском, он будет генерировать вибрацию, которая будет распространяться через ведомые валы и корпус. Это приведет к повышенному износу внешних зубьев циклоидального диска, а также компонентов подшипников.

Планетарный редуктор состоит из корпуса, в котором расположены зубчатые колеса, валы и подшипники валов. Для работы планетарного редуктора необходимо, чтобы одна из его деталей была закреплена относительно корпуса редуктора. В зависимости от выбора ведущего и ведомого элемента будет зависеть передаточное число редуктора. К достоинствам планетарного редуктора можно отнести особенность расположение сателлитов, плотно скомпонованных между собой, такая конструкция приводит к тому, что возникающие в редукторе силы взаимно компенсируются, из-за чего нагрузка на опоры падает. Также за счет плотно расположенных элементов редуктора обеспечивается компактность.

Чтобы определить какой тип редуктора будет наиболее подходящим для работы АРМ-манипулятора, необходимо понять какие характеристики редукторов влияют на ряд параметров, таких как: точность работы АРМ-манипуляторов, срок их эксплуатации, надежность и т. п. На точность работы манипулятора могут влиять конструкция редуктора и качество исполнения деталей. В планетарном редукторе добиться точности исполнения планетарных шестерен сложнее, чем направляющих пластин в циклоидальном редукторе, так как зубцы шестерен требуют строго соблюдения допусков, иначе редуктор будет неработоспособен из-за несовместимости составляющих деталей. При малейшем несоблюдении необходимых допусков на этапе создания шестерен будет замечен люфт, который влияет на шум во время работы редуктора, тепловое напряжение, вибрацию, прогиб и распределение нагрузки, люфт со временем будет усиливаться, при значительном люфте зубцы шестерен начнут разрушаться, что приведет к уменьшению срока службы АРМ-манипулятора.

Чтобы снизить стоимость конструкции по отношению к оригинальным запчастям проекта, сравнительный анализ будем проводить на моделях редукторов, основные части которых будут напечатаны на 3D-принтере из пластика PLA. Для определения точности работы редукторов будем использовать индикатор часового типа, преобразующий малые перемещения измерительного щупа в перемещения стрелки по шкале. Измерительные головки используются для относительных измерений, замера неровностей, отклонений и биений поверхностей валов.

Схемы обоих видов редукторов представлены на рис. 2.

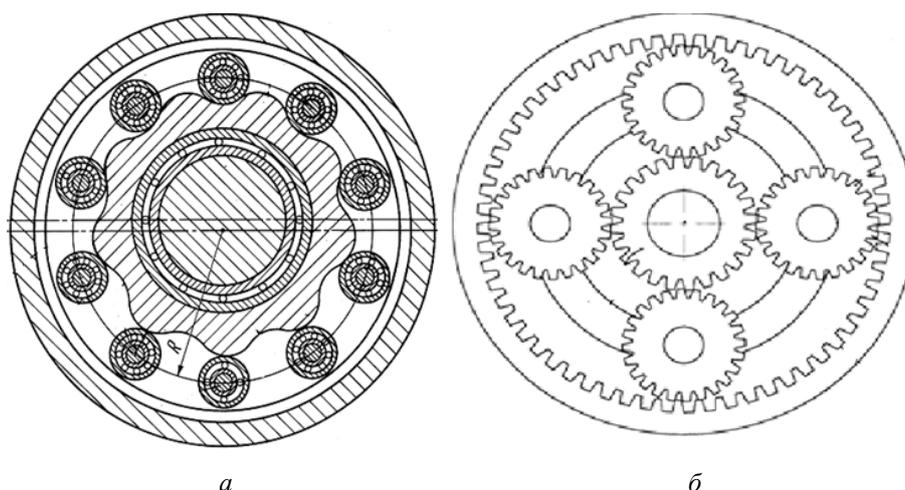


Рис. 2. Схемы редукторов:
a – циклоидальный; *б* – планетарный

В ходе работы были созданы оба типа редукторов, которые представлены на рис. 3.



Рис. 3. Циклоидальный и планетарный редукторы

Планируется провести испытания для проверки ранее рассмотренных описанных характеристик. Разработана методика испытаний, подготовлено необходимое оборудование, запрограммированы микроконтроллеры для управления двигателями редукторов. Результаты испытаний будут изложены в следующих работах.

Библиографические ссылки

1. Этапы развития робототехники 1959–2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://robotforum.ru/novosti-texnologij/epochalnyie-etapyi-razvitiya-robototexniki-1959-2013.html> (дата обращения: 27.12.2022).

2. Синхронный двигатель: устройство, принцип работы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.asutpp.ru/princip-raboty-sinxronnogo-dvigatelya.html> (дата обращения: 21.12.2022).

3. Замкнутые схемы управления электропривода [Электронный ресурс]. URL: https://studref.com/359253/tehnika/zamknutyie_shemy_upravleniya_elektroprivoda (дата обращения: 21.12.2022).

4. I made a DUMMY ROBOTIC ARM from scratch ! [Электронный ресурс]. URL: https://www.youtube.com/watch?v=F29vrvUwqS4&ab_channel=%E7%A8%9A%E6%99%96%E5%90%9B (дата обращения: 22.12.2022).

© Крашенинникова О. В., Шамлицкий А. Я., 2023

ПРОТОТИПИРОВАНИЕ МИКРОТУРБОГЕНЕРАТОРА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ю. Н. Шевченко¹, О. В. Шилкин², А. А. Кишкин¹, К. И. Капушак¹, А. И. Келлер¹

¹Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

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

²Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»
имени академика М. Ф. Решетнева»

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

E-mail: spsp99@mail.ru

В работе приведен обзор общего состояния дел в области проектирования турбин по всей линейке типоразмеров и мощностей. Показано, что область мощностей большой энергетики электрогенерации, область турбостроения средней мощности транспорта и мобильной локации имеет достаточно проработанную научно-теоретическую и проектно-конструкторскую базу как в области литературных источников, так и в области практически серийных конструкций, области малой быстроходности и мощности микротурбин $n_{st} < 40$ и мощностью менее 1000 Вт практически не прорабатывались как научно-технические цели.

Ключевые слова: коэффициент быстроходности, ступень турбины, низкопотенциальное бросовое тепло, утилизация энергии, направляющий аппарат.

В теории турбостроения в основном используется соотношения для расчета и проектирования ступени турбин высокой быстроходности $n_{st} = 100-160$ как осевой, так и радиально-центростремительной схемы. Этой теме посвящены большая часть учебной и научной литературы касающейся различных отраслей турбостроения: турбины большой электрогенерации (электростанции), турбины транспортных устройств (летательные аппараты; наземный, железнодорожный транспорт, различные устройства специального назначения и т. п.) [1; 2; 5]. Большая часть турбин проектируется как ступени активного типа большой мощности, больше 100 кВт. В области распределенной энергетики и практического использования низкопотенциального бросового тепла используются турбины радиально-центростремительного типа мощностью менее 100 кВт с коэффициентом быстроходности $n_{st} = 60-100$. В основном используется соотношение газовой динамики на сверх критических (сверхзвуковых) перепадах давлений и температур. Тема расчетов конструкций и оптимизации параметров изложена достаточно объемно. Для диапазона низкой быстроходности $n_{st} < 60$ тема недостаточно раскрыта в части инженерных расчетных приложений, что вызывает очевидные трудности при моделировании подобных объектов мощностью меньше 100 кВт [3; 4]. На сегодняшний момент турбины малой мощности для утилизации энергии газотранспортных систем и систем добычи углеводородов используются турбины различных специальных конструкций: в том числе вихревые, безлопаточные-центробежные и т. п.

В нашем случае турбины мощностью менее 1 кВт можно идентифицировать (классифицировать) как микротурбины малой быстроходности, размерности и мощности. Вопрос оптимального проектирования и выбора типа турбины остается открытым из-за низкого КПД тихоходных турбомашин, имеющего сходные значения для микротурбин лопаточно-осевого и радиального типа, лабиринтно-вихревых, дисковых турбин,

турбин центробежных и центростремительного типа и т. п. Отдать предпочтение, какому-то типу на данном этапе невозможно. Стоит отметить, что для турбин как активного, так и реактивного типа важнейшим элементом, формирующим окружное направление потока, обеспечивающего окружную работу рабочего колеса является сопловой или направляющий аппарат для быстроходных турбин, выполненных в виде сопловых решеток (в лопаточном венце) для тихоходных и малорасходных машин выполняется одно сопло (сопловой тангенциальный канал). Диапазон выходной мощности по техническому заданию заказчика составляет от 100 до 1000 Вт на дозвуковом перепаде рабочего тела (пара). При перепаде температур не более 60 °С с ограничением оборотов до 5000 об/мин из за требований высокого ресурса. При таких данных не стоит ожидать высоких КПД сравнимых с кпд турбин большой энергетики. Задача оптимального проектирования с целью наивысшего достижения кпд является актуальной. Для постановки задач исследования с проектирован и изготовлен прототип микро турбины с генератором с характерными элементами конструкций на базе центростремительного рабочего колеса детандера (рис. 1).

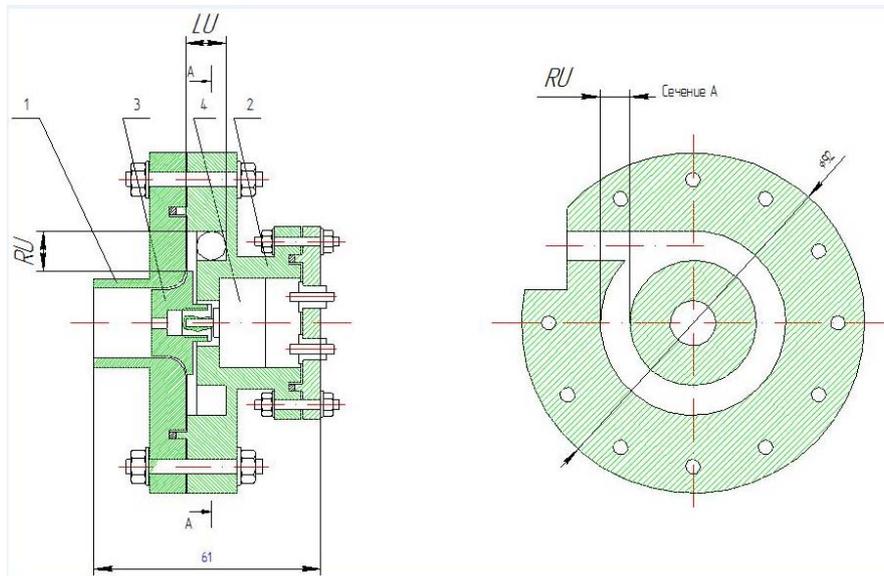


Рис. 1. Прототип микро турбогенератора:
1 – крышка, 2 – корпус микро турбины с тангенциальным подводящим устройством;
3 – рабочее колесо, 4 – генератор

Из конструкции видно, что тангенциальный канал является основным элементом формирующим окружное течение потока, конструктивно следует выделить область радиально-окружного потока RU и осе-окружного потока LU. Общий вид турбогенератора показан на рис. 2, 3, 4.

Существующие на сегодняшний день конструкции системы терморегулирования (СТР) автономных космических аппаратов (КА) с длительным сроком активного существования (до 15 лет) используют практически весь спектр известных конструкторских решений: естественная теплопроводность от источника до радиатора-излучателя в черный космос; сложная конструкция системы тепло-транспортных тепловых труб; жидкостно-контурная передача тепла с «южной» на «северную» панель, двухфазные контуры (ДФК) с динамической (насосной) системой подачи в контуре до контурной тепловой трубы.

Указанный перечень в последовательности обеспечивает рост массоэнергетической характеристики системы СТР (Вт/кг). Следует отметить, что габариты северной и южной панелей определяются площадью испарителя и конденсатора СТР, интегрирован-

ных в сотопанели и определяют, в основном, габариты и силовую схему КА в целом. Следующий логический шаг: рекуперация электрической энергии в системе ДФК на основе органического цикла Ренкина с целью снижения тепловой нагрузки на конденсатор – излучатель. Самым важным узлом такой системы является турбопривод, состоящий из подводящего устройства, обеспечивающего поле скоростей и давлений на входе в последующее рабочее колесо турбины. Для турбин малой быстроходности с малорасходным парциальным подводом характерна значительная несимметричность полей термодинамических параметров, приводящая к значительным отклонениям в результатах расчета по методикам полноразмерных агрегатов. В соответствии с изложенным, следуя поставленной цели: повышение массоэнергетических характеристик двухфазных СТР за счет применения турбогенератора в цикле Ренкина, необходимо поставить следующую последовательность задач:



Рис. 2. Вид на рабочее колесо со стороны крышки



Рис. 3. Крышка и корпус генератора



Рис. 4. Вид со стороны крышки генератора

- для разработки методики и расчета и оптимизации конструкции микротурбины необходимо провести исчерпывающие теоретическо-экспериментальные исследование течения рабочего тела в подводящем устройстве;
- разработать оборудование, методику проведения и обработки результатов экспериментальных исследований;
- провести теоретические исследования радиально-окружных и осе-окружных потоков как элементов подводящего устройства микротурбины;
- разработать и изготовить комплект типоразмеров подводящих устройств с целью получения энергетических характеристик в диапазоне изменения конструктивных и режимных параметров;
- провести экспериментальные исследования энергетических характеристик подводящих устройств с оформлением базы данных по основным конструктивным и режимным параметрам;

- провести сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований и разработать структурно-математическую модель течения в подводящем устройстве при формировании потока на входе в рабочее колесо;
- разработать расчетные алгоритмы для проектирования и расчета энергетических характеристик подводящего устройства микротурбины центробежного типа.

Библиографические ссылки

1. 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.
2. Паротурбинные установки с органическими рабочими телами / [М. М. Гришутин, А. П. Севастьянов, Л. И. Селезнев, Е. Д. Федорович]. М. : Машиностроение, 1988. 219 с. : ил.; 22 см.; ISBN 5-217-00076-7 (В пер.) : 1 р. 20 к.
3. Analysis of the key design features of low-power turbines for electricity generation / A. A. Kishkin, Yu. N. Shevchenko, A. V. Delkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 62030.
4. Использование турбоустановок малой мощности для реализации системы распределенного электроснабжения на территории Красноярского края / А. А. Кишкин, Т. Г. Чабукашвили, К. А. Чайкина, М. У. Абдуллаев // Инновационный дискурс развития современной науки : сборник статей II Международной научно-практической конференции. Петрозаводск, 2020. С. 6–9.
5. Аналитический подход при исследовании уравнений импульсов пограничного слоя при течении в межлопаточном канале газовых турбин / А. А. Кишкин, А. А. Зуев, А. В. Делков, Ю. Н. Шевченко // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 45–60.

© Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Кишкин А. А.,
Капушак К. И., Келлер А. И., 2023

УЧЕТ ЭТАПА КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ПОДГОТОВКИ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Д. О. Дударьков, И. М. Журавлев, И. Е. Лысенко

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»
имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: zhuravlevim@iss-reshetnev.ru

В работе описана возможность повышения уровня подготовки разработчиков радиоэлектронной аппаратуры за счет учета этапа комплексных испытаний. Приведена последовательность проведения комплексных испытаний радиоэлектронной аппаратуры, описаны возможные способы реализации предложенных решений в учебный процесс.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура, проведение испытаний, имитационное моделирование.

Современный подход к высшему техническому образованию подразумевает комплексное обучение высококвалифицированных специалистов, способных приступить к практической работе в минимально возможные сроки (к примеру, направление подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» [1]). Характерными особенностями подобного метода обучения является необходимость усвоения студентами обширного теоретического материала и закрепление приобретенных знаний и компетенций за счет выполнения практических заданий – индивидуальных, групповых и курсовых проектов, а также обширной работой с программами имитационного моделирования.

Ярким недостатком подобного подхода является низкий уровень подготовки к проведению разработки изделий радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) с учетом проведения комплексных испытаний. Прошедшие обучение специалисты не обладают или имеют слабое представление о том, какие требования предъявляются к аппаратуре гражданского, двойного и специального назначения, каким образом эти требования подтверждаются и о комплексных методиках проектирования. Соответственно, снижается профессиональный уровень подготовленных специалистов, что негативно влияет на рейтинг подготовившего их учебного заведения.

Цель данной публикации заключается в модернизации методики обучения специалистов-разработчиков РЭА за счет расширения перечня этапов проектирования, учитывающих проведение основных видов испытаний.

Необходимо учитывать, что для любого разрабатываемого изделия РЭА порядок и объем проводимых испытаний в первую очередь определяет техническое задание, в котором данные пункты указываются либо явно, либо в виде ссылок на соответствующие ГОСТ, ОСТ, СТО и иные нормативные документы. Однако, как правило, набор основных испытаний РЭА [2] неизменен и включает в себя контроль электрических характеристик изделия при последовательном варьировании электрических, термических и термобарических параметров. Проведение комплексных испытаний включает в себя (рис. 1):

– проверку соответствия электрических характеристик изделия требованиям ТЗ при нормальной температуре и давлении, во всем диапазоне питания и нагрузок. На данном этапе происходит контроль корректной работы как отдельных функциональных узлов,

так и изделия в целом. На рис. 1, данный этап обозначен как «Электрические испытания».

– проверку соответствия электрических характеристик изделия требованиям ТЗ при нормальном давлении, во всем диапазоне питания, нагрузок и температуры. Учитывая, что скорость изменения температуры функционального узла на порядок ниже скорости изменения его электрических параметров, контроль характеристик необходимо проводить по достижению изделием теплового равновесия. На рис. 1, данный этап обозначен как «Термические испытания»;

– проверку соответствия электрических характеристик изделия требованиям ТЗ при пониженном давлении во всем диапазоне питания, нагрузок и температуры. Основным отличием от предыдущего режима, с позиции учета электрических параметров, является повышенная температура элементов РЭА, ввиду снижения скорости теплообмена с окружающей средой. На рис. 1 данный этап обозначен как «Термобарические испытания».

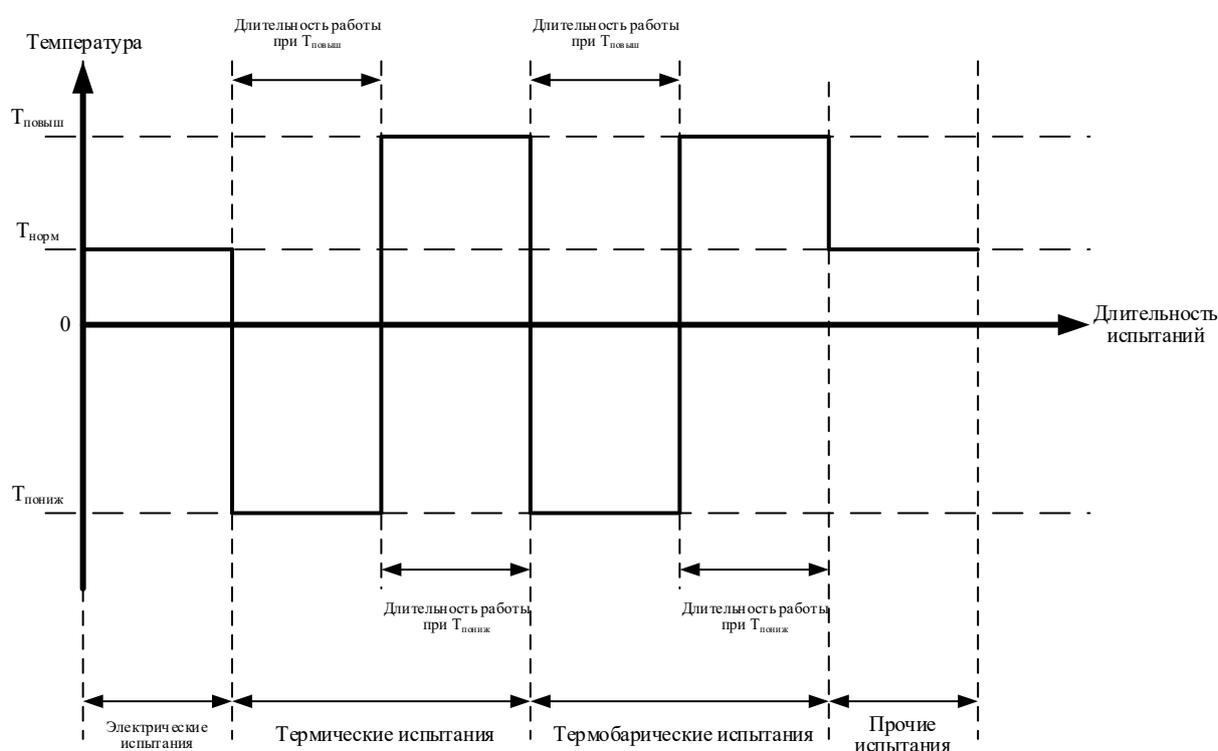


Рис. 1. Последовательность комплексных испытаний РЭА:

$T_{\text{повыш}}$ – максимальная температура работы РЭА (как правило, плюс 60...100 °С);

$T_{\text{норм}}$ – нормальная температура работы РЭА;

$T_{\text{пониж}}$ – минимальная температура работы РЭА (как правило, минус 60...80 °С)

Кроме того, при проведении испытаний необходимо учитывать фактор временной деградации электроизделий (ЭРИ) и, соответственно, комплексный уход параметров изделия от заданных. Соответственно, для проверки того, насколько корректно спроектированы как отдельные функциональные узлы, так и все изделие в целом, необходимо проведение ресурсных испытаний.

Исходя из вышесказанного, в процессе обучения и самостоятельной работы, обучающийся должен приобрести и закрепить навык мультипараметрического анализа и разработки функционального узла РЭА.

Рассматривая только крайние точки рабочего диапазона, нетрудно оценить, что введение температурной, атмосферной зависимостей, а также эффекта временной деграда-

ции ЭРИ приводит к экспоненциальному росту количества рабочих точек, требующих проведения расчета и имитационного моделирования.

К примеру, при проведении только электрического анализа можно считать, что есть лишь две переменных для анализа РЭА и четыре рабочие точки, а именно:

- 1) при минимальном напряжении питания и минимальной нагрузке;
- 2) при минимальном напряжении питания и максимальной нагрузке;
- 3) при максимальном напряжении питания и минимальной нагрузке;
- 4) при максимальном напряжении питания и максимальной нагрузке;

Учет температурных зависимостей увеличит количество рабочих точек, приведенных выше, как минимум втрое, поскольку каждую из них необходимо просчитать при пониженной, нормальной и повышенной температурах. Учет работы при различных уровнях давления, а также изменение характеристик ЭРИ и изделия под воздействием временной деградации приводит к лавинообразному росту объема проводимого студентом анализа и расчета. Для снижения нагрузки на обучающегося и оптимизации однотипных процессов расчета, предлагается два подхода – применение мультипараметрических моделей для программ имитационного моделирования и работа с учебными стендами, обеспечивающими возможности проведения комплексных испытаний.

Применение мультипараметрических моделей в программах имитационного моделирования, таких как SimInTech, Fastmean, DeltaDesing, PSpice, LTSpice, Micro-Cap, Matlab и др. позволяет оптимизировать процесс анализа и расчета РЭА, поскольку позволяют определить электрические параметры РЭА в процессе работы при любой заданной температуре (или диапазоне температур). Однако существенным недостатком данного подхода является необходимость в реализации двухскоростного моделирования: «медленного», учитывающего изменение температуры, и «быстрого», учитывающего изменение электрических параметров исследуемой РЭА. Иностранские программы имитационного моделирования хоть и позволяют провести подобные расчеты [3; 4], однако их возможности достаточно сильно ограничены. При этом в отечественной среде имитационного моделирования SimInTech [5] удалось решить проблему разделения скоростей моделирования, что делает индивидуальные задания и лабораторные работы, выполненные в SimInTech, перспективным вариантом для внедрения в учебный процесс.

Создание учебных стендов, обеспечивающих возможность комплексных испытаний поведения РЭА, является следующим шагом в повышении уровня подготовки специалистов. При этом практическая реализация подобных устройств является весьма нетривиальной задачей, поскольку только для температурной зависимости необходимо реализовать два взаимно независимых контура формирования температуры – повышающий, для диапазона выше плюс 25 °С, и понижающий, для диапазона ниже плюс 25 °С. Подобные учебные стенды, в виде программно-аппаратных комплексов, могут быть изготовлены и внедрены в учебный процесс уже сейчас. Однако внедрение дополнительных систем формирования давления, срока службы изучаемых изделий и иных параметров, необходимых для изменения и контроля приводит к неоправданному росту стоимости и сложности обучения.

Соответственно, уже сейчас, без наличия дополнительных ресурсов, учебные заведения способны повысить уровень подготовки специалистов, за счет внедрения в процесс обучения проектированию РЭА дополнительных этапов (рис. 2).

Итогом внедрения предложенного подхода к обучению студентов указанной последовательности проектирования РЭА, помимо повышения профессионального уровня подготовки и востребованности специалиста, будет являться формирование навыка системного проектирования и углубление понимания физики протекающих в изделии процессов.



Рис. 2. Последовательность этапов проектирования и расчета РЭА

Благодарности.

Проект реализуется победителем грантового конкурса для преподавателей магистратуры 2021/2022 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

Библиографические ссылки

1. ФГОС ВО – бакалавриат по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника [Электронный ресурс]. URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-11-03-04-elektronika-i-nanoelektronika-927> (дата обращения: 05.02.2023).

2. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. Введ. 1982-01-01. М., 1981, 39 с.

3. Коваленко С. Н. Моделирование аналоговых устройств в Micro-Cap : методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов специальности 220201.65 «Управление и информатика в технических системах». Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2007. 20 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/16558057/page:10/> (дата обращения: 05.02.2023).

4. Simulating Thermal Effects in Semiconductors. MathWorks Support [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/simulating-thermal-effects.html> (дата обращения: 05.02.2023).

5. Построение алгоритмов управления термовакуумными испытаниями в среде SimInTech / А. В. Чубарь, И. Н. Пожаркова, В. В. Устименко // Космические аппараты и технологии. Железногорск, 2019. Т. 3, № 3. С. 149–154.

© Дударьков Д. О., Журавлев И. М., Лысенко И. Е., 2023

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА INCONEL 718, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ SLM-ПЕЧАТИ

Э. С. Манохина, В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: xim96@inbox.ru

В работе проводится анализ особенности механических свойств материала, изготовленным методом 3D-печати из металлического порошка марки ПР08-ХН53БМТЮ на основе сплава Инконель 718.

Ключевые слова: Инконель 718, аддитивные технологии, испытания.

Жаропрочные сплавы системы «никель–хром–железо», разработанные в конце 1940-х годов, хорошо зарекомендовали себя в двигателестроении и впоследствии непрерывно совершенствовались, главным образом за счет легирования тугоплавкими металлами (Nb, Mo и др.). Одним из наиболее распространенных серийных сплавов данной системы является сплав Inconel 718. В настоящее время сплав Inconel 718 широко применяется в авиакосмической и атомной промышленности. В частности, он используется в газовых турбинах, реактивных двигателях, ядерных реакторах, сосудах высокого давления благодаря высокой стабильности его механических свойств при повышенных температурах (до 800 °С).

Химический состав Inconel 718 – никель-хром-железо, с добавками алюминия, титана, молибдена и ниобия.

Основные особенности и преимущества сплава:

- хорошие технологические свойства в состоянии диффузионного отжига;
- высокие механические кратковременные, длительные свойства и прочность;
- хорошее сопротивление ползучести при 700 °С;
- хорошая коррозионная стойкость до 1000 °С;
- отличные механические свойства при низких температурах;
- отличная коррозионная стойкость при высоких и низких температурах, а также хорошая стойкость против коррозионного растрескивания и точечной коррозии;
- хорошая свариваемость при применении дуговой и контактной сварки без предрасположенности к растрескиванию к сварке.

Механические свойства сплавов данного типа в значительной мере зависят от способов литья и вида термической обработки.

При изготовлении образцов использовался порошок марки ПР08-ХН53БМТЮ. Изучение химического состава модельного материала проведено на спектрометре 67A1053 HITACHI PMI-MASTER UVR [1]. Изучаемые образцы отпечатаны одновременно с камеры-демонстратора, на одном режиме печати. Оборудование для испытаний имеет сертификаты годности и аттестовано для применения на предприятии ракетно-космической отрасли.

Содержание легирующих элементов материала представлено в табл. 1.

По содержанию вышеуказанных элементов, материал образцов соответствует марке Инконель 718.

Для проверки механических характеристик проводились испытания материала стандартных образцов камеры-демонстратора на растяжение и определение микротвердости

по методу Виккерса [2]. В результате исследований были получены значения пределов текучести, пределов прочности, деформаций при разрыве и твердости материала [3]. Результаты приведены в табл. 2 и на рисунке.

Таблица 1

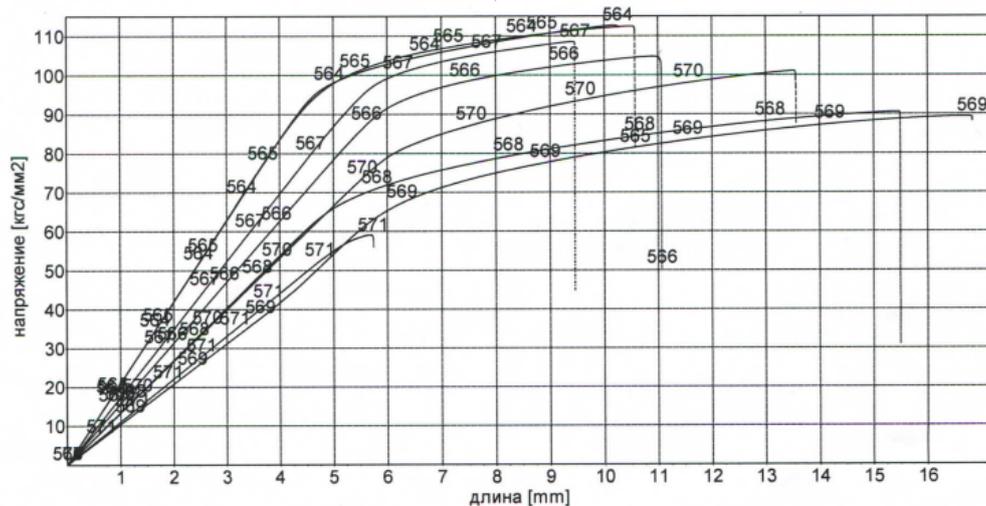
Химический состав сплава, %

| Элемент | Ni | Si | Mn | Cr | Mo | Cu | Fe | Co | Ti | Al | C | S | P | As |
|---------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| % | 51,2 | 0,115 | 0,124 | 20,6 | 3,27 | 0,116 | 16,8 | 0,181 | 1,03 | 0,688 | 0,0429 | 0,0365 | 0,0365 | 0,0036 |

Таблица 2

Результаты механических испытаний образцов

| Наименование детали | № образца | Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), МПа | Предел прочности (σ_B), МПа | Относительное удлинение (δ), (%) | Твердость, НВ5/250 |
|--------------------------------|-----------------------|--|--------------------------------------|---|--------------------|
| Образцы | 1. С термообработкой | 952,7 | 1127,8 | * | 38 |
| | 2. С термообработкой | 928,6 | 1125,3 | 11,00 | 39 |
| | 3. С термообработкой | 905,6 | 1047,8 | 11,80 | 39 |
| | 4. С термообработкой | 959,1 | 1085,1 | * | 38 |
| | 5. Без термообработки | 663,1 | 905,9 | * | 31 |
| | 6. Без термообработки | 710,5 | 894,0 | 12,80 | 31 |
| | 7. Без термообработки | 802,3 | 1010,2 | 15,60 | 31 |
| | 8. Без термообработки | 576,9 | 591,1 | * | 31 |
| *образцы разрушились по кернам | | | | | |



Результаты испытания образцов на растяжение

После обработки результатов испытаний получены усредненные значения механических характеристик материала и модулей упругости для термообработанных образцов и образцов без термообработки (табл. 3).

Таблица 3

| № образца | Модуль упругости (E), МПа | Остаточная деформация при разрыве ($\delta_{ост}$), % |
|----------------------|---------------------------|---|
| 1. С термообработкой | $0,214 \cdot 10^5$ | 5,27 |
| 2. С термообработкой | $0,209 \cdot 10^5$ | 5,38 |
| 3. С термообработкой | $0,176 \cdot 10^5$ | 5,95 |
| 4. С термообработкой | $0,156 \cdot 10^5$ | 6,95 |

| № образца | Модуль упругости (E), МПа | Остаточная деформация при разрыве ($\delta_{ост}$), % |
|-----------------------|---------------------------|---|
| 5. Без термообработки | $0,139 \cdot 10^5$ | 6,51 |
| 6. Без термообработки | $0,139 \cdot 10^5$ | 6,43 |
| 7. Без термообработки | $0,116 \cdot 10^5$ | 8,7 |
| 8. Без термообработки | $0,113 \cdot 10^5$ | 5,23 |

Термообработка образцов привела к увеличению их прочностных характеристик, твердости, снижению упругости и пластичности. Полученные характеристики по напряжениям близки с результатами работы [4] а по деформациям существенно меньше.

Библиографические ссылки

1. Металлографический анализ камеры, изготовленной методом 3D-печати / Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков [и др.] // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Часть 1. Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 175–177.

2. Анализ механических характеристик материала корпуса камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом 3D-печати / Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков [и др.] // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Часть 1. Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 172–174.

3. ГОСТ 1497–84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) Металлы. Методы испытаний на растяжение (с Поправками и Изменениями № 1, 2, 3) / ГОСТ № 1497–84.

4. Грязнов М. Ю. Физико-механические свойства и структура сплава Inconel 718, полученного по технологии послойного лазерного сплавления / М. Ю. Грязнов, С. В. Шотин, В. Н. Чувильдеев // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2014. № 4-1. С. 46–51.

© Манохина Э. С., Журавлев В. Ю., 2023

ОСНОВНЫЕ ТЕРМО- И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО СЖИМАЕМЫМ ЖИДКОСТЯМ

Ю. Н. Шевченко¹, О. В. Шилкин², А. А. Кишкин¹, К. И. Капушак¹, А. И. Келлер¹

¹Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

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

²Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»
имени академика М. Ф. Решетнева»

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

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, а также использовать соотношения для математического моделирования рабочих процессов.

Ключевые слова: уравнение энергии Бернулли, энтальпия, число Маха, уравнение состояния, относительные скорости, давления, температур.

При формировании алгоритмов обработки данных испытаний двигателей, агрегатов и турбомашин, использующих как рабочее тело сжимаемый или охлаждаемый газ, как основное используется уравнение энергии на шаге интегрирования или в плоскости замера параметров процесса адиабатического течения [1, 2, 4].

Уравнение энергии (уравнение Бернулли) в механической форме [1, 3], определяющей скоростной напор (скорость потока) при адиабатической трансформации газа:

$$\frac{k}{k-1} \frac{p^*}{\rho^*} = \frac{p}{\rho} \cdot \frac{k}{k-1} + \frac{c^2}{2}, \quad (1)$$

где p , p^* – полное и статическое измеряемые давления потока в точке, при известных p и p^* возможно определение скоростного напора.

Уравнение состояния для воздуха (модельного рабочего тела – идеального газа) в общем случае:

$$p \frac{1}{\rho} = RT. \quad (2)$$

Для случая уравнения (1) необходимо использовать два уравнения состояния:

$$\begin{aligned} \frac{p^*}{\rho^*} &= RT^*; \\ \frac{p}{\rho} &= RT. \end{aligned} \quad (3)$$

где T^* ; T – температуры торможения и статическая температура в точке измерения.

Следует учитывать, что термодинамическая температура может быть измерена только таким термоприемником, относительная скорость которого равна нулю. В ином случае (неподвижный относительно стенки канала) термометр будет показывать некото-

рую температуру $T_{ст}$, связь между которыми определяется из уравнения энергии в термодинамических параметрах:

$$i^* = i + \frac{C^2}{2}; \quad (4)$$

$$T^* = T + \frac{C^2}{2Cp},$$

где i – энтальпия; T – температура; Cp – теплоемкость.

Промежуточную температуру называют измеренной температурой [2; 3].

$$T_{изм} = T + r \frac{C^2}{2Cp}, \quad (5)$$

где r – коэффициент восстановления, который зависит от физических свойств потока и геометрии обтекаемой поверхности.

$$r = r(P_r; k; M; Re). \quad (6)$$

Для продольно обтекаемой пластины при ламинарном пограничном слое:

$$r \approx \sqrt{P_n}, \quad (7)$$

при турбулентном слое:

$$\begin{aligned} r &\approx \sqrt[3]{P_n}; \\ P_r &= 0,72; \\ k &= 1,4. \end{aligned} \quad (8)$$

При поперечном обтекании проволоки газом при $Re < 3000$

$$r = (0,355 + 2,14P_r)(k - 1); \quad (9)$$

$$Re = 3000, r = 0,76; \quad (10)$$

$$Re > 20000; M > 0,7; r = 0,92. \quad (11)$$

Таким образом, из (5) с учетом (6)...(11) можно определить T . Связь между температурой торможения и статической температурой определяется:

$$T^* = T + \frac{C^2}{2Cp} = T \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right), \quad (12)$$

где число Маха:

$$M = \frac{c}{a} = \frac{C}{\sqrt{kRT}} = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{p^*}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}. \quad (13)$$

Относительная скорость:

$$\lambda = \frac{C}{a_{kp}} = \frac{C}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} RT^*}}; \quad (14)$$

Число M и λ связаны соотношением:

$$M = \sqrt{\frac{2}{k+1}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2}}. \quad (15)$$

Из уравнения энергии:

$$i + \frac{C^2}{2} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p}{\rho} + \frac{C^2}{2}. \quad (16)$$

С помощью уравнения адиабаты $p v^k = \text{const}$ и относительной скорости и скорости звука (15), (16) определяются необходимые безразмерные функции [1]:

– относительная температура:

$$\tau_f = \frac{T}{T^*} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 = \frac{1}{1 + \frac{k-1}{2} M^2}; \quad (17)$$

– относительное давление:

$$\pi_f = \frac{p}{p^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k}{k-1}}}; \quad (18)$$

– относительная плотность:

$$\varepsilon_f = \frac{\rho}{\rho^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{1-k}}}; \quad (19)$$

– соотношение (17; 18; 19):

$$\tau_f = \pi_f^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} = \varepsilon_f^{(k-1)};$$

– приведенная плотность потока масса – есть отношение плотности потока массы в произвольном сечении F к плотности потока массы в критическом сечении $F_{\text{кр}}$:

$$\begin{aligned} q_f &= \frac{\rho c}{\rho_{\text{кр}} \alpha_{\text{кр}}} = \frac{F_{\text{кр}}}{F} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} = \\ &= \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \frac{M}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}; \end{aligned} \quad (20)$$

– функция динамического напора, отношение динамического давления в сечении к полному давлению в том же сечении:

$$j_f = \frac{p c^2}{2 p^*} = \frac{k}{k+1} \cdot \lambda^2 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} = \frac{k}{2} \cdot \frac{M^2}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k}{k-1}}}. \quad (21)$$

– из уравнения неразрывности $\dot{m} = \rho c F$, относительной скорости (8), относительной плотности (19) следует:

$$\dot{m} = \rho \cdot c \cdot F = m \cdot \frac{p^* F \cdot qf}{\sqrt{T^*}}, \quad (22)$$

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

Система предложенных соотношений позволяет сформировать замкнутый алгоритм обработки данных по температурам, давлениям, скоростям и расходам в проточной части двигателей, агрегатов, турбомашин и компрессоров.

Библиографические ссылки

1. Галеркин Ю.Б., Рекстин Ф.С. Методы исследования центробежных компрессорных машин. Ленинград : Машгостроение, 1969, 304 с.
2. Кутателадзе С.С. Теплопередача при конденсации и кипении. 2-е изд., доп. и перераб. М. : Машгиз, 1952. 232 с.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Москва : Атомиздат, 1979. 416 с.
4. 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.

© Шевченко Ю. Н., Шилкин О. В., Кишкин А. А., Капушак К. И., Келлер А. И., 2023

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

Предложена методика имитационного вероятностно-статистического моделирования и расчета параметрической надежности, которая позволяет учесть случайный характер параметров, характеристик и свойств элементов технических систем и процессов потери их работоспособности, перейти к оценке вероятности их безотказной работы.

Ключевые слова: имитационное моделирование, параметрическая надежность, метод Монте-Карло, генераторы случайных чисел.

Модели отказов технических объектов (элементов и систем) обычно представляют собой формализованное описание процессов потери работоспособности, которые позволяют установить функциональные связи между характеристиками элемента и происходящих в нем при эксплуатации процессов и параметрами надежности в некоторых простейших случаях [1–4]. Статистическая природа этих закономерностей проявляется в том, что аргументы функций являются случайными величинами и зависят от большого числа факторов [3].

Если случайные величины, значения которых оказывают определяющее влияние на работоспособность элемента, распределены по сложным законам или надежность элемента определяется воздействием еще и других случайных факторов (параметров окружающей среды, характеристик обрабатываемых материалов и т.д.), то аналитический расчет надежности становится практически невозможным [3].

В этих случаях для прогнозирования поведения элементов и систем целесообразно воспользоваться методами статистического имитационного моделирования, которые являются практически универсальными для определения закона распределения параметров состояния технических объектов и расчета надежности по известным законам распределения влияющих на него случайных величин [5–8].

Статистическое моделирование – метод исследования, основанный на описании состояния или процессов функционирования элементов в их взаимосвязи друг с другом и с окружающей средой с целью получения множества частных результатов, подлежащих обработке методами математической статистики. Если статистическое моделирование выполняется с использованием имитационной модели, то такое моделирование называется имитационным.

Имитационное моделирование обеспечивает возможность испытания, оценки и проведения экспериментов с исследуемой системой без каких-либо непосредственных воздействий на нее.

Достоинством статистического моделирования является универсальность, гарантирующая принципиальную возможность проведения анализа систем любой степени сложности с любой степенью детализации. Недостаток статистического моделирования – трудоемкость процесса моделирования и частный характер результатов, не раскрывающий зависимости, а лишь определяющий ее в отдельных точках.

В основе имитационного статистического моделирования лежат методы статистических испытаний – методы Монте-Карло – группа численных методов для изучения случайных процессов [9–12]. При этом процесс описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин. Модель многократно обчисляется, на основе полученных данных вычисляются вероятностные характеристики процесса.

Расчеты методом Монте-Карло проводится, как правило, с помощью генераторов псевдослучайных чисел, представляющих некоторые вычислительные программы. Преимуществами псевдослучайных чисел являются возможность при необходимости повторного воспроизведения расчетов, быстрота получения чисел, отсутствие внешних устройств и необходимости многократной проверки качества получаемых чисел, малая загруженность памяти компьютера [12].

Основная идея метода Монте-Карло при статистическом моделировании надежности заключается в многократном расчете определяющего параметра (или параметров) по известным зависимостям, описывающим процесс потери работоспособности [3]. При этом для случайных аргументов, входящих в расчетные формулы, перебираются их значения в соответствии с известными законами распределения. Таким образом, каждое статистическое испытание заключается в выявлении одной из реализаций случайного процесса или события, а их совокупность позволяет оценить ход этого процесса и его основные параметры.

В общем случае можно считать, что значение определяющего параметра X определяется набором случайных величин Z_i ($i = 1, 2, \dots, n$), законы распределения которых известны (или дискретные значения которых заданы своими вероятностями) [3; 4]:

$$X = X(Z_1, Z_2, \dots, Z_n). \quad (1)$$

Так как аргументы функции (1) являются случайными величинами, то и параметр X является случайной величиной. Поэтому для анализа надежности по параметру X необходимо проанализировать его распределение и для оценки вероятности безотказной работы определить долю, которую составляют допустимые режимы ($X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$).

На первом этапе реализации метода Монте-Карло в зависимости от необходимой точности определения характеристик надежности выбирается необходимое число реализаций N . Затем из заданного диапазона изменения каждого из аргументов Z_i по известным законам распределения $f(Z_i)$ случайным образом с использованием генератора случайных чисел выбирается по N значений каждого из аргументов [3–5; 13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 \in \{z_{11}, z_{12}, \dots, z_{1j}, \dots, z_{1N}\}, \\ Z_2 \in \{z_{21}, z_{22}, \dots, z_{2j}, \dots, z_{2N}\}, \\ \dots \\ Z_i \in \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{iN}\}, \\ \dots \\ Z_n \in \{z_{n1}, z_{n2}, \dots, z_{nj}, \dots, z_{nN}\}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Для каждого из наборов значений по формуле (2) рассчитывается определяющий параметр X . По выборке из N значений $X \in \{X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_N\}$ строятся гистограмма параметра X , кривая плотности распределения $f(X)$ и интегральная кривая функции распределения $F(X)$ параметра X . Полученные кривые $f(X)$ и $F(X)$ аппроксимируются какой-либо функцией распределения (если это необходимо) [14].

Для оценки надежности элементов технических систем используются модели отказов двух основных типов – «нагрузка – прочность» (прочностная надежность) и «пара-

метр – поле допуска» (параметрическая надежность) [3; 4]. В обоих случаях элемент считается работоспособным, пока его основные характеристики (определяющие параметры) в процессе эксплуатации не достигнут предельных значений (границ рабочей области) и между моделями этих двух видов имеются только методологические различия [15]. Однако если в первом случае имеют место в основном внезапные отказы (практически мгновенное нарушение работоспособности), то во втором – в основном постепенные (достаточно плавное «сползание» параметров к границе допустимых значений).

Надежность по параметрам прочности (прочностная надежность) – свойство элемента сохранять работоспособное состояние под воздействием внешних нагрузок. Показателями надежности по параметрам прочности могут быть средняя наработка до отказа или вероятность безотказной работы элемента. Показатели прочностной надежности определяются в зависимости от принятых критериев предельного состояния. Критериями предельного состояния по параметрам прочности могут быть определенное число циклов нагружения или накопление определенной величины остаточных изменений параметров, другие характеристики элемента.

Вероятностные статистические расчеты прочности позволяют учесть случайный характер нагрузок и свойств элементов, перейти от оценки прочности по коэффициенту запаса прочности к оценке вероятности безотказной работы и прогнозированию ресурса [3; 4; 16].

Параметрическая надежность (надежность по постепенным отказам) характеризует способность объекта (элемента, системы, устройства) сохранять уровень рабочего (определяющего) параметра (в общем случае – векторного) в допустимых пределах в течение требуемого времени при заданных режимах и условиях работы [4]. Критерием постепенного (параметрического) отказа в данном случае является нарушение условия работоспособности.

Если случайные величины, значения которых оказывают определяющее влияние на работоспособность элемента (начальное значение параметра X_0 , время начала процессов износа или старения t_0 , скорость изменения параметра γ), распределены по более сложным законам или являются дискретными случайными величинами, или надежность элемента определяется воздействием еще и других случайных факторов (например, параметров окружающей среды, характеристик обрабатываемых материалов и т.д.), то аналитический расчет надежности становится практически неразрешимой задачей.

В моделях параметрической надежности типа «параметр – поле допуска» рассматривается результат действия нагрузок в виде изменений физических параметров элементов технических систем. Каждый элемент можно характеризовать определяющим параметром X , который служит мерой качества этого элемента (в общем случае определяющий параметр может быть векторным, т.е. иметь несколько составляющих). Параметр X под действием случайных и детерминированных факторов (процессов износа, старения, разрегулирования и т.д.) изменяется в процессе эксплуатации или хранения элемента и, в конце концов, достигает предельного (критического) значения $X_{пр}$, после чего состояние элемента считается неработоспособным или небезопасным, т.е. происходит отказ или, соответственно, наступает предельное состояние. Область изменения параметра, в пределах которой состояние элемента считается работоспособным, называется рабочей областью или полем допуска.

На рис. 1 показана схема возникновения параметрического отказа, при котором в результате каких-либо процессов (повреждения, износа, старения, разрегулирования и т.д.) происходит постепенное изменение определяющего параметра X [17; 18]. Отказ возникнет при достижении через некоторый (в общем случае случайный) промежуток

времени предельно допустимого значения $X_{пр}$ (для определенности будем считать, что параметр X ограничен по значению сверху ($X \leq X_{пр} = X_{max}$), хотя ограничение может быть и снизу ($X \geq X_{min}$) и с двух сторон одновременно ($X_{min} \leq X \leq X_{max}$)).

На схеме показаны основные этапы формирования закона распределения времени безотказной работы элемента $f(t)$. В начале эксплуатации имеет место рассеивание начального значения определяющего параметра $f(X_0)$ относительно своего математического ожидания X_0 , которое может быть связано с нестабильностью свойств материалов и технологии изготовления элемента, другими внутренними и внешними причинами. Затем в процессе эксплуатации элемента определяющий параметр под действием происходящих в нем процессов начинает ухудшаться. В общем случае изменение параметра может начаться через некоторый промежуток времени от начала эксплуатации t_0 , который также может быть случайной величиной с распределением $f(t_0)$ относительно своего математического ожидания, связанный, например, с процессами накопления повреждений. Скорость изменения определяющего параметра $\gamma = dX/dt$ зависит от природы процессов износа, старения или разрегулирования и других параметров и в общем случае также является случайной величиной. В результате происходит формирование закона распределения $f(X, t)$, определяющего вероятность выхода параметра X за границу поля допуска $X_{пр}$, т.е. вероятность отказа $Q(t) = 1 - P(t)$.

Рассмотренная схема описывает процесс возникновения параметрических отказов в общем виде и в конкретных случаях при частных значениях характеристик и параметров должна отражать конструктивные особенности и условия эксплуатации конкретных элементов технических систем.

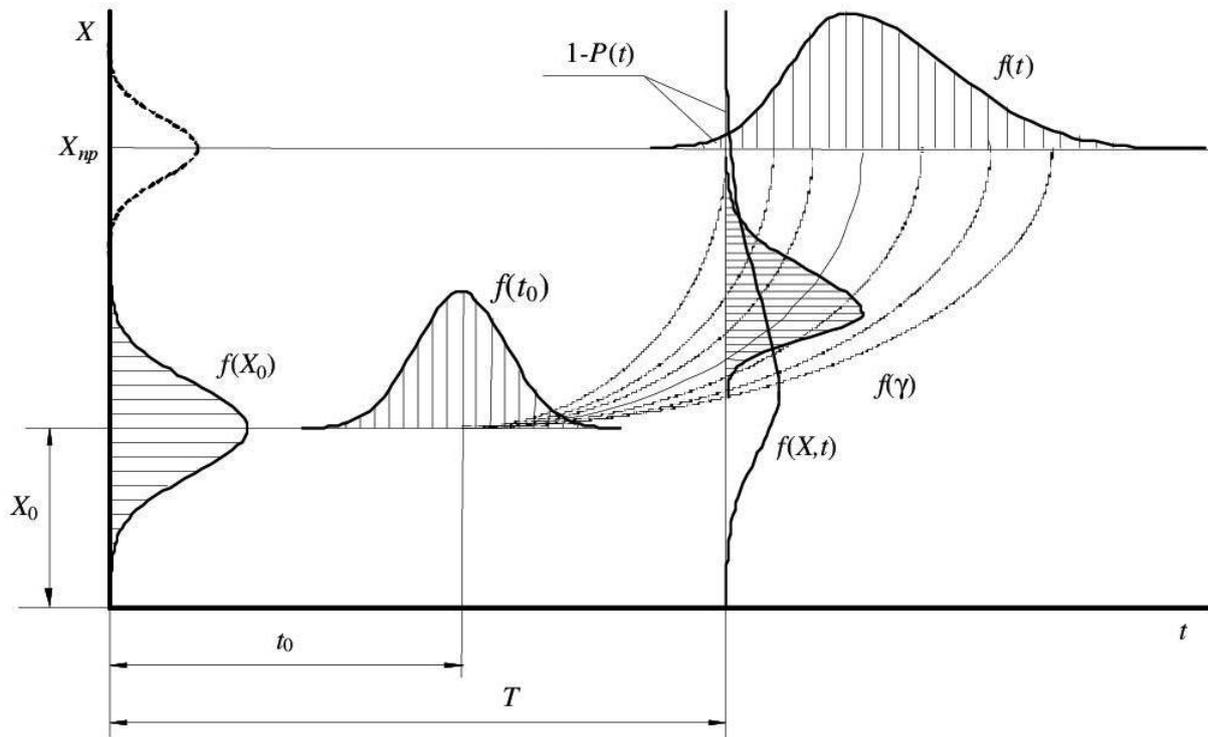


Рис. 1. Общая схема формирования параметрического отказа

Например, для типичного постепенного параметрического отказа характерно начало изменения определяющего параметра X сразу с момента начала эксплуатации ($t_0 = 0$). Если при достижении значения $X_{пр}$ наблюдается резкое изменение определяющего параметра $X(t)$, то такой отказ близок к отказу функционирования. Если же для возникновения отказа основную роль играет зарождение процесса (т.е. функция распределения

$f(t_0)$), а затем процесс протекает с большой интенсивностью, то такая модель близка к модели внезапного отказа.

Разброс начального значения определяющего параметра $f(X_0)$ следует учитывать при расчетах надежности некоторой совокупности элементов (например, партии деталей). Для одного же конкретного элемента значение X_0 является конкретной неслучайной величиной. Если же рассматривается поведение элемента в различных случайных режимах работы под воздействием случайных внешних факторов, то и в случае одного элемента параметр X_0 следует рассматривать как случайную величину.

Период приработки обычно составляет несколько процентов от общего времени эксплуатации. Кроме того, иногда приработка осуществляется на заводе-изготовителе. С другой стороны, обычно элементы проектируются и изготавливаются с расчетом только на второй (основной) период, и их эксплуатация в периоде износа и старения не выгодна и часто недопустима. Поэтому принято считать, что для большинства элементов скорость изменения определяющих параметров постоянна и, соответственно [19; 20]:

$$X = X_0 + \gamma t. \quad (3)$$

В этом случае средняя наработка элемента до отказа T (или средний ресурс, или срок службы) является функцией двух независимых случайных величин – начального значения параметра X_0 и скорости его изменения γ . Очевидно

$$T = (X_{\text{пр}} - X_0) / \gamma \quad (4)$$

(здесь и далее предполагается, что $X_0 < X_{\text{пр}}$, хотя возможен и обратный случай, когда величина определяющего параметра имеет ограничение снизу, однако модель отказа при этом принципиально не изменится).

Если, например, аргументы X_0 и γ распределены по нормальному закону с математическими ожиданиями $M(X_0) = \bar{X}_0$ и $M(\gamma) = \bar{\gamma}$ и средними квадратическими отклонениями σ_{X_0} и σ_γ , то и параметр X в момент времени t также будет распределен по нормальному закону с математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением

$$M(X) = \bar{X} = M(X_0) + M(\gamma)t = \bar{X}_0 + \bar{\gamma}t, \quad \sigma_X = \sqrt{\sigma_{X_0}^2 + (\sigma_\gamma t)^2}. \quad (5)$$

Учитывая, что вероятность безотказной работы элемента $P(t)$ равна вероятности того, что в течение времени t параметр X не превысит значение $X_{\text{пр}}$, получим

$$P(t) = p(X \leq X_{\text{пр}}) = \frac{1}{2} + \Phi \left[\frac{X_{\text{пр}} - (\bar{X}_0 + \bar{\gamma}t)}{\sqrt{\sigma_{X_0}^2 + (\sigma_\gamma t)^2}} \right]. \quad (6)$$

В более общем случае, если математическое ожидание $\bar{\gamma}$ и среднее квадратическое отклонение σ_γ скорости изменения параметра X также являются функциями времени, т. е. изменение параметра происходит не по линейному закону (3)), формулу (6) можно записать в виде

$$P(t) = \frac{1}{2} + \Phi \left\{ \frac{X_{\text{пр}} - [\bar{X}_0 + \bar{\gamma}(t)t]}{\sqrt{\sigma_{X_0}^2 + [\sigma_\gamma(t)t]^2}} \right\}. \quad (7)$$

Аналогичный анализ изменения определяющего параметра в процессе эксплуатации элемента может быть проведен и при других законах распределения параметров X_0 и γ [4].

При более сложных или эмпирических законах распределения для получения функции $P(t)$ можно использовать методы статистического моделирования.

Прогнозирование параметрической надежности элементов методом Монте-Карло позволяет вскрыть статистическую природу процесса потери работоспособности и оценить влияние отдельных факторов. Изменяя параметры распределений случайных величин, можно, например, оценить изменение надежности элемента при изменении конструкции или применении нового материала, изменении диапазона рабочих режимов или условий эксплуатации и т. д. В этом смысле применение методов статистического моделирования предоставляет практически единственную возможность исследования надежности элементов без длительных и дорогостоящих экспериментов на натуральных образцах.

При статистическом моделировании параметрических отказов необходимо найти величину определяющего параметра, скорость его изменения по известным нагрузкам и условиям эксплуатации, а также законам их распределений. Для расчета генерируются случайные сочетания всех параметров с учётом законов распределения. Для каждой реализации находят скорость изменения определяющего параметра, например, износа. Затем определяются распределение параметра или его среднее значение для всех реализаций и среднее квадратическое отклонение и, наконец, вероятность безотказной работы (при заданном предельном значении параметра).

Например, если работоспособность элемента определяется процессом износа, то скорость износа определяется удельным давлением p и скоростью относительного скольжения трущейся пары v [4; 19]:

$$\gamma = kp^a v^b, \quad (8)$$

где k – коэффициент, учитывающий износостойкость материала, условия трения и т. д.; a и b – эмпирические показатели степени.

В качестве определяющего параметра в этом случае можно принять величину (глубину) износа h ($X = h$, $X_0 = h_0$ и $X_{\max} = h_{\max}$).

Для того чтобы смоделировать процесс потери работоспособности, необходимо знать вероятностные характеристики условий эксплуатации. Такими характеристиками могут быть законы распределения нагрузок $f(p)$, скорости скольжения $f(v)$ и условий эксплуатации или коэффициента износа $f(k)$. Кроме того, должны быть известны значения показателей a и b в выражении (8), математическое ожидание $M(X_0) = \bar{X}_0$ и среднее квадратическое отклонение σ_{X_0} начального значения определяющего параметра X_0 .

Примерная блок-схема алгоритма расчета представлена на рис. 2. При его реализации значение скорости износа γ определяется на основании N реализаций случайных величин p , v и k исходя из заданных законов распределения $f(p)$, $f(v)$ и $f(k)$.

Рассмотренный пример иллюстрирует общий методический подход при решении подобных задач методами статистического моделирования. В данном случае скорость процесса считается постоянной и характеризуется одним значением, т. е. моделирование случайной функции сведено к моделированию случайной величины γ . Для нестационарных процессов, когда скорость изменения определяющего параметра изменяется во времени, каждую из реализаций случайной величины γ можно считать ее значением в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_N , охватывающие весь исследуемый диапазон работоспособности элемента, и таким образом исследовать изменение надежности во времени.

Таким образом, при прогнозировании постепенных отказов применение имитационного статистического моделирования позволяет провести оценку параметров надёжности без длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований.

Более сложные случаи встречаются при взаимной зависимости между смежными (двумя или более) значениями случайных параметров (множественная корреляция) (рис. 2).

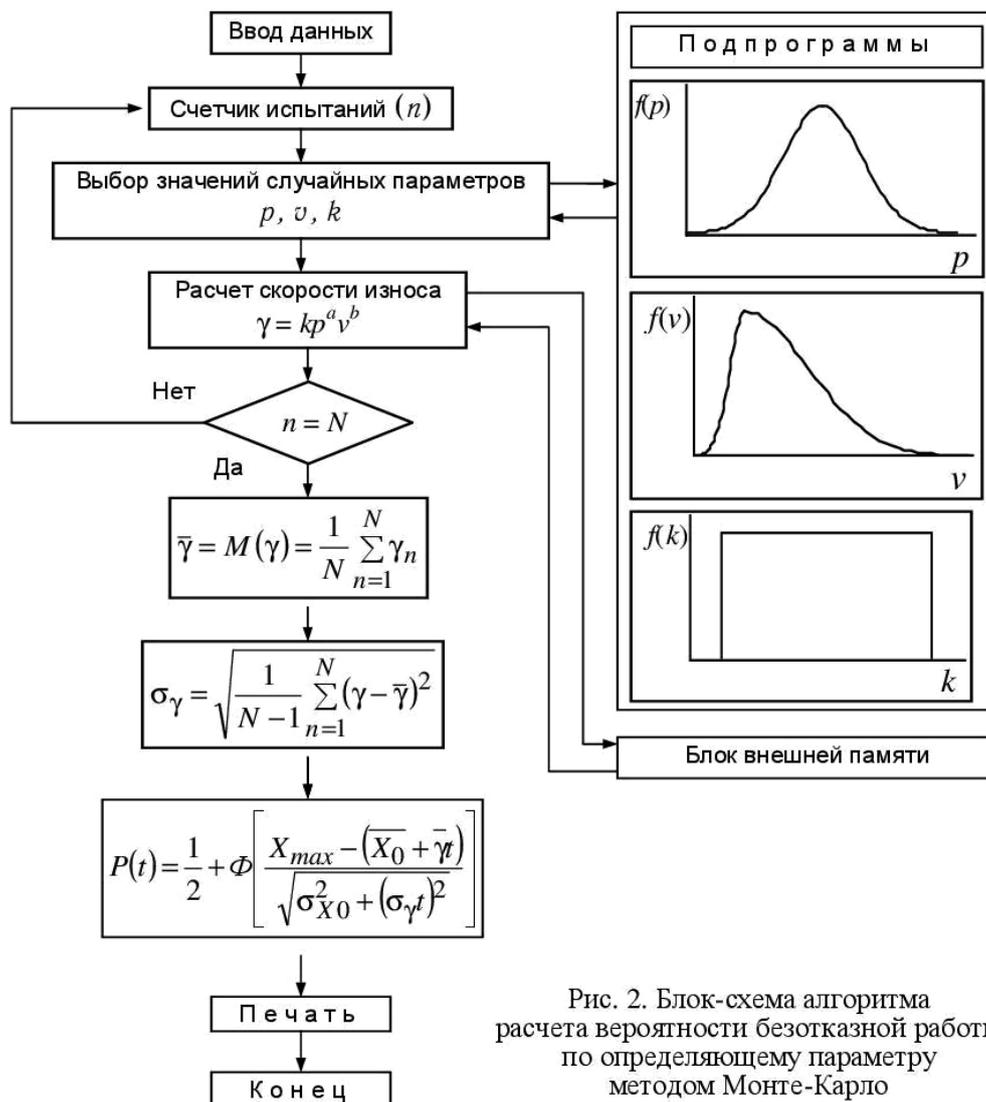


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета вероятности безотказной работы по определяющему параметру методом Монте-Карло

Тогда при реализации метода Монте-Карло необходимо моделировать еще и корреляционные функции.

Библиографические ссылки

1. Сапожников В.В., Сапожников В.В., Ефанов Д.В. Основы теории надежности и технической диагностики. СПб.: Лань, 2019. 588 с.
2. Гусев А.С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э.Баумана, 2009. 224 с.
3. Сугак Е.В., Бразговка О.В. Статистическое моделирование прочностной надежности элементов технических систем // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : сб. материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 2022. С. 35–41.
4. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности: учебник для вузов. Часть 1: Основы теории. СПб.: Лань, 2022. 276 с.
5. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 420 с.
6. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.

7. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. СПб.: Питер, 2004. 847 с.
8. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. М.: Юрайт, 2019. 343 с.
9. Шрейдер Ю.А. и др. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). М.: Изд-во физико-математической литературы, 1962. 334 с.
10. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 311 с.
11. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и системные вопросы. М.: Наука, 1975. 327 с.
12. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. М.: Академия, 2006. 368 с.
13. Креденцер Б.П. и др. Решение задач надежности и эксплуатации на универсальных ЭЦВМ. М.: Сов. радио, 1967. 400 с.
14. Сугак Е.В., Окладникова Е.Н. Прикладная теория случайных процессов. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2006. 168 с.
15. Барзилович Е.Ю. и др. Вопросы математической теории надежности. М.: Радио и связь, 1983. 376 с.
16. Гребеник В.М., Цапко В.К. Надежность металлургического оборудования: Справочник. М.: Металлургия, 1980. 344 с.
17. Надежность и эффективность в технике: справочник: В 10 т. Т. 5. Проектный анализ надежности. М.: Машиностроение, 1988. 316 с.
18. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
19. Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
20. Кузьмин Ф.И. Задачи обеспечения надежности технических систем. М.: Радио и связь, 1982. 176 с.

© Бразговка О. В., Сугак Е. В., 2023

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ НА ИЗДЕЛИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. А. Румынин, 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

Проведен анализ методов ультразвукового контроля в изделиях РКТ по доступным открытым источникам.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, сварные швы, дефектоскопия, методы.

В ракетно-космической отрасли предъявляются следующие требования:

1. Корпуса изделия ракетно-космической техники (РКТ) должны обладать прочностью, так как в процессе эксплуатации они постоянно находятся в нагруженном состоянии.

2. Для топливных баков и герметичных отсеков на протяжении всего срока эксплуатации изделия РКТ не должно происходить разгерметизации

3. Геометрические размеры корпусов изделий РКТ не должны изменяться на $\pm 0,01 \dots 0,05$ % от их номинальных значений [1].

Необходимость выполнения этих требований заставляет проводить контроль во время производства изделий РКТ, в частности, сварных швов на изделиях.

В ходе наложения сварных швов в них могут возникать следующие дефекты.

1. Трещины – дефект, вызванный местным разрывом шва.

2. Полости и поры – дефект произвольной формы, образованный газами, задержанными в расплавленном металле, который не имеет углов.

3. Твёрдые включения – твёрдые инородные вещества металлического или неметаллического происхождения в металле сварного шва.

4. Несплавления и непровары – отсутствие соединения между металлом сварного шва и основным металлом или между отдельными валиками сварного шва.

Для выявления данных дефектов применяют рентгеновскую и ультразвуковую дефектоскопии. По сравнению с рентгеновской дефектоскопией ультразвуковая дефектоскопия имеет более высокую скорость исследования при низкой стоимости и опасности для человека. В данной статье рассмотрим ультразвуковую дефектоскопию.

Принцип работы ультразвукового контроля (УЗК) основан на использовании высокочастотных звуковых волн для обнаружения внутренних дефектов в материалах. Ультразвуковые волны создаются генератором ультразвука и направляются на контролируемый объект с помощью датчика (преобразователя).

При прохождении через материал, ультразвуковые волны могут взаимодействовать с различными дефектами, такими как трещины, включения, поры и другие неоднородности. Эти дефекты изменяют скорость распространения ультразвуковых волн и/или вызывают отражение и рассеяние звуковых волн.

Отраженные волны затем возвращаются к датчику, который преобразует их в электрический сигнал. Этот сигнал затем анализируется и обрабатывается прибором для обработки данных, который может использовать различные алгоритмы обработки сигналов, чтобы определить размер, форму и глубину дефектов.

Для контроля сварных швов ультразвуковой дефектоскопией в настоящее время применяют следующие способы (методы) контроля [2]:

1. Эхо-импульсный метод.
2. Эхо-зеркальный метод.
3. Дельта-метод.
4. Дифракционный метод.
5. Зеркально-теневой метод.

Эхо-импульсный метод ультразвукового контроля – это метод контроля, который использует ультразвуковые волны для обнаружения дефектов в материалах и конструкциях.

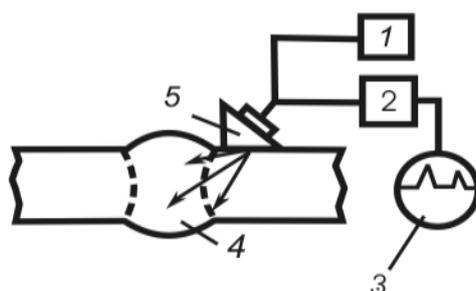


Рис. 1. Поиск дефектов эхо-импульсным методом:
 1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – индикатор;
 4 – объект контроля (сварной шов); 5 – ПЭП

Принцип работы метода заключается в следующем: ПЭП излучает в контролируемое изделие короткие зондирующие импульсы, которые отражаются от дефектов. Отраженные эхо-волны регистрируются ПЭП и обрабатываются для создания изображения внутренней структуры объекта. Временной интервал между зондирующим и эхо-волнами пропорционален глубине залегания дефекта, а амплитуда, в определенных пределах, отражающей способности (размеру) дефекта.

К достоинствам эхо-импульсного метода можно отнести:

1. Высокая чувствительность. Метод позволяет обнаруживать дефекты в сварном шве, такие как трещины, поры или включения;
2. Высокая точность. Метод позволяет определить не только наличие дефекта, но и его размер, форму, положение и глубину;
3. Не требуется предварительная подготовка поверхности для контроля.

К недостаткам эхо-импульсного метода можно отнести:

1. Чувствительность к поверхностным дефектам, так как ультразвуковые волны могут рассеиваться или отражаться при взаимодействии с неоднородностями на поверхности материала.
2. Высокая зависимость амплитуды эхо-сигнала от ориентации дефекта. Метод может не обнаружить дефекты, если они расположены под определенным углом к поверхности.
3. Невозможность контроля качества акустического контакта в процессе перемещения ПЭП, так как при отсутствии дефектов на выходе отсутствуют какие-либо сигналы.

Отличительной особенностью метода является то, что при контроле изделий регистрируются и анализируются практически все сигналы, приходящие из изделия после излучения зондирующих колебаний.

Эхо-зеркальный метод ультразвукового контроля (ЭЗМ) – метод, который наиболее достоверен при обнаружении плоскостных вертикально ориентированных дефектов.

Он реализуется при прозвучивании шва двумя ПЭП, которые перемещаются по поверхности околошовной зоны с одной стороны шва таким образом, чтобы фиксировать одним ПЭП сигнал, излученный другим ПЭП и дважды отразившийся от дефекта и противоположной поверхности изделия.

К достоинствам ЭЗМ можно отнести:

1. Высокая точность обнаружения дефектов. Этот метод позволяет обнаруживать дефект с точностью до нескольких миллиметров, а также и его размер, форму, положение и глубину;

2. Возможность обнаружения дефектов на значительной глубине.

К недостаткам ЭЗМ можно отнести:

1. Ограничения по типу металла. ЭЗМ не всегда эффективен при контроле металлов, которые имеют грубую поверхность или высокую степень пористости.

2. Высокая зависимость от ориентации дефекта. ЭЗМ может не обнаружить дефекты, если они расположены под определенным углом к поверхности.

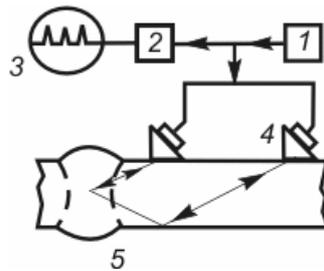


Рис. 2. Поиск дефектов ЭЗМ:
1 – генератор; 2 – усилитель;
3 – ЭЛТ; 4 – ПЭП; 5 – шов.

Метод нашел широкое применение при контроле толстостенных изделий, когда требуется высокая надежность обнаружения вертикально-ориентированных плоскостных дефектов из-за возможности оценки формы дефектов размером 3 мм и более, которые отклонены в вертикальной плоскости не более чем на 10° . При оценке формы дефектов необходимым условием является использование ПЭП одинаковой чувствительности.

Дельта-метод – метод, основанный на использовании дифракции волн на дефекте. Падающая на дефект поперечная волна частично отражается зеркально, частично трансформируется в продольную, а частично переизлучает дифрагированную волну. Трансформированная продольная волна распространяется нормально к нижней поверхности, отражается от нее и улавливается прямым ПЭП. Этим же ПЭП будет улавливаться компонента продольной дифрагированной волны, срывающейся с верхнего кончика трещины и распространяющейся вертикально вверх.

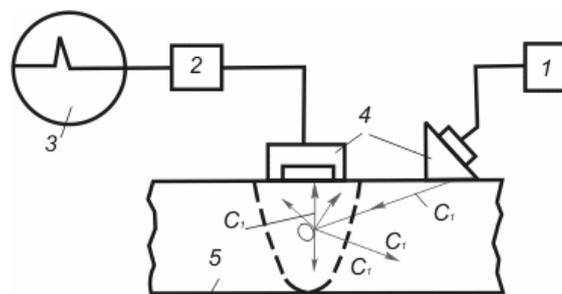


Рис. 3. Поиск дефектов дельта-методом:
1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – ЭЛТ; 4 – ПЭП; 5 – сварной шов.

К достоинствам Дельта-метода можно отнести:

1. Высокая чувствительность и точность. Дельта-метод даёт практически все характеристики вертикально-ориентированного дефекта с высокой точностью: его размер, форму, положение и глубину.

К недостаткам Дельта-метода можно отнести:

1. Требования к поверхности материала. Дельта-метод требует зачистку сварного шва и околошовной зоны;
2. Требование высокой точности позиционирования. Дельта-метод требует точного позиционирования детали и датчика, что может затруднить работу в труднодоступных местах или при контроле больших деталей;
3. Сложность расшифровки принятых сигналов при контроле соединений толщиной 15 мм и менее.

Дифракционно-временной метод – метод, основанный на взаимодействии краев неоднородностей в материале с ультразвуковыми волнами. Это взаимодействие вызывает излучение дифракционных волн в довольно широком диапазоне частот. Наличие неоднородности в материале позволяют определить возникающие в нем дифракционные волны.

Время прохождения и приема сигнала является основой оценки размеров и высоты дефекта. Параметры неоднородностей в материале определяются только временем прохождения дифракционных волн, амплитуда волны не принимается во внимание при определении размеров дефекта.

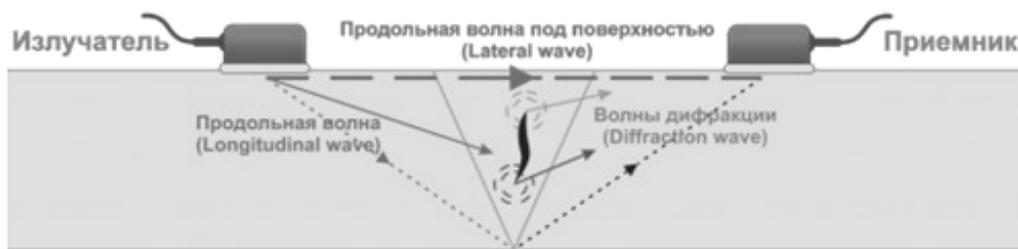


Рис. 4. Поиск дефекта дифракционно-временным методом

Достоинства дифракционно-временного метода:

1. Высокая точность. Этот метод позволяет обнаруживать дефект с точностью, как правило, ± 1 мм.
2. Возможность выявления дефектов практически любой ориентации. Метод чувствителен фактически к любому типу дефектов, независимо от их ориентации.

Недостатки дифракционно-временного метода:

1. Чувствительность к поверхностным и донным дефектам, так как ультразвуковые волны могут рассеиваться или отражаться при взаимодействии с неоднородностями на поверхности материала.
2. Электрические помехи. Для снижения этих помех приходится использовать преусилители.
3. Чувствительность к шуму от зёрен металла в материале изделия.
4. Наиболее подходящими для контроля являются плоские поверхности или поверхности с небольшой кривизной. Контроль сильно искривленных поверхностей может вызвать затруднения.

Зеркально-теневого метод – метод, при реализации которого признаком обнаружения дефекта служит ослабление амплитуды сигнала, отраженного от донной поверхности изделия.

Достоинства зеркально-теневого метода:

1. Высокая чувствительность. Метод позволяет обнаруживать дефекты в сварном шве, такие как трещины, поры или включения.
2. Возможность определения глубины залегания дефекта.

Недостатки зеркально-теневого метода:

1. Низкая помехоустойчивость.
2. Возможность отсутствия донного сигнала. При высокой кривизне исследуемого изделия сложно верно установить наличие дефекта.

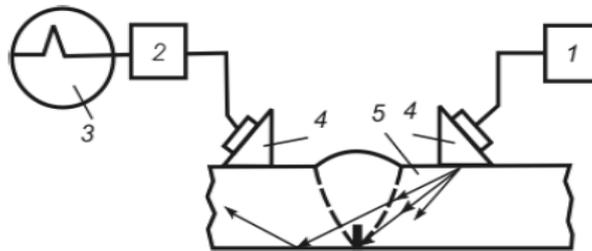


Рис. 5. Поиск дефектов зеркально-теневым методом:
1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – ЭЛТ; 4 – ПЭП; 5 – сварной шов

Метод фазированной решетки – метод основным принципом которого является возбуждение зондирующих импульсов с индивидуальным компьютерным управлением амплитудой сигнала и задержкой по времени для каждого элемента в многоэлементном пьезоэлектрическом преобразователе. Возбуждение сразу нескольких элементов фазированного преобразователя позволяет генерировать сфокусированный ультразвуковой луч с возможностью динамически изменять параметры УЗ-луча, такие как угол ввода, фокусное расстояние и размер фокусного пятна с помощью программного обеспечения.

Преобразователь фазированной решетки представляет собой множество пьезоэлектрических элементов, объединенных в одном датчике. За счет этого метод фазированных решеток является более усовершенствованным и мощным по сравнению с традиционным ультразвуковым контролем, в котором используется одноэлементный преобразователь.

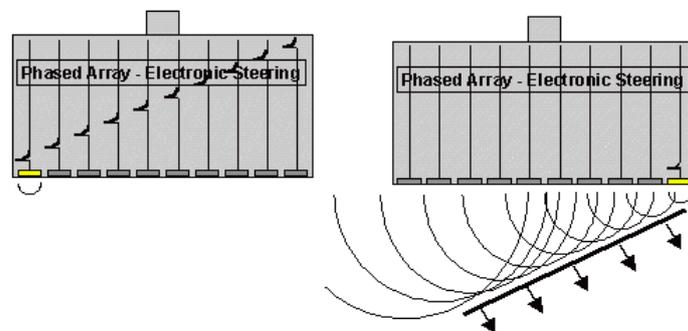


Рис. 6. Принцип генерации зондирующих импульсов
в многоэлементном пьезоэлектрическом преобразователе

Достоинства метода фазированной решетки:

1. Возможность сканирования под разными углами без передвижения ПЭП повышает вероятность обнаружения аномалий в сварных швах.
2. Способность фокусировки на разных глубинах увеличивает точность измерения критических дефектов для объемного контроля.
3. Секторное сканирование, используется для картографирования объектов под определенными углами. Это значительно упрощает контроль объектов со сложной геометрией.
4. Маленькая контактная поверхность преобразователя и возможность сканирования без передвижения ПЭП упрощает контроль труднодоступных объектов.

5. Возможность сканирования любой поверхности. ПЭП имеют самые разные формы, размеры, диапазон частот и количество элементов.

Недостатки метода фазированной решетки:

1. Высокая стоимость относительно других рассмотренных методов.

Каждый рассмотренный метод ультразвукового контроля имеет свои достоинства и недостатки. И в зависимости от исследуемого изделия предпочтительнее тот или иной метод. Для ракетно-космической отрасли наибольшим приоритетом является надежность изделия. Что бы обеспечить высокую надежность необходимо проводить дефектоскопию сварных швов РКТ методом, который дает наиболее точную картину внутреннего строения сварного шва и учитывает особенности строения РКТ. Зеркально-теневой метод исключается из-за низкой, по сравнению с другими рассмотренными методами, чувствительностью и точностью. Эхо-зеркальный метод имеет высокую чувствительность и точностью, но только в отношении определенного типа дефектов (плоскостных вертикально ориентированных дефектов). Из-за этого же исключается Дельта-метод. Из оставшихся методов дифракционно-временной метод исключается из-за того, что он не учитывает особенность строения РКТ, которые зачастую имеют поверхности с высоким уровнем кривизны.

Из всех рассмотренных методов эхо-импульсный метод и метод фазированных решеток обладают необходимыми качествами для использования на производстве РКТ. Но все же предпочтение стоит отдавать методу фазированных решеток из-за превосходящих качеств.

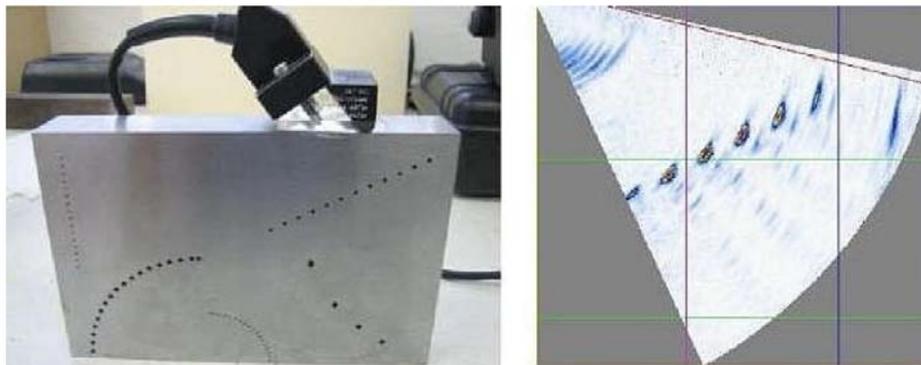


Рис. 6. Выполнение дефектоскопии методом фазированных решеток на поперечном изделии

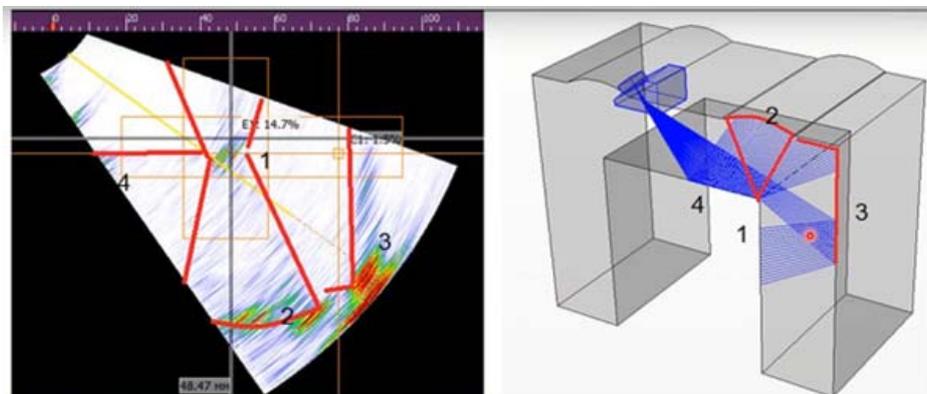


Рис. 7. Анализ изделия:

1 – корень шва; 2 – валик усиления; 3 – стенка изделия; 4 – донный сигнал

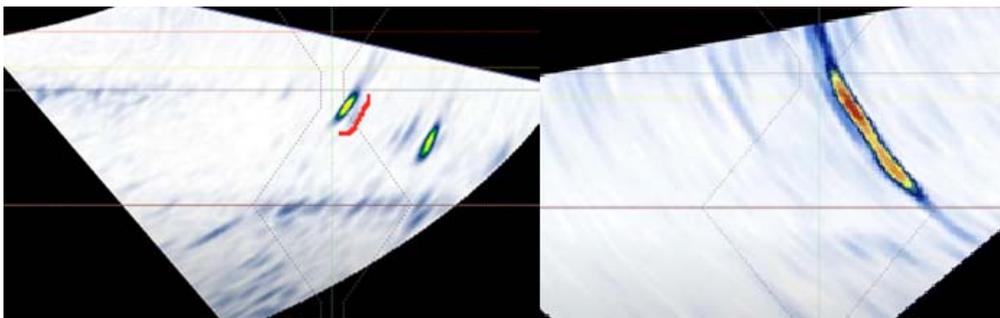


Рис. 8. Примеры дефектов, обнаруженных в ходе дефектоскопии методом фазированных решеток

Вывод: из всех рассмотренных методов дефектоскопии для выявления дефектов сварных швов РКТ наиболее предпочтительным является метод фазированных решеток.

Библиографические ссылки

1. Андриюшкин А.Ю., Галинская О.О., Сигаев А.Б. Производство сварных конструкций в ракетно-космической технике : учеб. пособие. Санкт-Петербург, 2015. 109 с.
2. ГОСТ Р 55724–2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. Москва : Стандартинформ, 2014.
3. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов. Киев : Техника, 1972. 460 с.
4. Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. М. : Металлургия, 1985. 129 с.

© Румынин А. А., Евтифьев М. Д., 2023

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕДУКТОРА

О. В. Крашенинникова
Научный руководитель – В. Г. Сидоров

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

В данной работе рассматриваются планетарные редукторы из разных материалов: смолы и пластика, распечатанные на 3D-принтере по разным технологиям, описаны достоинства и недостатки используемых материалов.

Ключевые слова: планетарные редукторы, редуктор из смолы, редуктор из пластика, сравнение редукторов, ARM-манипулятор.

Современная промышленность предъявляет повышенные требования к техническим возможностям ARM (Advanced Risc Machine) манипуляторов [1]. Основными требованиями являются высокая точность и долговечность.

В ARM манипуляторах используются несколько редукторов, работа которых влияет на долговечность и надежность. Точность выполнения деталей редукторов имеет большое значение для повышения эксплуатационных качеств ARM-манипуляторов. Зубчатые шестерни, изготовленные с незначительной точностью, не могут работать при высоких скоростях, так как при этом в передаче возникают дополнительные ударные нагрузки. Увеличение скорости и удельных нагрузок, которые может выдерживать ARM-манипулятор, может быть достигнуто повышением точности обработки деталей редукторов.

На всех этапах изготовления редукторов на 3D-принтере неизбежны те или иные погрешности, например, несоблюдение нужных допусков при неправильной настройке 3D-принтера или сбой в работе 3D-принтера из-за внешних факторов, в результате чего достижение абсолютной точности деталей при печати практически невозможно. Точность выполнения составляющих редуктора зависит от способа изготовления и от качества материалов, из которых изготавливаются детали, поэтому необходимо сравнить два одинаковых редуктора из разных материалов, чтобы определить из какого материала практичнее изготавливать основные части редукторов для ARM-манипулятора.

Существует довольно большое число технологий [2], применяемых в 3D-печати. Технологии печати отличаются по скорости, точности, используемым материалам и другими параметрами. Выбор технологии 3D-печати зависит от задач, которые были поставлены перед 3D-принтером, от требований предъявляемым к получаемым изделиям, от используемого материала. В настоящее время можно выделить порядка 10 основных технологий 3D-печати, однако мы остановимся на двух из них. FDM (Fused Deposition Modeling) / FFF (Fused Filament Fabrication) и SLA (стереолитография или фотополимерная печать), которые при своей работе используют пластиковые нити и фотополимерные смолы. Каждая из технологий имеет свои особенности печати и подходит для решения определенных задач.

Печать на 3D-принтере для PLA-пластика, относящаяся к FDM-печати, наиболее распространена, так как у PLA-пластика низкая себестоимость. К главным достоинств-

вам FDM-печати относится простота процесса создания деталей. Печать подразумевает подачу пластиковой нити к специальному нагревательному элементу, в результате пластик плавится и наносится в заданной печатной области. Достоинствами изделий из PLA-пластика является то, что конечный продукт печати экологичен, также PLA-пластик относится к материалам, которые могут неоднократно подвергаться плавлению и отверждению без потери свойств. Еще одно достоинство FDM-печати состоит в том, что не возникает трудностей в покраске, склеивании, шлифовке и полировке конечных деталей, но необходимо следить за тем, чтобы механические воздействия не нагревали пластик, так как данный материал не обладает термостойкостью. PLA-пластик начинает плавиться при температуре от 150 градусов по Цельсию [3] и может деформироваться в процессе корректирования деталей. Недостатком трехмерной печати также является, то что достаточно сложно придать деталям гладкость и ровность. Также к недостаткам можно отнести сложность в повторности одних и тех же деталей. Все недостатки объясняются тем, что пластик имеет свойство оседания при остывании. Скорость обдува и направления потока сильно сказываются на результате печати.

Фотополимерная печать, относящиеся к SLA-печати, имеет собственные достоинства и недостатки, а также сам процесс осуществляется иначе. Слой за слоем на фотополимерный материал в жидком состоянии, находящийся в специальной ванне, воздействует ультрафиолетовый луч, и платформа поднимается вверх. Под действием излучения материал полимеризуется и твердеет. Такая технология позволяет получать более точные детали за счет того, что толщина слоя может достигать 0,01 мм, в то время как на 3D-принтере для пластика толщина слоя не может быть менее 0,2 мм. Более тонкий слой при SLA-печати дает работы с более сложной геометрией, в результате у законченного изделия прекрасная детализация и качество поверхностей. К важным достоинствам SLA-печати можно отнести высокую скорость построения, так как засвечивание фотополимерного материала лазером происходит по всему контуру слоя, поэтому за раз можно печатать сразу несколько деталей, при этом времени уйдет примерно столько же, сколько и на одну. Но после полимеризации восстановить напечатанное изделие до прежнего смолообразного состояния невозможно и неудачно затвердевшие детали переработке не подлежат. Также к недостатками печати деталей по технологии SLA относят то, что принтеры для фотополимеров имеют меньшие объемы печати, при этом печать из смолы обходится дороже, чем печать из пластика. Еще одним недостатком является то, что смола в жидком состоянии токсична, поэтому требует осторожного обращения.

3D-принтеры для печати деталей из фотополимеров представлены на рис. 1.



Рис. 1. 3D-принтеры для фотополимеров и пластика

В данной работе было проведено исследование работы планетарных редукторов напечатанных по разным технологиям: первый напечатан на основе технологии SLA из смолы, которая является фотополимером, второй редуктор изготовлен по технологии FDM- из PLA-пластика, биоразлагаемого, термопластичного полиэфира, основой которого является молочная кислота [4].

Редукторы состоят из следующих деталей: внешний корпус, который включает в себя две кольцевые шестерни, одна из которых крепится к выходной ступице; держатель для планетарных шестерен; три планетарные шестерни; одна солнечная шестерня, которая скользит по валу двигателя; лицевая панель. Также для работы редукторов используются металлические подшипники разных диаметров, которые необходимы для скольжения соответствующих частей.

Собранные модели редукторов представлены на рис. 2.

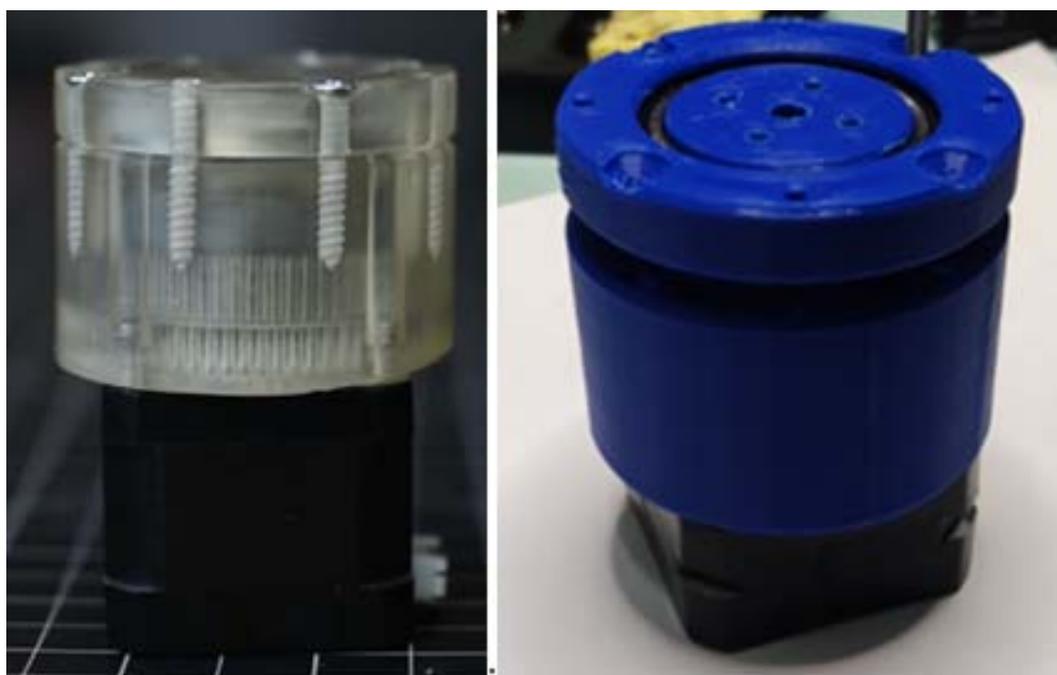


Рис. 2. Планетарные редукторы, изготовленные из смолы и PLA-пластика

Для проверки работоспособности редукторов, проведем испытания, после осуществления которых можно будет определить более надежный материал, из которого будут печататься детали для редукторов, используемых в АРМ манипуляторах. Суть испытания состоит в том, что на вал каждого редуктора добавляется рычаг длиной 10 см, затем проводится ряд измерений с помощью заранее написанной программы, которая позволяет многократно поворачивать вал двигателя на определенное количество шагов, при повороте вала рычаг нажимает на тензодатчик, который используется в качестве счетчика нажатий для фиксирования полученных результатов. Целью эксперимента является определение редуктора, который совершит большее количество нажатий.

После испытаний, в процессе которых редукторы, напечатанные на 3D-принтерах по разным технологиям, подвергались многократным нагрузкам при помощи двигателя пета 17HS402 [5], редукторы были разобраны, при осмотре деталей редукторов было выявлено, что планетарные шестерни, изготовленные из смолы, стали разрушаться после 500 циклов многократного поворота вала двигателя, в результате чего редуктор полностью пришел в негодность и перестал выполнять свои функции, остановившись в одном положении. В то время как планетарные шестерни, изготовленные из PLA пластика, имели незначительные деформации, которые привели к люфту только после 702 циклов.

Можно сделать вывод, детали для редуктора из смолы получаются более точными, чем детали из пластика, но при этом смола слишком хрупкая для того, чтобы использовать ее в качестве основного материала для деталей, которые подвергаются циклическим нагрузкам, поэтому смола не подходит для редукторов, которые будут использоваться в ARM-манипуляторах. Для ARM-манипуляторов более подходящим вариантом будут редукторы, детали которых напечатаны из PLA-пластика, они имеют меньший износ, при этом материалы для FDM-печати обходятся дешевле, чем сырье для печати по технологии SLA. Детали редуктора из PLA-пластика более надёжны, но для того, чтобы собрать качественный редуктор, который будет работоспособен, необходимо учитывать все допуски при изготовлении планетарных шестерён, так как пластик имеет свойство деформироваться при остывании.

Библиографические ссылки

1. Промышленные роботы-манипуляторы | ARM-ROBOT [Электронный ресурс]. URL: <https://arm-robot.ru/promyshlennye-roboty-manipulyatory> (дата обращения: 27.01.2023).
2. Технологии 3D-печати и их применение [Электронный ресурс]. URL: <https://top3dshop.ru/blog/tehnologii-3d-pechati-i-ih-primenenie.html> (дата обращения: 27.01.2023).
3. Выбор температуры для печати на 3D-принтере [Электронный ресурс]. URL: <https://cvetmir3d.ru/blog/poleznoe/vybor-temperatury-dlya-pechati-na-3d-printere/> (дата обращения: 29.01.2023).
4. PLA-пластик для 3D-принтера. Особенности, применение, настройки печати. [Электронный ресурс]. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/3d-printery/pla-plastik-3d-osobennosti-nastrojki-pechati/> (дата обращения: 01.02.2023).
5. Спецификация двигателя SM-17HS4023 в формате PDF – Двигатель [Электронный ресурс]. URL: <https://datasheetspdf.com/pdf/1328258/ETC/SM-17HS4023/1> (дата обращения: 29.01.2023).

© Крашенинникова О. В., 2023

ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

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

Требования к безопасности технических систем и техносферной безопасности в целом рассматриваются как требования к их надежности. Переход 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. Приведены сведения о комплекте учебной литературы по курсу «Прикладная теория надежности» для студентов магистратуры по направлению подготовки «Техносферная безопасность».

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

Проблема обеспечения техногенной безопасности занимает особое место среди глобальных проблем современного общества [1]. За последнее столетие более половины крупных аварий произошли в течение двух последних десятилетий [2]. Одновременно увеличился и их разрушительный эффект – на последнее десятилетие 20-го века приходится почти половина погибших и 40 % пострадавших [3].

Крупнейшие аварии и катастрофы унесли десятки тысяч человеческих жизней, причинили большой и часто невосполнимый ущерб окружающей среде. По данным ООН за последние 20 лет в результате катастроф и стихийных бедствий погибло более 50 миллионов человек [4]. Интегральные прямые потери вследствие техногенных аварий и катастроф достигают 1,5–3 % от совокупного валового продукта развитых стран, а косвенные потери, как правило, в 3–4 раза больше [5].

К концу 20-го – началу 21-го века сменилась научная парадигма и изменилось научное мировоззрение – мир предстал хаотическим, катастрофическим и непредсказуемым, классические представления об однозначно детерминированном и предсказуемом мире были полностью разрушены, однозначная детерминированность оказалась частным случаем, а предсказуемость – принципиально ограниченной [6].

Лавинообразный рост количества техногенных аварий и катастроф привел к осознанию невозможности обеспечения абсолютной безопасности и коренному пересмотру принципов обеспечения техносферной безопасности – от «обеспечения абсолютной безопасности» или «нулевого риска» (детерминистской концепции) к «обеспечению приемлемого риска» (вероятностной концепции) – допустимого уровня риска, оправданного с точки зрения экономических, социальных и экологических факторов, с которым общество готово мириться ради получения определенных положительных результатов своей деятельности [7].

Обе указанные концепции в настоящее время применяются в большинстве промышленно развитых стран, хотя в последние годы наметилось противопоставление этих подходов в пользу второго (вероятностного) подхода [7–11]. Концепция обеспечения приемлемого риска в настоящее время заложена в основу многих нормативно-

правовых, нормативно-технических, руководящих и методических документов и указаний [7].

Суть вероятностной концепции состоит в том, что в рассматриваемый момент времени риск не может быть полностью исключен, но он может быть снижен до приемлемого уровня, с которым государство и общество на данном этапе развития готовы смириться [12].

Для оценки и оптимизации техногенного или технического риска широко используются методы теории надежности [7; 13–19]. Можно считать, что переход к концепции «приемлемого риска» определил возникновение нового направления теории надежности и начало нового этапа в ее развитии – прикладной теории надежности, связанной с анализом и обеспечением не только надежности, но и безопасности технических систем и, соответственно, приемлемого технического или техногенного риска [7].

В последние годы в России было многое сделано в области обеспечения безопасности и управления рисками в государственном управлении и регулировании, нормативно-техническом регулировании, методическом и научно-техническом обеспечении [7]. 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 [7; 20–27]. Разработаны математические методы и модели анализа безопасности, количественной оценки и прогнозирования техногенного риска и его составляющих [7; 13; 28–40].

Однако переход к концепции «приемлемого риска» требует развития новых научных направлений и решения новых задач в обеспечения техносферной безопасности на основе фундаментальных, поисковых и прикладных исследований в междисциплинарной постановке с использованием количественных критериев риска возникновения и развития все новых опасностей, угроз, вызовов, кризисов и катастроф [28].

В связи с переходом к концепции «приемлемого риска» и необходимостью реализации государственной политики в области снижения опасности бедствий и катастроф, а также создания механизмов предупреждения чрезвычайных ситуаций и катастроф с применением критериев риска основными задачами науки в сфере безопасности являются [36]:

- формирование фундаментальной базы анализа рисков в трех основных сферах жизнедеятельности – социальной, природной и техногенной (в системе «человек – природа – инфраструктура»);

- построение обобщенной модели системы «человек – природа – инфраструктура» с определением вклада ее основных компонентов в величину базовых параметров риска – вероятностей возникновения неблагоприятных явлений и сопутствующих им ущербов;

- построение сценариев неблагоприятных событий в системе «человек – природа – инфраструктура» и количественная оценка рисков через параметры главных инициирующих и поражающих факторов – потоков энергии, вещества и информации;

- категорирование (кластеризация) чрезвычайных ситуаций и высокорисковых объектов и процессов по величине риска, а также выработка рекомендаций по нормированию и регулированию рисков на всех уровнях управления («риск-ориентированный подход» в контрольно-надзорной деятельности).

В настоящее время анализ и обеспечение безопасности сложной техники, а также оценка техногенного риска являются доминирующими факторами развития прикладной

теории надежности. Методы теории надежности стали поддерживающими технологиями и должны рассматриваться в тесной взаимосвязи с методами теории безопасности. Именно такой системный анализ вопросов надежности (безотказности) и безопасности является отличительной особенностью современного состояния прикладной теории надежности [7].

Задачи, которые возникли с усложнением технических систем, должны решаться грамотными специалистами. Для этого они должны овладеть теоретическими знаниями и практическими навыками, необходимыми для решения следующих задач [7,41]:

- идентификация негативных воздействий техносферы естественного, антропогенного и техногенного происхождения;
- прогнозирование развития негативных воздействий и оценка их последствий;
- создание нормативно-допустимого (приемлемого) состояния техносферы;
- проектирование и эксплуатация техники, технологических процессов и объектов в соответствии с требованиями по безопасности человека и окружающей среды;
- разработка и реализация мер защиты человека и техносферы от негативных воздействий;
- обеспечение устойчивости функционирования объектов экономики и технических систем в штатных и чрезвычайных ситуациях;
- принятие решений по защите производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий.

Кроме того, тенденции развития техники и технологий в настоящее время характеризуются созданием сложных больших технических систем (БТС) с числом элементов более $10^5 - 10^6$. Создание таких систем изменяет технологический уклад промышленного производства, ориентируя его на наукоемкие продукты. Одновременно с этим происходит качественное изменение техногенных угроз – за короткое время они стали масштабными и комплексными, охватывающими все сферы жизни.

В связи с этим традиционные методы обеспечения безопасности таких систем за счет избыточной прочности, функциональной избыточности, резервирования и дублирования не обеспечивают приемлемый уровень их безопасности и не предотвращают катастроф. Для локализации современных техногенных угроз требуются глубокие фундаментальные исследования надежности и безопасности БТС.

В связи с этим возникает ряд актуальных научных задач обеспечения безопасности по оценке технических и техногенных рисков, обеспечению прочности, надежности, долговечности, живучести и защищенности технических систем, разработке технологий мониторинга опасностей и прогнозирования катастроф на больших технических системах.

Для обеспечения возможности решения этих и других проблем при разработке и эксплуатации различных технических объектов в программы подготовки студентов многих технических специальностей и направлений высших учебных заведений включаются дисциплины или разделы (модули) дисциплин, так или иначе связанные с обеспечением надежности и безопасности технических систем – «Основы теории надежности», «Надежность технических систем и техногенный риск», «Безопасность жизнедеятельности» и некоторые другие, а также специальные дисциплины по надежности и безопасности отдельных видов техники [5; 13; 16; 42–46].

Кроме того, для подготовки специалистов, способных решать эти задачи, в 2009 году были разработаны первые федеральные государственные образовательные стандарты высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) по направлению подготовки «Техносферная безопасность» с квалификацией (степенью) «бакалавр» и «магистр» [47]. В настоящее время действуют ФГОС ВПО в редакции 2020 года [48; 49].

Дисциплина «Прикладная теория надежности» входит в обязательную часть образовательной программы магистратуры по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность».

Основная цель курса – адаптация основных положений и методов теории надежности к решению инженерных задач, возникающих на разных этапах жизненного цикла любого технического объекта. Указанная цель достигается изложением основ теории надежности в максимально обобщенном виде. Такой подход позволяет, например, заменить основные понятия и классификационные категории объектов различных отраслей техники обобщенными категориями – «технический объект», «техническая система», «изделие» и «элемент», что делает изложение доступным и понятным специалистам разного профиля и уровня подготовки. В то же время в учебном курсе в общем виде описаны основные процессы (механические, физические, физико-химические, химические, тепловые и электрические), происходящие в элементах различных по назначению технических систем и вызывающие их отказы (в том числе потенциально опасные) или влияющие на надежность, эффективность и безопасность их функционирования.

Однако в последнее время наметился определённый разрыв между высокоразвитым математическим аппаратом теории надёжности и его практической реализацией при решении инженерных задач в области надежности и безопасности технических объектов. Ощущается недостаток литературы, в которой бы рассматривались основные понятия теории надёжности, её математические модели и физические основы, адаптированные к решению прикладных задач экспериментально-исследовательского и проектно-технологического характера. Учебник «Прикладная теория надежности» издавался в 1977 году, позднее издавались только учебные пособия по отраслям и отдельным категориям технических объектов [50–54 и др.].

Особый дефицит учебно-методической литературы ощущается в области исследований параметрической надёжности и безопасности технических систем – относительно нового и актуального направления в области техносферной безопасности. Многие результаты научных исследований последнего времени в этой области, как и многие национальные и межгосударственные стандарты системы стандартов «Надежность в технике», принятые в последние годы, пока не нашли отражения в учебной литературе [55–63].

В связи с этим разработан комплект учебной литературы «Прикладная теория надежности, включая учебник в 3-х частях и два учебных пособия – для практических занятий и курсового проектирования, а также методические указания для студентов магистратуры по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность» [64–69].

В учебнике изложены основные понятия и определения, математические и физические основы теории надежности, описываются процессы, приводящие к отказам различных технических систем, методы моделирования, расчета и прогнозирования характеристик надежности технических систем и их элементов при проектировании, изготовлении и эксплуатации, способы повышения надежности, методы экспериментальных исследований и контрольных испытаний (см. рисунок) [64–66].

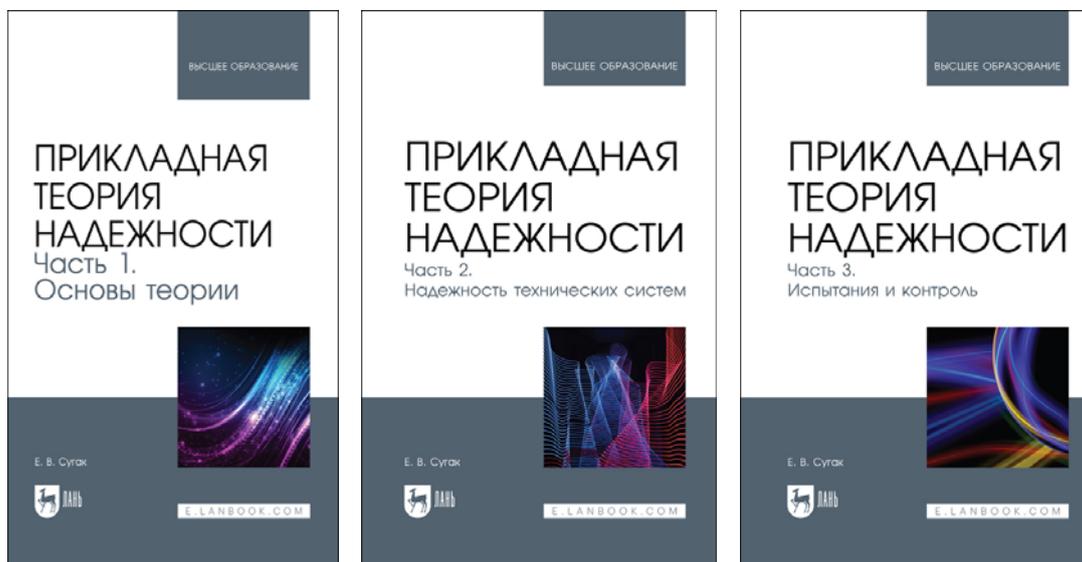
Особое внимание уделено потенциально опасным объектам, отказы которых могут представлять угрозу жизни и здоровью человека, состоянию окружающей среды, большому экономическому ущербу.

Приведен обширный глоссарий (более 800 понятий и определений). В приложениях содержатся справочные материалы для исследования и расчетов надежности.

В первой части учебника изложены основные понятия и определения, математические и физические основы теории надежности («физика отказов»), описываются процессы, приводящие к отказам различных технических объектов, основные модели надежности [64].

Во второй части учебника описываются основные методы расчета структурной надежности технических систем, методы моделирования, расчета и прогнозирования надежности технических объектов при проектировании, эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте [65].

В третьей части учебника рассматриваются основные методы определительных (исследовательских) и контрольных испытаний на надежность. Приведен также глоссарий. В приложениях содержатся справочные материалы для исследования и расчетов надежности [66].



Учебник «Прикладная теория надежности» в 3-х частях

В учебном пособии «Прикладная теория надежности. Практикум» приведены методы решения некоторых практических задач теории надежности – оценки остаточного ресурса безопасной эксплуатации, вероятностно-статистического моделирования надежности элементов и систем, оптимизации структурного резервирования, оценки показателей надежности по результатам определительных испытаний, планирования и проведения контрольных испытаний на надежность [67].

Теоретические материалы дополнены практическими рекомендациями, по каждой теме приводятся алгоритмы аналитических, численных и графо-аналитических методов расчета, справочные материалы, примеры расчетов, а также варианты контрольных заданий к практическим занятиям, расчетно-графическим и лабораторным работам для самостоятельной работы студентов.

Учебное пособие «Прикладная теория надежности» предназначено для самостоятельной работы и курсового проектирования [68]. В пособии приведены методы решения некоторых практических задач анализа, моделирования, расчета и повышения надежности технических и технологических систем при проектировании и эксплуатации.

Теоретические материалы дополнены практическими рекомендациями, по каждой теме приводятся алгоритмы аналитических, численных и графо-аналитических методов расчета, справочные материалы, примеры расчетов.

Учебник и учебные пособия предназначены, прежде всего, для студентов магистратуры по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность», однако могут быть полезны студентам других технических специальностей и направлений подготовки бакалавриата, специалитета и магистратуры при изучении курсов «Надежность технических систем и техногенный риск», «Техносферная безопасность», «Безопасность жизнедеятельности», «Ноксология» и «Рискология» и других, спецкурсов по проектированию и эксплуатации отдельных видов техники, а также инженерно-техническим работникам для повышения квалификации, расчетов и прогнозирования надежности и безопасности различных технических систем при проектировании, испытаниях и эксплуатации.

В методических указаниях для студентов магистратуры по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность» содержатся цели, задачи, виды, направления выпускной квалификационной работы [69]. Приведены объем и структура пояснительной записки и графической части, содержание отдельных разделов, основные правила оформления и представления в соответствии с требованиями стандартов. Представлена тематика примерных вопросов, решаемых в выпускной квалификационной работе в рамках видов профессиональной деятельности, реализуемых выпускающей кафедрой: научно-исследовательской, организационно-управленческой, проектно-конструкторской. Приложения содержат справочную информацию, необходимую для оформления выпускной квалификационной работы, и образцы документов для соблюдения процедуры защиты. В библиографическом списке указаны источники литературы, рекомендуемые студентам для разработки выпускной квалификационной работы.

Библиографические ссылки

1. Аламанова Э.А., Андрианова Л.П., Баранова А.Ю. и др. Инновационное развитие науки: фундаментальные и прикладные проблемы : монография. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2022. 488 с.
2. Белов П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование. В 3 ч. Ч. 1. М.: Юрайт, 2022. 211 с.
3. Потапов Б.В., Радаев Н.Н. Экономика природного и техногенного рисков. М.: Деловой экспресс, 2001. 516 с.
4. Контузоров Ф.Ф., Петров Д.В. Классификация и краткая характеристика чрезвычайных ситуаций. Основы защиты населения и территорий от ЧС техногенного, природного и экологического характера. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. 83 с.
5. Сугак Е.В., Кучкин А.Г., Окладникова Е.Н. Надежность технических систем и техногенный риск. Часть 1. Техногенная безопасность. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2011. 260 с.
6. Акимов В.А., Диденко С.Л., Смирнов А.С. Научные основы общей теории безопасности жизнедеятельности. М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2019. 252 с.
7. Сугак Е.В. Современные проблемы техносферной безопасности в России // Инновационное развитие науки: фундаментальные и прикладные проблемы. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2022. С. 5–85.
8. Волик Б.Г. О концепциях техногенной безопасности. Автоматика и телемеханика, 1998, № 2. С. 165–170.
9. Махутов Н.А., Петров В.П. и др. Современное состояние проблем безопасности в промышленно развитых странах // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 1994, № 4. С. 2–36.
10. Кузьмин И.И., Шапошников Д.А. Концепция безопасности: от риска «нулевого» – к «приемлемому» // Вестник РАН, 1994, т. 64, № 5. С. 402–408.
11. Андриенко А.Я., Портнов-Соколов Ю.П. Формирование риска при обеспечении безопасности сложных технических систем // Приборы и системы управления, 1996, № 12. С. 11–14.
12. Безопасность России. Анализ риска и проблемы безопасности. Часть 2. Безопасность гражданского и оборонного комплексов и управление рисками. М.: Знание, 2006. 434 с.
13. Сугак Е.В. Системный анализ и моделирование техногенных рисков // Вычислительные технологии, 2004, т. 9, № 4. С. 68–76.
14. Окладникова Е.Н., Сугак Е.В., Игнатъев Д.А. Оптимальное управление безопасностью промышленных объектов // Вестник СибГАУ, Красноярск, 2007, вып.4. С. 43–47.
15. 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.

16. Сугак Е.В., Кучкин А.Г., Бельская Е.Н. Надежность технических систем и техногенный риск. Часть 2. Надежность технических систем. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2013. 436 с.
17. Финк В.Н., Бельская Е.Н., Сугак Е.В. Системы технического обслуживания и ремонтов оборудования нефтегазового комплекса // Решетневские чтения : материалы XVIII Межд. научной конференции. В 3-х ч. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2014, ч. 2. С. 361–363.
18. Сугак Е.В., Бразговка О.В. Повышение надежности и оптимизация системы технического обслуживания потенциально опасных технических объектов // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 2020. С. 31–36.
19. Сугак Е.В. Влияние условий эксплуатации на надежность и безопасность технических объектов // Решетневские чтения : материалы XXV Межд. научно-практ. конференции. В 2-х ч. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2021, ч. 2. С. 77–79.
20. О безопасности. Федеральный закон № 390-ФЗ от 28.12.2010.
21. Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Утв. Указом Президента Российской Федерации № 899 от 07.07.2011.
22. Перечень критических технологий Российской Федерации. Утв. Указом Президента Российской Федерации № 899 от 07.07.2011.
23. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года. Указ Президента Российской Федерации № 474 от 21.07.2020.
24. О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации № 166 от 30.03.2022.
25. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. М.: Минэкономразвития России, 2007. 354 с.
26. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года. М.: Минэкономразвития России, 2018. 47 с.
27. Жмеренецкий В.Ф., Летуновский В.В., Полулях К.Д. Теория безопасности социальных систем. М.: Московский психолого-социальный институт, 2010. 182 с.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. Бельская Е.Н., Бразговка О.В., Сугак Е.В. Методика расчета экологических рисков // Современные проблемы науки и образования, 2014, № 6. С. 1–8.
32. Сугак Е.В. Современные методы оценки экологических рисков // European Social Science Journal (Европейский журнал социальных наук), 2014, № 5 (44), т. 2. С. 427–433.
33. Острейковский В.А., Погореловский М.А. Этапы развития теории техногенного риска при анализе безопасности сложных динамических систем // Вестник кибернетики, 2015, № 4. С. 87–92.
34. Бельская Е.Н., Бразговка О.В., Сугак Е.В. Методика расчета экологических рисков // Научное обозрение. Технические науки. 2015, № 1. С. 75–76.
35. Махутов Н.А., Кузык Б.Н., Абросимов Н.В. и др. Научные основы прогнозирования и прогнозные показатели социально-экономического и научно-технологического

развития России до 2030 года с использованием критериев стратегических рисков. М.: Институт экономических стратегий, 2011. 136 с.

36. Шевченко Е.Н. Математическое моделирование техногенного риска сложных систем : дис. ... физ.-мат. наук. Сургут: Сургутский государственный университет, 2012. 117 с.

37. Хамидуллина Е.А. Тимофеева С.С. Моделирование опасных процессов в техносфере: практические работы и методические указания к их выполнению. Иркутск: ИРНТУ, 2015. 137 с.

38. Северцев Н.А., Бецков А.В. Системный анализ теории безопасности. М.: Юрайт, 2022. 456 с.

39. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Развитие фундаментальных и прикладных исследований в области машиноведения с использованием критериев прочности, ресурса, живучести и безопасности. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2018, т. 84, № 10. С. 41–52.

40. Стручева Н.Е. История и методология безопасности жизнедеятельности. М.: Юрайт, 2022. 198 с.

41. Муравьева Е.В., Романовский В.Л. Прикладная техносферная рискология. Экологические аспекты. Казань: Школа, 2007. 355 с.

42. Сугак Е.В., Василенко Н.В., Назаров Г.Г. и др. Надежность технических систем. Красноярск: Раско, 2001. 608 с.

43. Невзоров В.Н., Сугак Е.В. Надежность машин и оборудования. Ч. 1. Основы теории. Красноярск: Сибирский гос. технологический ун-т, 1998. 240 с.

44. Невзоров В.Н., Сугак Е.В. Надежность машин и оборудования. Ч.2. Проектирование, эксплуатация, экспериментальные исследования. Красноярск: Сибирский гос. технологический ун-т, 1998. 264 с.

45. Тимошенков С.П., Симонов Б.М., Горошко В.Н. Надежность технических систем и техногенный риск. М.: Юрайт, 2021. 502 с.

46. Шишмарёв В.Ю. Надежность технических систем. М.: Юрайт, 2021. 289 с.

47. Дмитренко В.П., Мессинева Е.М., Фетисов А.Г. Техносферная безопасность. Введение в направление образования. М.: Инфра-М, 2016. 134 с.

48. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность. Утв. приказом Министерства науки и высшего образования РФ № 680 от 25.05.2020.

49. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – магистратура по направлению подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность. Утв. приказом Министерства науки и высшего образования РФ № 678 от 25.05.2020.

50. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности : учебник. М.: Высшая школа. 1977. 160 с.

51. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. М.: Издательство стандартов, 1977. 264 с.

52. Чирков В.П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций. Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2006. 620 с.

53. Фёдоров В.П. Прикладная теория надёжности технических объектов. Учебное пособие. Брянск: Изд-во БГТУ, 2006. 330 с.

54. Щипицын А.Г., Кошечев А.А., Алешин Е.А., Павловская О.О. Элементы прикладной теории надежности. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. 114 с.

55. ГОСТ Р 27.018–2021. Надежность в технике. Методы оценки и обеспечения надежности коммуникационной сети.

56. ГОСТ Р 27.101–2021. Надежность в технике. Надежность выполнения задания и управление непрерывностью деятельности. Термины и определения.

57. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.
58. ГОСТ Р 27.303–2021. Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов.
59. ГОСТ Р ИСО 22313–2021. Надежность в технике. Системы менеджмента непрерывной деятельности. Требования.
60. ГОСТ Р МЭК 31010–2021. Надежность в технике. Методы оценки риска.
61. ГОСТ Р МЭК 61078–2021. Надежность в технике. Структурная схема надежности.
62. ГОСТ Р МЭК 62628–2021. Надежность в технике. Руководство по обеспечению надежности программного обеспечения.
63. ГОСТ Р МЭК 62960–2022. Надежность в технике. Анализ надежности на стадиях жизненного цикла.
64. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности : учебник для вузов. Часть 1: Основы теории. СПб.: Лань, 2022. 276 с.
65. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности : учебник для вузов. Часть 2: Надежность технических систем. СПб.: Лань, 2022. 240 с.
66. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности : учебник для вузов. Часть 3: Испытания и контроль. СПб.: Лань, 2022. 288 с.
67. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности : практикум : учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2022. 312 с.
68. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности : учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2023. 320 с.
69. Техносферная безопасность. Выпускная квалификационная работа магистранта : метод. указания для студентов магистратуры по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность» всех форм обучения / сост.: Т.А. Саулова, Е.В. Сугак, О.В. Тасейко, Н.Г. Черкасова; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск: 2020. 60 с.

© Сугак Е. В., 2023

Секция
«КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
МАШИНОСТРОЕНИЯ»

УДК 621.9.041

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕТЕХНОЛОГИЧНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ТИПА ОТВЕРСТИЕ МАЛОГО ДИАМЕТРА**

А. В. Устюгов-Грицай, А. Е. Петецкая
Научный руководитель – В. А. Левко

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

Для повышения точности процесса изготовления нетехнологичных поверхностей типа отверстие малого диаметра проведен анализ технологических процессов из формообразования. Отмечены недостатки этих технологий, не позволяющих обеспечить заданную точность размеров и качество поверхностного слоя. Для устранения этих недостатков предложено использовать новые методы финишной обработки. Обоснованы критерии для выбора метода финишной обработки отверстий малого диаметра.

Ключевые слова: отверстие малого диаметра, нетехнологичная поверхность, электроэрозионная обработка, сверление, финишная обработка

Введение. Отличительной особенностью современного машиностроения является существенное изменение эксплуатационных характеристик машин [1]. Так, в производстве современных высокотехнологичных изделий все чаще применяют новые технологические процессы формообразования сложных поверхностей, к которым предъявляют высокие требования по точности размеров и качеству их поверхностного слоя.

К таким поверхностям можно отнести и отверстия малых диаметров, например, наклонные отверстия в форсунке (рис. 1). Так в сечении Б–Б необходимо выполнить шесть сквозных отверстий размером $\varnothing 1,29H8$, расположенных под углом к нормали к поверхности форсунки. В сечении А–А требуется провести формообразование трех сквозных отверстий диаметром $\varnothing 0,75H8$, также расположенных под углом к нормали. Допуски на размер отверстия $\varnothing 1,29H8$ и $\varnothing 0,75H8$ составляет 0,014 мм. Радиус скругления кромок отверстий не более 0,1 мм. Шероховатость поверхности отверстий должна быть $Ra = 3,2$ мкм. Форсунка выполнена из стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632–72.

Направления повышения надежности. В традиционном машиностроении отверстия 8-го качества точности изготавливаются последовательно следующими операциями осевой механической обработки – сверление (до 10 качества, шероховатость $Ra = 6,3$ мкм), зенкерование чистовое (до 8 качества, шероховатость $Ra = 3,2$ мкм) [1].

Однако для обработки отверстий диаметром менее 2 мм стандартные зенкеры отсутствуют. Ближайшие к номинальным размерам отверстий $\varnothing 1,29H8$ и $\varnothing 0,75H8$ диаметры стандартных сверл – $\varnothing 1,25$ (из дополнительного ряда), $\varnothing 0,75$ мм. Таким образом,

для обеспечения заданной точности размеров наклонных отверстий форсунки (рис. 1) потребуется изготовление специального режущего инструмента.

Поскольку отверстия в сечениях А-А и Б-Б расположены под углом к нормали поверхности, для их базирования при сверлении потребуется специальное приспособление – правка с делительной головкой.

Для сверления отверстий в заготовках из стали 12Х18Н10Т потребуются сверла, выполненные из быстрорежущей стали типа Р6М5К5. При этом стойкость сверл из-за их малых диаметров будет низкой. Существует достаточно большая доля вероятности поломки сверл во время процесса сверления.

Для осуществления такой операции потребуется рабочий высокой квалификации или применение высокоточного металлообрабатывающего оборудования.

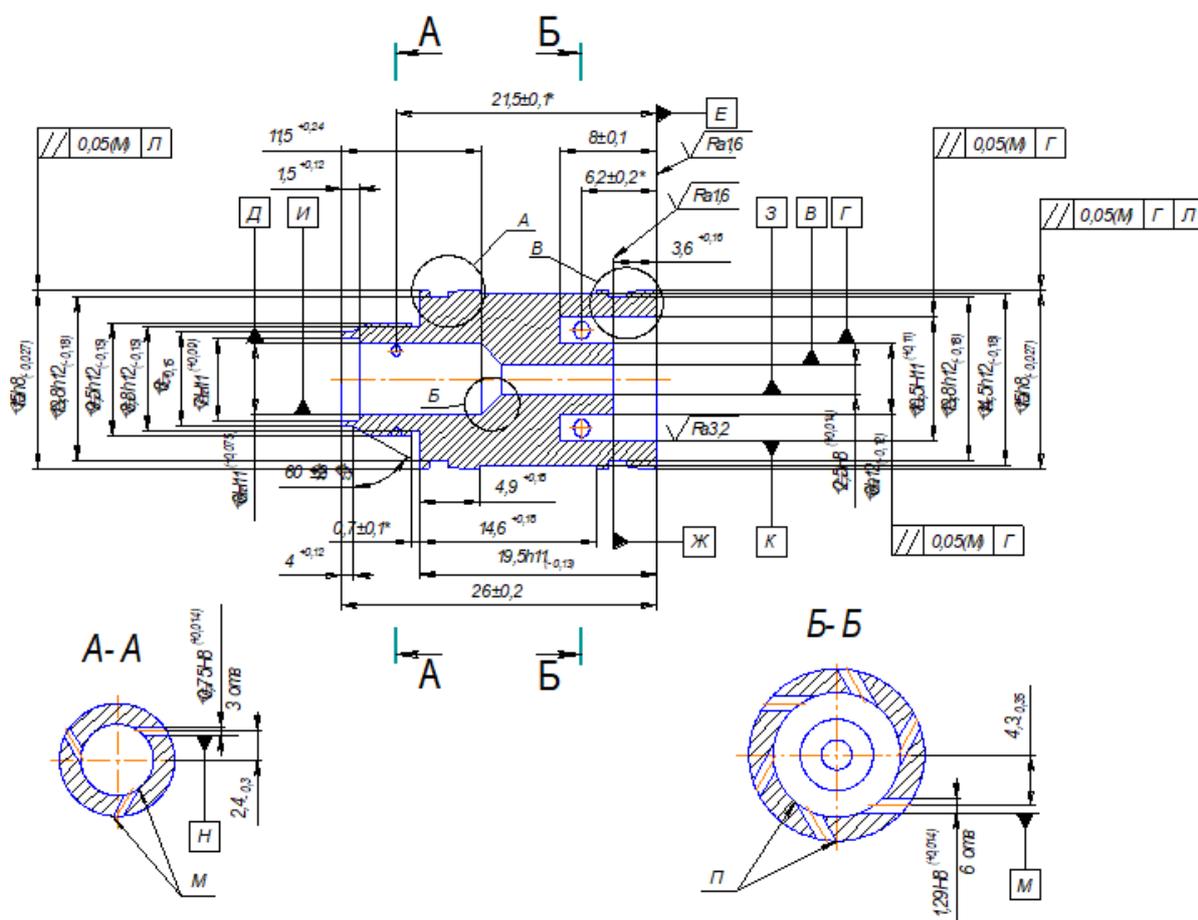


Рис 1. Форсунка с наклонными отверстиями малых диаметров – поверхности П и М (заусенцы на поверхностях П и М не допускаются)

В связи с большой сложностью формообразования отверстий малых диаметров, расположенных под углом к нормали поверхности, в настоящее время широкое применение нашла технология электроэрозионной обработки [2].

Так, электроэрозионное сверление отверстий вращающимся электродом с внутренней прокачкой рабочей среды позволило повысить производительность обработки до 20 раз, повысить точность в пределах 0,02 мм, снизить высоту измененного (дефектного слоя) в 1,5 раза (до 10 – 30 мкм), проводить обработку на глубину более 15 диаметров отверстия, дало возможность обрабатывать отверстия под различными углами к поверхности [3].

Метод электроэрозионного сверления отверстий обладает существенными преимуществами, по сравнению с традиционной осевой обработкой отверстий малых размеров. Однако и при использовании данного технологического процесса полностью не решена проблема обеспечения точности размера по 8-му качеству, шероховатости поверхности и глубины измененного дефектного слоя.

Возможно формирование отверстий малых диаметров лазерной обработкой [4]. Однако и для этого метода получения отверстий характерны те же недостатки, что и для электроэрозионного сверления.

Особенно это актуально для отверстий малых диаметров, сформированных в деталях методом селективного лазерного сплавления, например, в смесительных головках [5]. Сформированные этим методом отверстия характеризуется низкой точностью (14 качество) и высокой шероховатостью (Ra более 12,5 мкм).



Рис 2. Примеры деталей, полученных методом селективного лазерного сплавления:
1 – смесительные головки с отверстиями малых диаметров [5]

Для повышения надежности технологического процесса изготовления отверстий малых диаметров в различных деталях, обеспечения заданной точности их размеров и качества поверхностного слоя, необходимо в технологический процесс включить операцию финишной (отделочной) обработки.

Из-за малых размеров отверстий финишная обработка их поверхностей традиционными методами затруднена. Для их обработки необходимо применять нетрадиционные (новые) методы финишной обработки [6].

Заключение. Дальнейшим направлением исследований для повышения надежности изготовления нетехнологичных поверхностей типа отверстие малого диаметра будет обоснование выбора метода финишной обработки. Критерием выбора будет обеспечение заданной точности размеров отверстия и шероховатости ее поверхности.

Дополнительными условиями отбора будут являться возможность полного удаления или существенного уменьшения дефектного слоя с поверхности отверстий, возмож-

ность скругления выходных кромок отверстий и удаления с этих кромок заусенцев. Выбранная технология также должна отвечать требованиям по экономической эффективности процесса.

Библиографические ссылки

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

2. Кротова А. Е., Подпрятков Д. В., Блинова Т. А. Некоторые аспекты электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра // Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского : сборник докладов, Москва, 14 февраля 2020 года. Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2020. С. 53–56. EDN OKCOXU.

3. Владыкин А. В. Разработка высокоскоростного метода электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра с регулированием режимов по массовыносу : специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2013. 18 с. EDN ZPAFMR.

4. Горбачев И. А. Обработка отверстий малых диаметров в твердых сплавах // Сборник научных трудов SWorld. 2012. Т. 6, № 1. С. 20–22. EDN OYAHSV.

5. 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.

6. Левко В. А. Абразивно-экструзионная обработка. Современный уровень и теоретические основы процесса : монография ; 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.

© Устюгов-Грицай А. В., Петецкая А. Е., 2023

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ КРИВОЛИНЕЙНЫХ КАНАЛОВ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

П. А. Иванов, В. А. Левко

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

Рассмотрены основные особенности технологического процесса обработки абразивным потоком криволинейных трубчатых заготовок. Приведено описание особенностей обработки таких поверхностей, обусловленных выбором вязкости рабочей среды, видом и дисперсностью наполнителя, а также операционным контролем за технологическим процессом.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, технологический процесс, криволинейный канал, операционный контроль, трубная заготовка

Введение. В машиностроении проблемным вопросом, является обеспечение равномерной шероховатости внутренних поверхностей изогнутых прямоугольных заготовок, полученных, в том числе аддитивными технологиями. Согласно конструкторской документации, величина шероховатости внутреннего канала должна быть не более $Ra = 0,4$ мкм.

Окончательная обработка изогнутых труб традиционными способами затруднена, так как малое по площади поперечное сечение канала имеет форму, отличную от круглого сечения, что ограничивает доступ режущего инструмента к изогнутым участкам, а также не гарантирует равномерную обработку по всему периметру некруглого сечения. Для финишной обработки таких заготовок применяют технологические процессы, у которых в качестве инструмента применяется поток различных сред, несущих рабочие элементы и способных копировать форму обрабатываемого канала. Наибольшие перспективы для обработки таких заготовок представляет специальная 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].

Ключевые особенности технологического процесса обработки абразивным потоком криволинейных заготовок. При разработке технологического процесса *AFM* криволинейных заготовок исходными данными являются требования рабочего чертежа: геометрические характеристики (длина канала, площадь и форма поперечного сечения, требования к взаимному расположению поверхностей, угол изгиба канала), исходная и требуемая шероховатость поверхностей, а также материал и способ формообразования заготовки. В некоторых случаях необходимо обеспечить определенное значение твердости поверхности. Способ получения заготовки оказывает существенное влияние на точность геометрических размеров и состояние поверхностного слоя внутреннего изогнутого канала. Так заготовки, полученные аддитивными технологиями, имеют большую шероховатость и твердость поверхностного слоя, по сравнению с традиционными методами формообразования.

При экспериментальных исследованиях *AFM* криволинейных каналов трубных заготовок был установлен ряд особенностей. Первая особенность обусловлена отношением длины обрабатываемого канала L к площади его поперечного сечения $S - L/S > 10$. Такое сочетание характерно для длинных отверстий. Оно затрудняет применение высоковязких рабочих сред из-за их высокой жесткости (текучести). Текучесть среды зависит от ее вязкости, а вязкость рабочей среды определяется вязкостью основы (полидиметилсилоксановый полимер) и степенью наполнения среды твердыми частицами. Вязкость рабочей среды является ключевым показателем, так как она определяет скорость и давление потока рабочей среды в обрабатываемом канале. Чем выше вязкость, тем меньше скорость и больше давление потока при равных напряжения сдвига (входного давления).

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 %. Моделирование показало, что в потоке среды низкой вязкости наблюдается неравномерность скорости и давления, особенно в изогнутых частях канала. При течении сред с высокой вязкостью в изогнутых частях канала возможно заклинивание потока среды. Применение сред средней вязкости удовлетворяет требованию по распределению скорости потока и позволяет определить степень влияния режимов обработки на характер потока в канале [3].

Для обработки криволинейных каналов применена рабочая среда средней вязкости, состав которой создан по подобию среды, описанной в исследованиях процесса абразивно-экструзионной обработки малых отверстий [4]. В качестве пластификатора традиционной рабочей среды высокой вязкости на основе полидиметилсилоксанового каучука применена алмазная паста АСН 60/40 в определенных пропорциях.

Вторая особенность процесса обработки связана с неравномерностью обработки прямоугольного профиля сечения и возможностью заклинивания абразивных частиц в изгибах с последующим шаржированием их в обрабатываемую поверхность. Эти явления имеют место при неправильном выборе состава рабочей среды. Для вероятного исключения приведённых факторов рекомендуется использовать наполнитель, величина зерна которого не превышает значения удвоенного радиуса внутреннего закругления поперечного сечения обрабатываемой заготовки [5]. Исключением вероятности шаржированности поверхности является использование синтетического алмаза, так как его основная масса имеет более сферическую форму граней кристаллов, что обуславливает высокую стойкость граней к скалыванию, выкрашиванию по сравнению с карбидом кремния и электрокорундом. Это позволит уменьшить вероятность шаржирования скотлыми частичками зерна [6].

Третьей особенностью процесса *AFM* является упрочнение поверхностного слоя. Например, при обработке абразивным потоком латунных образцов обеспечено не только изменение направления и величины шероховатости поверхности от $Ra = 1,3...1,8$ мкм до $Ra = 0,16...0,25$ мкм, но и увеличение микротвердости поверхности от 110 HV до 190 HV [7].

Равномерность шероховатость обработанной поверхности являются показателями качества процесса *AFM*. К особенностям оперативного контроля процесса *AFM* относится контроль времени, количество циклов, давление и скорость рабочей среды, а также ее температура. Контроль данных параметров позволяет обеспечить требуемое качество и производительность процесса *AFM* прямоугольных заготовок с нелинейной осью [7].

Заключение. Разработка технологического процесса обработки абразивным потоком криволинейных каналов трубных заготовок с учетом ключевых особенностей, установленных в ходе моделирования процесса и экспериментальных исследований, позволили обеспечить заданную конструкторской документацией шероховатость внутренней поверхности, равномерную по всей длине канала.

Библиографические ссылки

1. Иванов П. А., Левко В. А. Перспективы обработки абразивным потоком внутренней поверхности изогнутых трубных заготовок прямоугольного сечения // *Металлообработка*. 2021. № 4(124). С. 11–19. DOI 10.25960/mo.2021.4.11. EDN MAATAT.

2. Ivanov P. A., Levko V. A., Litovka O. V. Overview of finish machining methods for the internal surfaces of rectangular pipe parts // *Journal of Physics Conference Series*. 2022. DOI 10.1088/1742-6596/2373/7/072040.

3. Иванов П. А., Левко В. А., Литовка О. В. Моделирование и экспериментальная обработка абразивным потоком внутренней поверхности заготовок некруглого сечения // *Металлообработка*. 2022. № 3(129). С. 24–34. DOI 10.25960/mo.2022.3.24. EDN EVCLSQ.

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

5. Иванов П. А., Левко В. А. Выбор вида и величины зерна наполнителя при обработке абразивным потоком прямоугольных заготовок из цветных сплавов // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2022. Т. 25. № 2. С. 6–13. DOI 10.22213/2413-1172-2022-2-6-13. EDN GONIUIJ.

6. Иванов П. А., Левко В. А. Анализ вероятности шаржирования поверхности каналов некруглого сечения при обработке абразивным потоком // *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. 24–26. EDN NEPPBG.*

7. Иванов П. А., Левко В. А. Анализ шероховатости и микротвердости внутренней поверхности латунной прямоугольной заготовки до и после обработки абразивным потоком // *Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Том Часть 1. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2022. С. 566–568. EDN QYBUZI.*

7. Левко В. А., Иванов П. А., Литовка О. В. Особенности операционного контроля при обработке абразивным потоком // *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.*

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ЗАКРЫТЫХ КАНАЛОВ ЗАГОТОВКИ ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ БАЗИРОВАНИЯ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ В ПРИСПОСОБЛЕНИИ

В. А. Левко, Н. С. Теряев

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

Рассмотрен современный уровень технологии обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных заготовок. Описаны недостатки существующих конструкций приспособлений для обработки абразивным потоком таких заготовок. Предложены решения по повышению надежности обработки абразивным потоком закрытых каналов заготовки за счёт уменьшения погрешности базирования и закрепления в приспособлении.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, надежность обработки, рабочая среда, погрешность базирования и закрепления заготовки.

Введение

В настоящее время в производстве изделий все большее применение находят детали с закрытыми каналами, заготовки которых получают методом литья по выплавляемым моделям. Анализ применяемых технологий финишной обработки закрытых каналов сложнопрофильных деталей показал, что способ обработки абразивным потоком (*Abrasive Flow Machine (AFM)*) обеспечивает требуемую величину шероховатости внутренних поверхностей подобных каналов. При этом в поверхностном слое канала после финишной обработки формируются сжимающие остаточные напряжения [1]. В ряде работ эта технология имеет такие названия как абразивно-экструзионная обработка или экструзионное хонингование.

Визуальные исследования потока среды в каналах различной геометрической формы экспериментально подтвердили теоретические предположения: – возникновение упругих (нормальных напряжений) в потоке среды; – движение абразивных частиц в потоке среды по линиям тока с образованием упругой (силовой) цепочки [2].

Данный способ был предложен корпорацией *Extrude Hone* в США в 1960-х годах. В нем высоковязкий полимерный (силиконовый) материал, равномерно наполненный мелкодисперсными абразивными частицами, возвратно-поступательно перемещается поршнями рабочих цилиндров через обрабатываемую деталь. Этот материал (рабочая среда) под давлением становится текучей (вязкоупругой) матрицей. При течении создается сжимающее давление на обрабатываемую поверхность и осуществляется абразивный контакт [3].

Начиная с 80-х годов прошлого века метод *AFM* стал применяться для удаления дефектного слоя и полирования литых поверхностей лопаток, колес компрессора и рабочих колес [4]. Однако при этом наблюдается незначительная неравномерность обработки [5].

Одной из таких причин является достаточно высокая погрешность базирования и закрепления заготовки с закрытыми каналами в существующих конструкциях приспособлений для обработки.

Повышение надежности обработки

Известно, что при проектировании специальных средств оснащения к приспособлениям предъявляют ряд требований, в том числе и по уменьшению величины погрешности базирования и закрепления заготовок [6].

Общая схема базирования и закрепления заготовки в приспособление для обработки абразивным потоком (рис. 1) включает в себя верхний рабочий цилиндр 1 и нижний рабочий цилиндр 2 установки для обработки абразивным потоком, а также крышки 3 и основы 4 приспособления, резьбовой шпильки 5, крепежной гайки 6, соединительных болтов 7 и обрабатываемой заготовки 8.

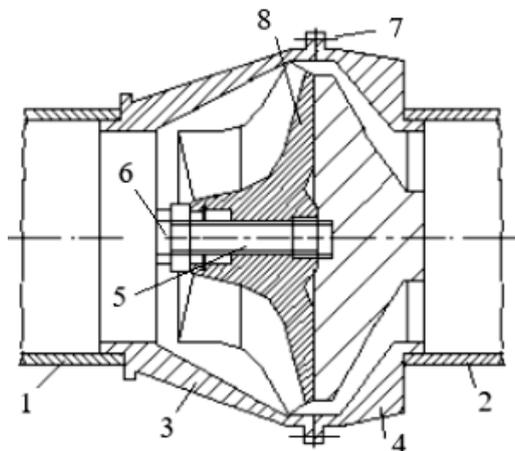


Рис 1. Общая схема базирования и закрепления заготовки в приспособление для обработки абразивным потоком

Основа 4 приспособления представляет собой корпус с центральной частью, соединенные между собой тремя перегородками. Между перегородками расположены полости для подачи рабочей среды. В центральной части есть резьбовое отверстие, в которое вкручивается резьбовая шпилька 5. Основа 4 с вкрученной шпилькой 5 устанавливается на посадочную плоскость нижнего рабочего цилиндра 2. Далее на шпильку монтируется обрабатываемая заготовка 8. При этом поверхность центральной части основы 4 является установочной базой. При помощи крепежной гайки 6, накручиваемой на шпильку 5, заготовка 8 закрепляется в приспособлении, при этом формируется направляющая база. Далее на основу 4 монтируется крышка 3, закрепляясь болтами 7. После этого верхний рабочий цилиндр 1 при помощи траверсы поджимает приспособление в сборе к нижнему рабочему цилиндру 2. Заготовка готова к обработке.

Как правило, закрытые каналы расположены по окружности заготовок (лопатки крыльчаток, турбин, роторов, направляющих аппаратов и др.). При этом поверхности каналов находятся под углом (до 350°) относительно направления потока газа и жидкости в агрегатах с изменением углов наклона каналов по его длине, а геометрические параметры каналов изменяются в широком диапазоне [7].

Таким образом, обрабатываемая заготовка в сечении имеет лопатки, расположенные наклонно к основному движению рабочей среды, что при использовании обычного приспособления ведет к образованию застойных зон и дополнительным потерям потока.

Известен способ обработки деталей рабочей средой (абразивной массой), при котором поток рабочей среды посредством наклонных в зоне примыкания лопаток направляющих аппаратов 1 и 2 изменяет направление движения основного потока и входит в закрытые каналы заготовки, образованные лопатками 2, по касательной плоскости к обрабатываемой поверхности начального участка канала в заготовке (рис. 2). Таким же образом обрабатывается противоположная сторона канала в детали при движении

рабочей среды массы через канал направляющего аппарата в обратном направлении. Подача рабочей среды по касательной плоскости к обрабатываемой поверхности каналов в детали позволяет исключить образование застойных зон и отрыв потока, в которых абразив не производит режущего действия [8].

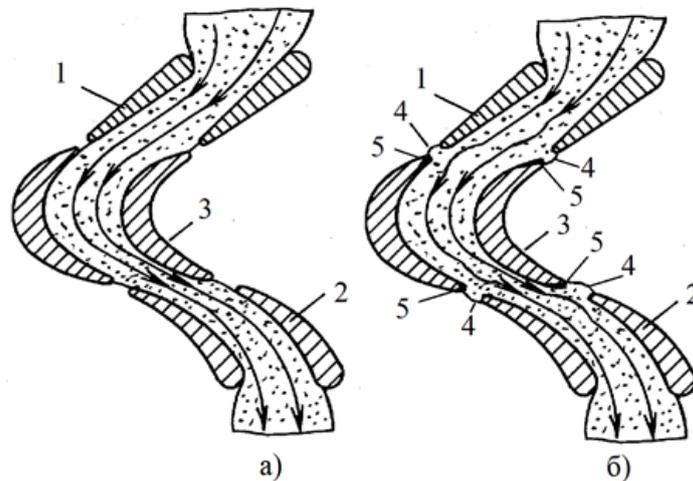


Рис. 2. Теоретическая схема способа обработки абразивным потоком с направляющим аппаратом:
а – без учета эффекта упругого восстановления потока;
б – с учетом эффекта упругого восстановления потока

При сборке приспособления по схеме, показанной на рис. 2а, лопатки направляющих аппаратов 1 и 2 примыкают к обрабатываемым поверхностям лопаток заготовки 3 с определенным зазором. Наличие зазора 4 между лопатками 1 – 3 и 2 – 3 ведет к проявлению эффекта упругого восстановления потока 5 (рис. 2б). При этом часть потока рабочей среды занимает свободное пространство внутри приспособления. Возникающая при этом перестройка профиля потока рабочей среды приводит к неравномерности обработки закрытого канала. Наибольший съем материала наблюдается в зонах 5 на входе и выходе в канале, где перестройка профиля потока максимальна.

Для уменьшения влияния данного эффекта перестройки профиля потока необходимо, чтобы выходные сечения каналов направляющих аппаратов 1 и 3 были аналогичны по форме и размерам входным сечениям межлопаточных каналов заготовки 2. Их размер также может быть меньше на величину коэффициента упругого восстановления потока рабочей среды.

При первоначальном формировании потока мгновенное давление рабочей среды может достигать величин порядка 5...8 МПа, что приводит к возникновению силы, действующей в осевом направлении на центральную часть основания 4. Численные значения этой силы могут варьироваться в зависимости от диаметров рабочих цилиндров установки в пределах от 30000 до 65000 Н.

Так как поток рабочей среды поступает на лопатки заготовки под некоторым углом, на заготовку со стороны потока дополнительно воздействует момент силы. При использовании общей схемы базирования и закрепления заготовки (рис. 1) опорная база отсутствует, что при недостаточной силе затяжки крепежной гайки 6 делает возможным поворота заготовки 8, в том числе и относительно направляющих аппаратов 1 и 2 (рис. 2). Этот эффект приводит к существенному изменению профиля потока рабочей среды, а следовательно, дополнительной неравномерности обработки.

Для решения двух вышеописанных проблем и повышения надежности обработки абразивным потоком закрытых каналов предложена схема способа обработки абразивным потоком с направляющим аппаратом и установочными пальцами (рис. 3).

В установочное отверстие базового основания 11 нижней части 1 приспособления устанавливается обрабатываемая заготовка 4. При этом в два отверстия заготовки 4 входят цилиндрический палец 12 и призматический палец 13. Пальцы 12 и 13 служат для базирования заготовки (направляющая база) при обработке и для предотвращения ее поворота потоком рабочей среды относительно заданного положения.

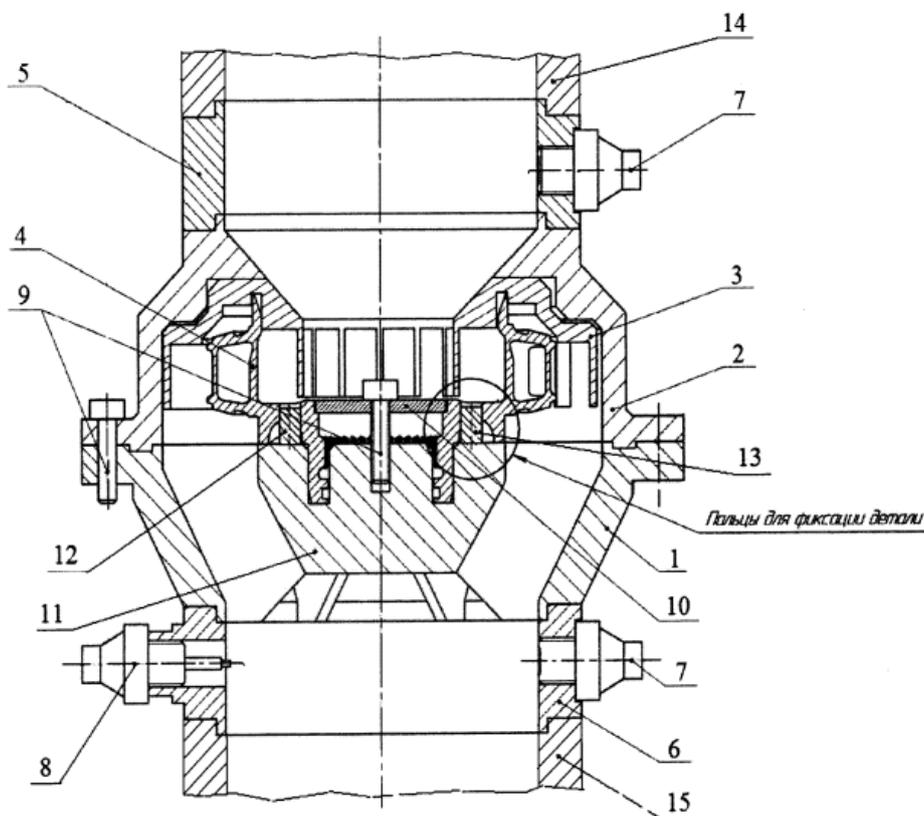


Рис 3. Схема способа обработки абразивным потоком с направляющим аппаратом и установочными пальцами

При помощи стопорного кольца 10 и крепежного болта 9 (опорная база) заготовка 4 закрепляется на основании 11 (установочная база). Далее на заготовку 4 монтируется направляющий аппарат 3, закрываемый верхней частью 2 приспособления. При этом лопатки направляющего аппарата располагают так, чтобы они обеспечили требуемый профиль потока на входе в обрабатываемые каналы. При этом зазор между каналами направляющего аппарата и обрабатываемой заготовкой не должен создавать условия для возникновения эффекта упругого восстановления струи потока. После этого нижняя часть 1 и верхняя часть 2 приспособления соединяются болтами 9.

Необходимый для эффективной обработки объем рабочей среды помещается в нижний рабочий цилиндр 15 установки для обработки абразивным потоком. В нижний рабочий цилиндр вставляется нижний переходник 6, в который монтируется собранное приспособление с заготовкой и направляющим аппаратом. На верхнюю часть 2 приспособления устанавливается верхний переходник 5, который входит в верхний рабочий цилиндр 14 установки. Рабочий цилиндр 14 имеет возможность вертикального перемещения, а установка обеспечивает закрепление приспособления между своими рабочими цилиндрами 14 и 15.

Для контроля и регулирования величины давления потока рабочей среды применяют датчики давления 7. Для контроля температуры рабочей среды используют температурный датчик 8.

При подаче давления шток нижнего рабочего цилиндра 15 продавливают рабочую среду через нижний переходник 6 в нижнюю часть 1 приспособления. При этом профиль потока меняется от цилиндрического сечения к кольцевому сечению. Далее абразивный поток с кольцевым профилем достигает входные отверстия каналов направляющего аппарата 3. При этом поток разбивается на отдельные составляющие, количество которых соответствует количеству каналов обрабатываемой заготовки 4. Профиль каждой составляющей потока принимает форму сечения межлопаточного канала направляющего аппарата 3 и далее продавливается в каналы заготовки 4. При этом на входе и выходе в каналы заготовки перестройка профиля составляющих потока рабочей среды не происходит.

Поскольку поперечное сечение входных отверстий направляющего аппарата 3 больше по своей площади, чем поперечное сечение выходных отверстий, имеющих одинаковую или меньшую по размерам на величину коэффициента упругого восстановления потока площадь с входными и выходными сечениями каналов заготовки, создаются такие условия течения потока, при котором основная обработка происходит в каналах детали.

Данное решение легло в основу разработки способа обработки абразивным потоком межлопаточных каналов крыльчаток [9].

В результате применения данного способа удалось повысить надежности обработки абразивным потоком закрытых каналов заготовки из стали 08X14H7МЛ за счёт уменьшения погрешности базирования и закрепления в приспособлении. Состояние поверхности заготовки до и после обработки абразивным потоком показаны на рис.4.

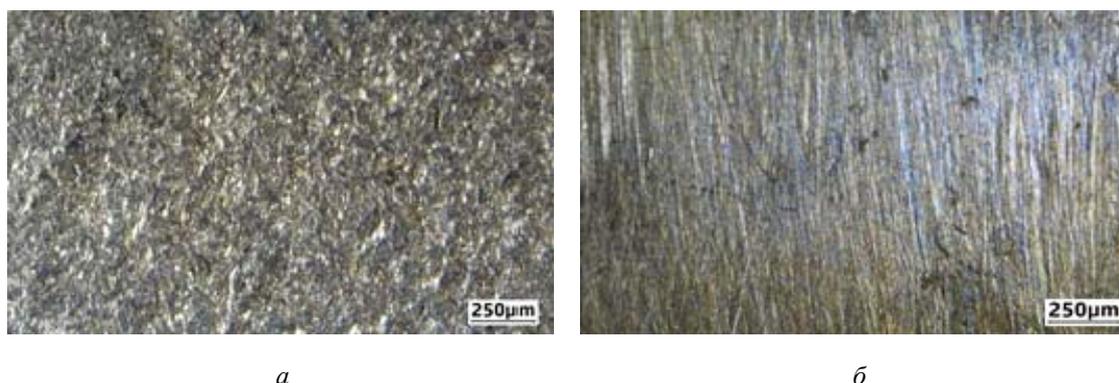


Рис 4. Состояние поверхности заготовки:
а – исходное состояние; б – состояние после 60 циклов обработки абразивным потоком

В ходе обработки абразивным потоком была полностью удалена литейная корка и получена равномерная обработка поверхности закрытых каналов заготовки. При этом величина шероховатости поверхности межлопаточного канала крыльчатки изменилась от $Ra = 6,2 \dots 8,7$ мкм до $Ra = 2,8 \dots 3,2$ мкм.

Фактическая микротвёрдость образцов измерена на приборе *BUEHLER MICROMET* 5100. Зафиксировано увеличение микротвёрдости поверхности после обработки от исходной в интервале 38,5-40,5 HRC до 44,5-45,5 HRC после обработки.

Заключение

Предложенные технические решения позволили обеспечить надёжную схему базирования заготовки в приспособлении, существенно уменьшив при этом погрешность базирования и закрепления.

Библиографические ссылки

1. Левко В. А., Теряев Н. С. Технологии финишной обработки закрытых каналов сложнопрофильных деталей // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Том Часть 1. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 572–577. EDN GCWKEB.
2. 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. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 12029. DOI 10.1088/1757-899X/1155/1/012029. EDN CGFFUG.
3. Pat. 3521412 US, ISC B24B 1/00, 19/00. Method of honing by extruding / McCarty R.W. 12.04.1968; 21.01.07.1970.
4. Rhoades, L.J. (1990). Abrasive Flow Machining for Automatic Surface Finishing and Capacitance Technology for In-Process Surface and Dimensional Metrology. In: Meguid, S.A. (eds) Surface Engineering. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0773-7_46.
5. 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.
6. Сысоев С. К., Сысоев А. С., Левко В. А. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов. 1-е, Новое. Санкт-Петербург : Лань, 2011. 352 с. ISBN 978-5-8114-1140-5. EDN WHYVAP.
7. Экструзионное хонингование деталей летательных аппаратов : теория, исслед., практика : монография / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, С. К. Сысоев, А. С. Сысоев ; Федер. агентство по образованию, Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. М.Ф. Решетнева. – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. М.Ф. Решетникова, 2005. ISBN 5-86433-245-3. EDN QNSWNN.
8. Авторское свидетельство № 1161359 А1 СССР, МПК В24С 1/08. Способ обработки деталей абразивной массой : № 3652014 : заявл. 11.07.1983 : опубл. 15.06.1985 / С. К. Сысоев, М. А. Лубнин ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я Г-4778. EDN AFEVTU.
9. Патент № 2751073 С1 Российская Федерация, МПК В24С 1/00. Способ обработки абразивным потоком межлопаточных каналов крыльчаток : № 2020136652 : заявл. 06.11.2020 : опубл. 07.07.2021 / Н. С. Теряев, В. А. Левко ; заявитель Акционерное общество «Красноярский машиностроительный завод». EDN KCOWKS.

© Левко В. А., Теряев Н. С., 2023

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

А. Е. Петецкая, А. В. Устюгов-Грицай
Научный руководитель – В. А. Левко

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

Метод селективного лазерного сплавления отнесен к высокоточным способам получения заготовок (деталей), при котором объем механической обработки сведен к минимуму. Выявлены основные недостатки, присущие данному методу формообразования деталей. Для повышения эффективности метода селективного лазерного сплавления обоснованы критерии выбора технологий финишной обработки.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, заготовка, шероховатость поверхности, финишная обработка.

Введение. Технология селективного лазерного сплавления (*Selective Laser Melting (SLM)*), основанная на избирательном плавлении нанесенного на подложку слоя порошка, является одной из наиболее интенсивно развивающихся технологий аддитивного производства. Она 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].

Известно, что проведенное исследование внешнего слоя деталей из полиамида, полученного методом *SLM*, показало наличие высокой шероховатости, вызванной эффектом прилипания отдельных частиц порошка к поверхности, нагретой при спекании детали. Это подтверждают полученные параметры шероховатости: среднее арифметическое значение отклонения профиля $Ra = 0,17$ мм; среднее арифметическое значение шага неровности $Sm = 0,33$ мм; средний шаг местных выступов профиля $S = 0,54$ мм; максимальная высота профиля $Rmax = 0,36$ мм. Полученные параметры шероховатости могут негативно повлиять на такие эксплуатационные характеристики, как герметичность соединений, износостойкость, химическая стойкость, газопроницаемость [2].

В настоящее время технология изготовления изделий из металлических порошков методом селективного лазерного плавления с качеством шероховатости поверхности не хуже $Ra = 6$ мкм представляет собой модификацию стандартной технологии селективного лазерного плавления. Она реализуется на специально доработанной установке с целью получения высокого качества поверхности изделия. Все параметры процесса подбираются таким образом, чтобы при наибольшей возможной скорости производства продукции получить в первую очередь максимально возможное качество поверхностей, в особенности расположенных под отрицательным углом к вертикальной оси построения изделия. 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 [3].

Пример деталей [4], формообразование которых проведено методом селективного лазерного сплавления показан на рис. 1.



Рис 1. Сопло камеры, полученное методом селективного лазерного сплавления [4]

Обоснование критериев выбора. Деталь машины представляет собой упорядоченную совокупность ее отдельных поверхностей. Множество заданных значений показателей для каждой поверхности могут быть различными. При фиксированных свойствах исходной заготовки достижению каждого множества значений показателей качества комплекса поверхностей соответствует оптимальная последовательность технологических методов (в том числе и различной физической природы), объединяемая в элементарный маршрут обработки комплекса. Эффективность же технологического процесса изготовления детали (по различным технико-экономическим критериям) зависит от ее структуры [5].

Технологический процесс изготовления детали должен обеспечить соответствие рабочему чертежу детали формы, размеров и взаимного расположения обработанных поверхностей, а также качество поверхностного слоя – шероховатость и твердость поверхности, глубину дефектного слоя.

Совершенствование технологии селективного лазерного сплавления позволяет получить достаточно точные размеры поверхностей (8–10 квалитет) с соблюдением допусков формы и взаимного расположения поверхностей. Однако, как было указано выше, шероховатость поверхности не соответствует экономическим квалитетам точности, устанавливаемым при качественной и количественной оценке технологичности детали [6].

Метод селективного лазерного сплавления можно отнести к высокоточным методам заготовительного производства, характеризующимся формированием заготовки с высоким показателем коэффициента использования материала.

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/c), что приводит к возникновению метастабильных структур во всем объеме материала [7]. Такие же структуры формируются и в поверхностном слое.

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.

Для внутренних цилиндрических поверхностей эффективным будет применение хонингование. Финишная обработка внутренних поверхностей сложной формы традиционными методами затруднена [8].

При выборе технологии для финишной обработки сложных внутренних поверхностей, полученных методом селективного лазерного сплавления, необходимо определить целевую функцию. Такой функцией необходимо принять обеспечение требуемой величины шероховатости внутренних поверхностей деталей. Для определения оптимума целевой функции необходимо наложить ряд граничных условий.

В качестве граничных условий приняты:

- равномерная по всей длине шероховатость поверхности;
- направление шероховатости, совпадающее с направлением потоков рабочих тел или перемещения сопрягаемых деталей при эксплуатации;
- формирование остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое;
- полное удаление изъянов (дефектов) поверхности, таких как риски, царапины, трещины, поры, раковины, расщелины (щели), выбоины, вздутия, чешуйки, включения, кратеры, задиры и полосы [9];
- исключение появления дополнительных дефектов поверхности на макро и микроуровне;
- соответствие требованиям по минимизации временных и стоимостных затрат на подготовку производства и непосредственно на обработку.

Заключение. Для повышения надежности технологического процесса изготовления деталей методом селективного лазерного сплавления необходимо обоснованный выбор технологий финишной обработки внутренних поверхностей за счет применения установленных критериев.

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.

Библиографические ссылки

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. Анализ качества поверхности и внутренней структуры материала деталей ракетно-космической техники при использовании технологии селективного лазерного спекания / А. С. Филимонов, А. М. Шувалова, А. Л. Галиновский, А. Н. Королёв // XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Королёвские чтения 2022 : XLVI Академические чтения по космонавтике, Москва, 25–28 января 2022 года. Том 4. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. С. 209–211. EDN CSACHA.

3. 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. Часть 1. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2021. С. 165–166. EDN UIWPSC.

4. 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: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 208–210. EDN FQFLPL.

5. Зубарев Ю. М. Специальные методы обработки заготовок в машиностроении : учебное пособие. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 400 с. ISBN 978-5-8114-1856-5. Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/212009>.

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

7. Pham D.T., Dimov S.S. Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling. London: Springer-Verlag, 2001. 214 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-0703-3.

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

9. Инженерия поверхностей трения : учебное пособие / Ю. А. Харламов, Д. А. Вишневецкий, А. П. Жильцов, А. В. Бочаров. Липецк : Липецкий ГТУ, 2020. 208 с. ISBN 978-5-00175-050-5. Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/205910>.

© Петецкая А. Е., Устюгов-Грицай А. В., 2023

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА НА ОБРАБОТКУ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ

О. В. Литовка, В. А. Левко

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

Рассмотрено влияние формы зерна на обработку абразивным потоком. Подтверждено предположение о том, что абразивное зерно является многолезвийным инструментом, воздействующим на обрабатываемую поверхность, воздействующим на обрабатываемую поверхность, как по фактической площади контакта (режущими кромками), так и по контурной площади контакта (зерно в целом). Рабочая среда для обработки абразивным потоком описана как наполненная система (концентрированная суспензия). Абразивные зерна окружены сольватным слоем, величина которого определяет диаметр единичной линии тока в потоке рабочей среды.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, вид абразива, рабочая среда, коэффициент формы, сольватный слой.

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].

Обзор подходов к описанию контактных взаимодействий при *AFM* приведен в ряде российских и зарубежных исследований [2; 3]. Однако степень влияния формы и вида абразивного зерна на производительность и качество процесса обработки в существующих работах раскрыта недостаточно для разработки рекомендаций по выбору вида, формы и величины абразивного зерна, а также его процентного содержания в массе рабочей среды для обработки заготовок разной геометрической формы и изготовленных из разных материалов.

Одной из проблем теоретического описания процесса удаления материала единичным абразивным зерном при *AFM* заключается в том, что в представленных моделях зерно в контакте имеет одну режущую кромку [4–7]. При этом дополнительно отмечено, что три геометрических параметра, а именно высота абразивных зерен, угол заточки грани и высота износа, оказывают существенное влияние на максимальную глубину резания абразивных зерен, при этом параметр размера зерна имеет большое влияние и может контролироваться путем выбора различной зернистости абразивных зерен [7].

Предложена схема приложения сил на единичное абразивное зерно, а также принципиальная схема удаления материала модели единичным абразивом (рис. 1) [8].

В другом представлении абразивное зерно является многолезвийным инструментом, воздействующим на обрабатываемую поверхность, как по фактической площади контакта (режущими кромками), так и по контурной площади контакта (зерно в целом).

Абразивное зерно в пределах контурной площади касания воздействует на все единичные микронеровности обрабатываемой поверхности в целом, а также на каждую единичную микронеровность отдельным выступом, представляющим собой режущую кромку. Угол таких кромок зависит от вида и величины абразивного зерна [9].

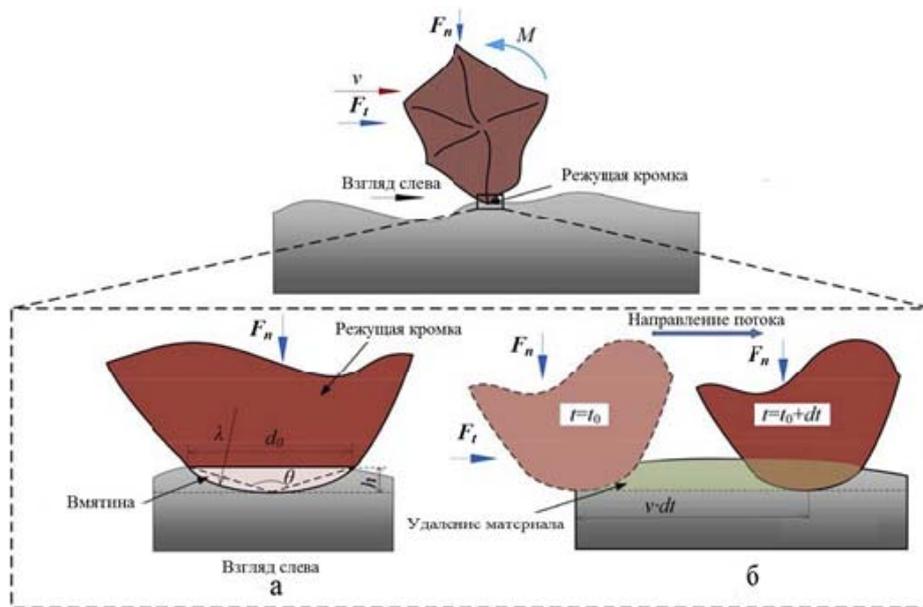


Рис. 1. Модель удаления материала единичным абразивным зерном: (а) вдавливание в заготовку под действием нормальной составляющей силы резания; (б) схема удаления материала кромкой единичного абразивного зерном; где F_n и F_t – нормальная и тангенциальная составляющие силы резания соответственно; v – скорость единичного абразивного зерна; h – глубина внедрения абразивного зерна в заготовку при контакте; d_0 – длина вмятины; λ – радиус вершины кромки зерна, θ – максимальный угол между двумя линиями, соединяющих нижнюю точку вмятины и две точки на верхней кромке вмятины; t – время; t_0 – время начала контакта; M – момент сил [8]

Влияние формы абразивного зерна на обработку абразивным потоком. Рабочую среду для AFM можно рассматривать как наполненную систему или концентрированную суспензию (гетерогенную дисперсную систему), содержащую твёрдую диспергированную фазу (твёрдые частицы), распределенную в полимерной дисперсионной среде. Величина частиц велика такова, что полностью исключает их броуновское движение. В таких системах формируются дисперсные структуры, а сам процесс структурообразования обусловлен энергетическим взаимодействием между частицами дисперсной фазы и дисперсионной средой.

При течении концентрированных суспензий происходит не только движение слоев жидкости относительно друг друга, но и вращательное движение частиц внутри слоев. Чем более высокая концентрация частиц, тем большее влияние на характеристики течения оказывает пространственная структура суспензии и взаимодействие частиц твердой между собой [10].

При низком содержании наполнителя он незначительно влияет на процесс течения, взаимодействие между частицами почти отсутствует и динамическая вязкость наполненного полимера близка по значению к вязкости полимерной матрицы. При увеличении степени наполнения вязкость наполненного полимера возрастает, а сдвиговая вязкость может быть теоретически найдена как вязкость суспензии. Взаимодействие между частицами уже существует, но по сравнению с взаимодействием «наполнитель – матрица» еще мало. При определенном значении наполнения начинают доминировать взаимодействия в системе «наполнитель – наполнитель» и реологические свойства материала уже зависят от внутреннего трения между частицами наполнителя [11].

Исходя из имеющихся данных рабочие среды для *AFM* можно отнести к концентрированным суспензиям. При анализе движения отдельных абразивных зерен, проведенном на основе визуальных исследований процесса течения рабочей среды установлено, что они перемещаются по линиям тока. Абразивное зерно, контактирующее с обрабатываемой поверхностью, в потоке совершает вращательное движение. При установившемся течении расстояние между соседними зёрнами не изменяется [12]. Тем самым подтверждается предположение об образовании в потоке упругой цепочки [13].

В наполненных полимерах на границе раздела фаз образуется граничный или сольватный слой дисперсионной среды. Он характеризуется плотным и упорядоченным расположением структурных элементов полимерной матрицы.

Силоксановые каучуки (кремнийорганические полимеры), являющиеся основой среды, характеризуются высокой прочностью связей Si-O (более 420 кДж/моль) и Si-C (около 415 кДж/моль), а также значительной гибкостью и малыми силами межмолекулярного взаимодействия (плотность энергии когезии 210 Дж/см³). Их относят к эластомерам.

Полидиметилсилоксановые каучуки обладают низкой поверхностной энергией. Считается, что эти каучуки не склонны к адгезии к другим материалам. Однако в процессе литья под давлением на поверхностях полидиметилсилоксанового каучука и пластины из диоксида кремния получен гладкий тонкий слой модифицированного полимера. Таким образом экспериментально подтверждена возможность адгезии полимера и абразива, несмотря на небольшое количество гидроксильных групп (собственных гидроксильных групп) [14].

Толщина сольватного слоя вокруг наполнителя зависит как от свойств полимерной матрицы, так и от дисперсности, вида и формы частиц наполнителя. Известно, что собственная поверхность кристаллов (абразивных зерен) относится к двумерным дефектам из-за нарушения периодичности расположения атомов, а также избыточной энергией поверхности по сравнению с объемом (кристалла), обусловленной ненасыщенностью валентных связей поверхностных атомов. Эта энергия называется поверхностной. Для твердых тел поверхностная энергия составляет 1...5 Дж/м². Изломы на ступенях граней и выходы дислокаций на поверхности повышают скорость химических взаимодействий с окружающей средой [15].

Известно, что форма зерна значительно влияет как на структурно-механические свойства и работоспособность абразивного инструмента, так и на эффективность процесса шлифования. Коэффициент формы зерна определяют через размеры зерна по трем его проекциям [16]:

$$K_{\phi} = \frac{K_{\phi 1} + K_{\phi 2} + K_{\phi 3}}{3},$$

где l , b , h – длина, ширина и толщина зерна соответственно; $K_{\phi 1} = \frac{l}{b}$; $K_{\phi 2} = \frac{l}{h}$; $K_{\phi 3} = \frac{b}{h}$.

Согласно классификации форм абразивных зерен по коэффициенту K_{ϕ} изометрические зерна имеют $K_{\phi} = 1,0...1,4$, промежуточные – $K_{\phi} = 1,4...1,8$, осколочные – $K_{\phi} = 1,8...2,2$, пластинчатые и игольчатые – $K_{\phi} = 2,2...3,0$ [17].

Примеры форм частиц твердого наполнителя приведены на рис. 2. Изометрическую форму с коэффициентом $K_{\phi} = 1,0$ имеют стальные шарики (рис. 2, а). Промежуточную форму имеет зерно карбида (рис. 2, б).

Коэффициент формы зерна дает сравнительное представление о суммарной площади поверхности твердой частицы, а следовательно, и о размере поверхностной энергии. Таким образом, пластинчатая и игольчатая форма абразивных зерен обуславливает формирование вокруг них большие по размеру сольватные слои. Изометрические по форме зерна характеризуются наименьшим размером сольватных слоев.

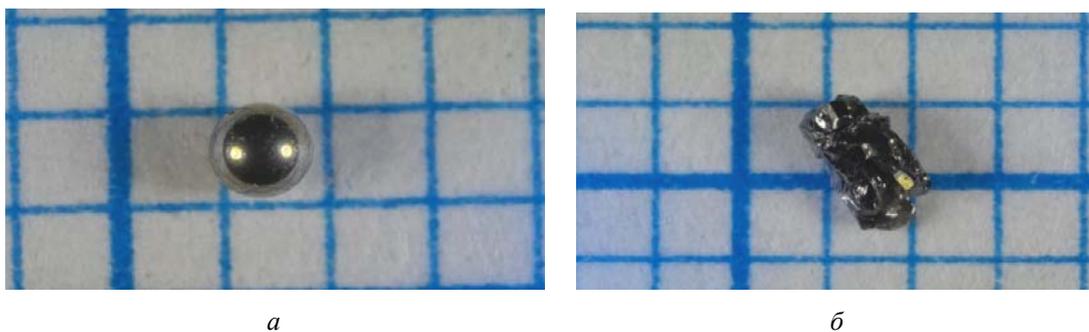


Рис. 2. Фотография твердых частиц на миллиметровой бумаге:
 а – стальной шарик диаметром 1 мм; б – зерно карбида кремния *F16*

Чем выше показатель коэффициента формы зерна, тем больше его граней могут вступать в контакт с обрабатываемой поверхностью одновременно.

В целом, для всех видов форм абразивного зерна, их кромки в начале обработки могут иметь как острые, так и тупые углы. Однако в ходе контактных взаимодействий хрупкие грани с острыми углами скалываются. Пример изменения формы зерна приведен на рис. 3. Такое изменение формы зерна учтено при расчете сил резания [19].

Осколочные, пластинчатые и игольчатые по форме абразивные зерна в *AFM* практически не применяются из-за хрупкости их граней. Сколотые грани зерен остаются в потоке рабочей среды и могут участвовать в контактных взаимодействиях при обработке. При контакте с поверхностями, имеющими относительную низкую твердость (сплавы алюминия), они могут оказывать негативное влияние из-за возможного шаржирования.

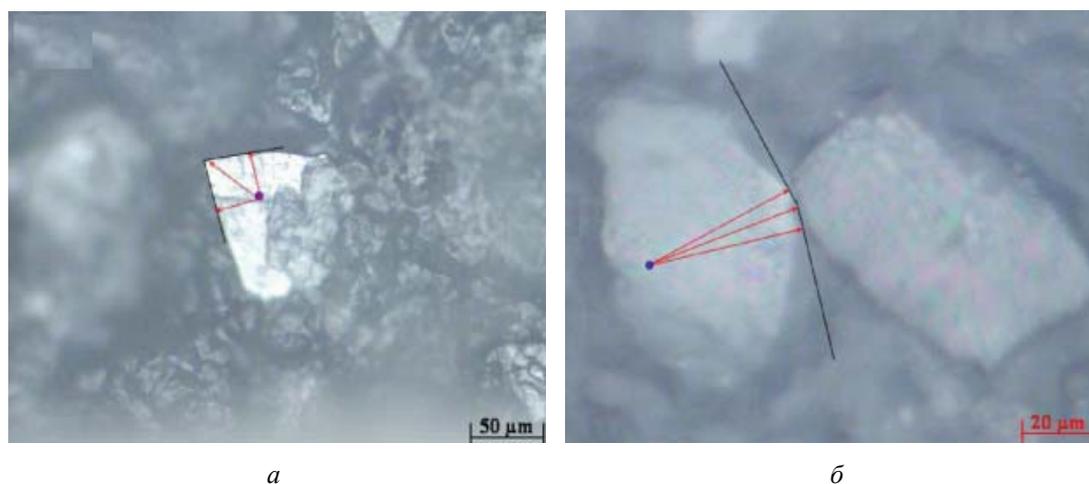


Рис. 3. Фотография притупления кромок абразивных зерен в рабочей среде:
 а – до *AFM*; б – после *AFM* [19]

До приложения давления абразивные зерна в рабочей среде расположены случайным образом. Характер их распределения носит случайный характер и зависит от величины зерен и их процентного (массового) содержания в среде. При приложении определенной величины напряжения сдвига среда начинает течение сдвига. При этом формируется поток с определенной внутренней структурой, характеризующейся возникновением линий тока. В каждой линии тока абразивные зерна выстраиваются в определенной последовательности, образуя силовые цепочки [18].

Диаметр линии тока при *AFM* определяется размером сольватного слоя, окружающего частицу наполнителя. Для приближенных расчетов размер сольватного слоя можно принять равным максимальному по величине показателю из трех характеристик дисперсности зерна – длине, ширине или толщине. Зная массовое содержание наполни-

теля в определенном объеме полимерной основы, можно определить общее количество частиц в рабочей среде и плотность их распределения в матрице. Эти данные применимы для расчета количества линий тока, возникающих в потоке рабочей среды в канале с постоянной формой поперечного сечения, а также длины звена цепочки и количества звеньев цепочек в каждой линии тока.

По методике расчета деформирования упругой цепочки [13] можно определить режимы течения каждой линии тока от стенки канала до центра. Скорости контактирующих границ линий тока можно принять равными, тем самым создав условия для конечно-элементного моделирования потока рабочей среды при обработке абразивным потоком.

Заключение. Рассмотрено влияние формы абразивного зерна на процесс обработки абразивным потоком. Подтверждено предположение о том, что абразивное зерно является многолезвийным инструментом, воздействующим на обрабатываемую поверхность, воздействующим на обрабатываемую поверхность, как по фактической площади контакта (режущими кромками), так и по контурной площади контакта (зерно в целом).

Рабочая среда для обработки абразивным потоком описана как наполненная система (концентрированная суспензия), содержащая твёрдую диспергированную фазу (твёрдые частицы), распределенную в полимерной дисперсионной среде.

На границе раздела фаз в рабочей среде вокруг частиц наполнителя образуется граничный или сольватный слой дисперсионной среды. Он характеризуется плотным и упорядоченным расположением структурных элементов полимерной матрицы. Этот слой мал (тонок) по своим размерам, но определяет диаметр единичной линии тока, по которой в потоке движется сформированная абразивная цепочка.

Чем выше показатель K_f зерна, тем больше его граней могут вступать в контакт с обрабатываемой поверхностью одновременно. Осколочные, пластинчатые и игольчатые по форме абразивные зерна в обработке абразивным потоком практически не применяются из-за хрупкости их граней, а в качестве наполнителя рабочей среды используются частицы с изометрической и промежуточной формой.

Библиографические ссылки

1. Левко В. А., Пшенко Е. Б. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных деталей // Вестник СибГАУ. 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.

2. Gorana V. K., Jain V. K., Lal G. K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 44, Issues 2–3, 2004, Pages 201–211, ISSN 0890-6955, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.10.004>.

3. Gorana V. K., Jain V. K., Lal G. K.. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining, Wear, Volume 260, Issues 1–2, 2006, P. 128–139, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.038>.

4. 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>.

5. Xu, Zhong Ming, and Yong Wu Luo. Study on the Influence of Geometrical Parameters of Abrasive Grains in Abrasive Flow Machining. *Advanced Materials Research*, vol. 135, Trans Tech Publications, Ltd., Oct. 2010, pp. 52–57. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/amr.135.52.

6. Haibo Wei, Can Peng, Hang Gao, Xuanping Wang, Xuyue Wang. On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasive flow machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Volume 138, 2019, P. 66–79, ISSN 0890-6955, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.12.003>.

7. 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 OOCРКІ.

8. Ящук В. М. Течение концентрированной суспензии в длинном трубопроводе // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 1(128). С. 131–133. EDN RVFVZZ.

9. Марков А. В. Течение высоконаполненных термопластов при заполнении полости литейной формы. 1. Впрыск // Пластические массы. 2011. № 7. С. 54–59. EDN OCPLN.

10. 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.

11. Левко В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины // Вестник Чувашия государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2008. № 2(5). С. 85–94. EDN SZDWND.

12. Research on the selective adhesion characteristics of polydimethylsiloxane layer. *AIP Advances* 8, 095004 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5041867>.

13. Гаршин А. П., Гаршин А. П., Федотова С. М. Абразивные материалы и инструменты. Технология производства : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 150400 «Технологические машины и оборудование» ; под общ. ред. А. П. Гаршина ; Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2008. ISBN 978-5-7422-1853-1. EDN QNEQXH.

14. Шумячер В. М., Крюков С. А., Байдакова Н. В. Теория, технология и практика совершенствования абразивных инструментов : учебное пособие. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 212 с. ISBN 978-5-8114-3541-8. Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/206336>.

15. Коротков А. Н. Повышение работоспособности шлифовальных инструментов на основе эффективного использования свойств зерен : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Коротков Александр Николаевич. Москва, 1993. 38 с. EDN ZJPOGZ.

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

17. 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>.

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

УДК 621.396

ТРАНСПОНДЕР В СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

К. С. Алилекова¹, И. В. Назаров²

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ¹ksenijalilekova@mail.ru, ²nazarov12000@mail.ru

В данной статье описан принцип работы транспондера. Приведены рабочие диапазоны транспондера. Рассмотрены меры защиты от повреждений. Приведены параметры для проведения испытаний устройства.

Ключевые слова: транспондер, спутниковая связь, канал связи, спутник, солнечная батарея.

Спутниковая связь играет ключевую роль практически во всех сферах жизни человека и общества в целом. Телевидение, интернет, коммерческие, правительственные и военные коммуникации, телефонная связь, навигация – осуществляются при помощи систем спутниковой связи. Спутниковый канал связи является каналом радиосвязи между передающей и приемной наземными станциями через спутник связи [1]. Осуществление такой связи со стороны спутника производится при помощи устройства, называемого транспондером.

Транспондер – это беспроводное устройство, состоящее из комплекса радиоэлектронных средств, задачами которого являются автоматический прием, модуляция, усиление и передача сигнала, полученного от наземной станции [2]. Транспондер включает в себя следующие основные радиоэлементы:

- усилитель мощности – увеличивает мощность сигнала на частоте преобразования (значение частоты преобразования ниже значения рабочей частоты);
- малошумящий усилитель – усиливает принятый сигнал;
- дуплексер – полосовой двухсторонний фильтр, предназначенный для разделения частот и организации связи с антенной;
- процессор управления – перестраивает сигнал на частоту преобразования [3].

Ранее на весь транспондер приходился только один канал связи – поток спутникового вещания, соединяющий между собой два или более общающихся устройства. Ситуация изменилась после разработки цифровых способов сжатия сигналов. Теперь один транспондер может работать с большим количеством каналов связи одновременно. Количество каналов связи, приходящееся на транспондер, определяется скоростью потока вещания транспондера и измеряется в Кб/с (килобит в секунду), а также степенью сжатия сигнала в транслируемых каналах связи – чем выше степень сжатия, тем больше количество каналов, которое может обработать транспондер. В реальных системах связи слишком большие значения степени сжатия не применяются, так как с увеличением степени сжатия сигнала ухудшается качество передаваемой информации. Поэтому

чаще всего вместо этой процедуры прибегают к увеличению параметров самих передающих устройств.

Транспондеры на спутниках работают в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), то есть в пределах от 3 до 30 ГГц. В частности, используются транспондеры, работающие в L- (1–2 ГГц), C- (2–7 ГГц), X- (7–10.7 ГГц), Ku- (10.7–18 ГГц), Ka-диапазонах (18.3–31.5 ГГц).

Источником питания спутника служит солнечная батарея – преобразователь энергии, полученной от солнечного излучения, в электрический ток. Помимо солнечных панелей, спутники оборудуются батареями системы резервного питания, которые вступают в работу во время солнечного затмения. Так как мощностные характеристики солнечных батарей ограничены, на транспондер тоже накладываются некоторые ограничения по мощности [4]. С увеличением мощности транспондера количество каналов, передаваемых при заданном числе солнечных панелей, уменьшается. Число солнечных панелей на спутнике ограничено не только стоимостью, но и максимальной величиной полезной нагрузки запускаемых летательных аппаратов. Спутник с солнечными панелями проиллюстрирован на рис. 1.



Рис. 1. Спутник с солнечными панелями

Информация, которая ретранслируется транспондером, может быть повреждена, например, из-за воздействия атмосферных явлений. Для минимизации влияния потерь сигнала принимаются определенные меры. Одной из таких мер является ввод служебной информации. Ее вводят в состав сигнала для того, чтобы как можно быстрее восстановить те фрагменты, которые были потеряны во время прерывания качественной передачи сигнала. Другая мера – многоуровневое кодирование. При использовании многоуровневого кодирования потока данных спутникового вещания, информация доставляется в почти неизменном виде за счет избыточности информации и помехоустойчивой кодировки.

Перед непосредственной эксплуатацией, вся спутниковая система связи подвергается тщательной проверке, то есть проводятся испытания над каждым отдельным модулем. Таким образом, необходимо проверить работоспособность каждого элемента (малошумящего усилителя, дуплексера, процессора управления и усилителя мощности). Существует таблица спутниковых транспондеров, согласно которой определяются основные параметры, заданные для корректной работы устройства в целом:

- 1) частота – параметр, определяющий количество колебаний, которые совершаются в единицу времени (стандартно выбранная единица времени – секунда). Используется для определения необходимого вида конвертера. Частота измеряется частотомером, её основные характеристики для заданного типа транспондера приводятся в таблицах значений;

2) символьная скорость – количество информации в спутниковом сигнале. Данный параметр определяет скорость работы транспондера для приведения необходимой информации. Символьная скорость определяется количеством бит в единицу времени;

3) коррекция ошибок – алгоритм, требующийся для восстановления данных, которые были потеряны при возникновении ошибок в работе. Восстановление производится по резервной информации, отправляемой с основными данными с применением метода обратного расчёта. Принцип работы достаточно прост: информация определяется при отправке базовых данных, после чего встраивается и отправляет поток для дальнейшего восстановления. Значения, которые принимаются стандартными для транспондеров – 1/2, 3/4, 5/6 и так далее. Коррекция ошибок необходима для настройки ресивера (радиоприёмника);

4) кодировка – учитывается при наличии у ресивера шифрования сигнала. Ресивер должен поддерживать данную кодировку для последующей расшифровки информации, поступающей от транспондера.

Транспондер – одно из самых необходимых устройств для осуществления спутниковой связи. Выполняемые им функции по сути и обеспечивают осуществление передачи и приёма сообщений между спутниковым аппаратом и наземными станциями. Для проведения испытаний транспондера, необходимо пользоваться заданными таблицами стандартами (можно найти в сети), а также обращаться к требованиям технического задания. Также необходима качественная проверка источника питания для установления достоверности в обеспечении подачи энергии в устройство. Пройдя все испытания, транспондер будет готов к корректной эксплуатации в спутниковой системе связи.

Библиографические ссылки

1. Миноли Д. Инновации в технологиях спутниковой связи. М. : Техносфера, 2019. 446 с.
2. Справочник технического переводчика. Интент. 2009–2013.
3. Бердышев В. П., Гарин Е. Н., Фомин А. Н. Радиолокационные системы. Красноярск : Сибирский государственный университет, 2011. 400 с.
4. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. М. : Техносфера, 2012. 1048 с.

© Алилекова К. С., Назаров И. В., 2023

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕСТИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ЛИДАРОВ

И. Д. Головкин, А. К. Чебыкин

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

В статье представлен обзор современных методов тестирования и диагностики лидаров, которые представляют собой оптические устройства дистанционного зондирования, используемые для широкого спектра применений, включая картографирование, автономные транспортные средства и мониторинг окружающей среды. В тексте обсуждается важность тестирования и характеристики лидаров для обеспечения их производительности и надежности, а также освещаются различные методы тестирования, которые в настоящее время используются в полевых условиях. Эти методы включают лабораторные испытания, полевые испытания и имитационные испытания.

Ключевые слова: лидар, тестирование, диагностика, современные методы, оптическое дистанционное зондирование, картографирование, автономные транспортные средства, мониторинг окружающей среды, производительность, надежность, лабораторные испытания, полевые испытания, имитационные испытания, технологии.

Современные методы тестирования и диагностики лидаров. Лидар (*Light Detection and Ranging*) – это технология дистанционного зондирования, которая использует лазерный луч для измерения расстояний и сбора данных о физических объектах. По мере того как лидары становятся все более распространенными, необходимость разработки и внедрения эффективных методов тестирования и диагностики их работоспособности становится все более важной. В этой статье мы обсудим некоторые современные методы, которые используются для тестирования и диагностики лидаров.

Проверка выравнивания лазерного луча. Одним из ключевых этапов тестирования лидаров является обеспечение того, чтобы лазерный луч был правильно выровнен и излучал лазерный свет нужной интенсивности. Этот процесс известен как тестирование выравнивания лазерного луча, и он имеет решающее значение для проверки точности лидарных данных. Во время этого процесса инженеры измеряют положение и форму лазерного луча и корректируют его по мере необходимости, чтобы обеспечить правильное согласование с оптикой системы. Интенсивность лазерного луча также можно измерить и отрегулировать, чтобы убедиться, что он излучает нужное количество света. Этот тип тестирования необходим для обеспечения того, чтобы лидарная система выдавала точные данные [1].

Производительность в сложных погодных условиях. Другим важным аспектом тестирования и диагностики лидаров является оценка их производительности в сложных погодных условиях, таких как сильный дождь, снег или туман. Поскольку эти условия могут оказать значительное влияние на точность и надежность лидарных данных, важно протестировать систему в этих условиях, чтобы убедиться, что она функционирует должным образом. Согласно исследованию, проведенному российскими исследователями [2], было обнаружено, что производительность лидара в условиях сильного дождя и снега может быть улучшена за счет использования специализированных опти-

ческих фильтров и методов формирования луча. Эти методы помогают свести к минимуму влияние атмосферных условий на лазерный луч и повысить точность лидарных данных.

Принимая во внимание погодные условия и внедряя эти методы, инженеры могут гарантировать, что лидарная система выдает точные результаты при любых типах погоды.

Проверка точности диапазона Другим важным аспектом тестирования лидаров является проверка того, что они точно измеряют расстояния и собирают данные о физических объектах. Это может быть достигнуто с помощью процесса, называемого тестированием точности дальности. В этом процессе лидарная система наводится на известную цель, такую как отражающая сфера или набор измерительных точек, и измеряются расстояния до этих целей. Затем результаты сравниваются с известными расстояниями, чтобы убедиться, что система точно измеряет расстояния [3].

Диагностика проблем с производительностью лидара. В дополнение к тестированию, диагностика проблем с производительностью лидара также является важным аспектом обеспечения надлежащего функционирования системы. Если лидарная система выдает неверные данные, это может быть связано с проблемой лазера, оптики или датчика. В таких случаях инженеры могут использовать диагностические инструменты, чтобы определить первопричину проблемы и произвести любой необходимый ремонт. Некоторые распространенные диагностические инструменты включают осциллографы, анализаторы формы сигнала и спектральные анализаторы [4].

В дополнение к этим методам существует также несколько передовых методов, которые были разработаны для тестирования и диагностики лидарных систем. Один из этих методов известен как профилирование оптического луча, которое включает в себя анализ формы лазерного луча, испускаемого лидаром. Профилирование оптического луча может быть использовано для выявления любых потенциальных проблем с лазером, таких как искажение луча, а также может быть использовано для оптимизации производительности лидара. Этот метод может быть особенно полезен для обеспечения высокого качества лазерного луча, испускаемого лидарной системой, и оптимального функционирования системы.

Другой продвинутый метод известен как лазерный частотный анализ, который включает в себя анализ частоты лазера, излучаемого лидаром. Этот метод может быть использован для определения стабильности лазера и выявления любых потенциальных проблем, которые могут повлиять на производительность лидара. Например, если частота лазера нестабильна, это может привести к тому, что лидарная система не сможет точно обнаруживать объекты, что может оказать значительное влияние на производительность системы.

Лидары играют решающую роль во многих современных приложениях, и очень важно убедиться, что они функционируют должным образом. Тестирование и диагностика лидаров – это сложный процесс, требующий специализированного оборудования и опыта.

Однако, используя современные методы и инструменты, инженеры могут гарантировать, что лидарные системы работают с максимальной производительностью и выдают точные результаты.

В заключение отметим, что современные методы тестирования и диагностики лидаров, включая тестирование выравнивания лазерного луча, тестирование точности дальности и использование диагностических инструментов, а также внедрение методов для повышения производительности в сложных погодных условиях, имеют решающее значение для обеспечения производительности и точности этих систем.

Библиографические ссылки

1. Gunasekaran, S., & Das, D. Lidar Technology and its Applications. Springer, Cham. 2017, 45 p.
2. Kozlov, V., Ivanov, V., Petrov, A., & Sergeev, D. Improved Lidar Performance in Challenging Weather Conditions. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36 p.
3. Lippens, C. Lidar Range Accuracy and Resolution. SPIE Press, Bellingham, WA. 2015, 16 p.
4. Wang, Y., & Lu, W. (2017). Lidar Testing and Characterization. SPIE Press, Bellingham, WA. 2017, 18 p.

© Головки И. Д., Чебыкин А. К., 2023

ИСПЫТАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

К. С. Алилекова

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

В данной статье рассматривается работа беспилотного летательного аппарата. Описывается осуществление автоматического управления посредством применения инерциальной навигационной системы. Приводятся этапы испытаний беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), беспилотная инерциальная навигационная система (БИНС), техническое задание (ТЗ), наземные испытания, летные испытания.

В настоящее время интенсивно возрастает потребность в эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Одним из важнейших преимуществ БПЛА, обуславливающих данный фактор, является автономное управление устройством, без присутствия человека на борту. В зависимости от назначения, БПЛА выполняют различные функции, которые нашли применение во многих сферах жизни человека: разведка, навигация, радиолокация, агрономия, связь, горное дело и т.д. Наиболее актуальное применение такого аппарата – в труднодоступных районах, в которых получение требуемой информации иными средствами не представляется возможным или имеются риски нанесения вреда человеку.

Очевидно, БПЛА обладает полноценной системой автоматического управления (САУ), в чем и состоит его существенное отличие от дистанционно управляемой модели. Следовательно, необходимо автономно работающее навигационное устройство, выполняющее функцию измерения параметров аппарата. Чаще всего, таким устройством является беспилотная инерциальная навигационная система (БИНС). БИНС дают полную информацию о навигационных параметрах движения – углах курса, тангажа (дифферента), крена, ускорения, скорости движения и координатах объекта [1]. Практически это осуществляется инерциальными датчиками (микромеханическими гироскопами и акселерометрами), барометрическим высотомером и магнитометром. Данные с этих устройств и данные с приемника спутниковой станции (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и др.) в совокупности вырабатывают полное навигационное решение по координатам и углам ориентации [2]. При проектировании БПЛА на основе БИНС необходимо руководствоваться следующими параметрами [3]:

- широкий диапазон гироскопических измерений;
- невысокая чувствительность акселерометра;
- возможность интеграции с другими устройствами (радары, приемниками и т.д.);
- частота дискретизации при оцифровке (должна быть не менее 1 кГц);
- элементная база комплектации прибора.

Для корректной работы и решения вопроса целесообразности эксплуатации БПЛА, как и многих других сложных оборудований и систем, необходимо проведение испытаний на разных стадиях их разработки. Таким образом, с момента создания беспилотного ЛА до его внедрения в массовое производство он проходит ряд испытаний [4]:

1. Заводские (предварительные) испытания опытного образца – предварительное определение характеристик ЛА, отработка и проверка систем бортового оборудования, предварительная оценка надежности, разработка инструкций и регламента работы с аппаратом, определение готовности передачи на следующий этап испытаний.

2. Государственные испытания опытного образца – проверка соответствий государственным стандартам и техническому заданию (ТЗ), готовности к серийному производству, разработка инструкций к применению.

3. Контрольные серийные испытания первого серийного образца опытной серии – определение соответствий требованиям и документации, оценка надежности, оценка возможности эксплуатации, определение достаточности средств наземного обслуживания.

4. Эксплуатационные испытания опытной серии ЛА – оценка эффективности и экономичности, разработка методики освоения, определение требуемых расходов (горючее, запасные части и т.д.), оценка трудозатрат.

5. Контрольно-серийные испытания лидерных образцов в серии – испытания, проводящиеся в случае доработки (модернизации) – проверка изменений, прогноз технического состояния серии.

6. Специальные испытания – определение отдельных характеристик образца, решение вопросов, которые могли возникнуть в процессе проведения более ранних стадий испытания.

Беспилотный летательный аппарат проходит две основные стадии испытаний: наземные и летные.

Наземные испытания проводятся инженерами на специализированных стендах. Используются оборудование, предназначенные для измерения и оценки необходимых параметров. К основным задачам при проведении наземных испытаний относятся определение характеристик системы управления, проверка работоспособности отдельных элементов ЛА, определение запаздывания приемника, проверка соответствия всех характеристик требуемым условиям, качественная оценка габаритов и условий балансировки. На данном этапе производятся все теоретические исследования и расчеты, корректируются значения и параметры, осуществляется разработка математической модели, позволяющей произвести обучение без практического применения (задание параметров и проверка соответствий требованиям).

Летные испытания характеризуются выполнением следующих функций:

1. Определение максимальных технических характеристик БПЛА – вертикальной и горизонтальной скоростей, продолжительности полета, дальности действия радиоканала, статического потолка.

2. Определение взлетно-посадочных характеристик – длины и времени разбега и пробега, скорость взлета и посадки, длина посадочной дистанции, угол наклона траектории во время взлета и приземления.

3. Определение характеристик устойчивости и управляемости – времени сохранения полностью автономного режима, устойчивости параметров, отклонений от исходного режима балансировки.

4. Определение характеристик силовой установки – проверка работоспособности двигателей, движителей, топливной системы, входных и выходных устройств.

5. Проверка характеристик прочности – установка максимальной посадочной массы, максимально допустимые перегрузки и скорости, не приводящих к нарушениям и сбоям во время эксплуатации.

6. Определение характеристик критических режимов полета – определение характеристик при полетах на больших углах атаки, сваливание (резкое падение подъемной силы) и штопор (резкое снижение высоты) [5].

7. Проверка характеристик бортового навигационного, радиоэлектронного и специального оборудования – определение характеристик, исходя из требований технического задания.

8. Оценка характеристик безопасности при имитации различных аварийных ситуаций и отказов.

9. Установление эксплуатационных ограничений – анализ испытаний и корректировка.

Беспилотный летательный аппарат – это сложное устройство, в связи с чем его испытания связаны с наибольшим количеством требований к его испытаниям. Так как данное устройство востребовано в основном для государственных нужд, испытания проводятся по самым высоким стандартам. Аппарат, не прошедший испытание хотя бы по одному из требований, полностью исследуется на предмет несоответствий и проводятся исследования на тему того, как исправить данные ошибки и усовершенствовать аппарат для применения в предназначенных задачах.

Библиографические ссылки

1. Titterton D., Weston J. Strapdown inertial navigation technology. 2nd edition. The Institution of Engineering and Technology, 2011. 576 p.

2. Системы автоматического управления БПЛА / А. А. Лоскутников, Н. С. Сенюшкин, В. В. Парамонов // Молодой ученый. 2011. № 9 (32). С. 56–58.

3. Автономная навигация беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lasercomponents.ru/blog/avtonomnaya-navigacziya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov/> (дата обращения: 27.01.2023).

4. Василенко О. М., Иванов А. Г., Максимова М. В. Испытания беспилотных авиационных комплексов // Инженер-механик. 2012. № 1. С. 14–22.

5. Котик М. Г. Динамика штопора самолета. М. : Машиностроение. 1976. 328 с.

© Алилекова К. С., 2023

ОБЩИЙ АЛГОРИТМ РАБОТЫ СТЕНДА ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ

А. Д. Широков, Д. А. Феоктистов, Т. Г. Орешенко

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

В данной статье будет рассмотрен принцип работы системы, её алгоритм работы, а также программная составляющая в целом, связывающую аппаратную часть с программируемым блоком стенда.

Ключевые слова: стенд испытаний, космические аппараты, двигательные установки, двигатели малой тяги, алгоритм стенда испытаний.

У каждой реализуемой системы имеется определённый алгоритм работы, позволяющий действовать в различных ситуациях по-разному: выход на номинальную работу, диагностика системы, периодическая отправка и приём данных с агрегатов установки, выполнение функций защиты подчинённых систем в случае отказа одной из них, и многие другие.

В нашем стенде огневых испытаний реализуется несколько подсистем: система поджига, система релейного переключения, экран вывода информации, датчики считывания контролируемых параметров, а также блок автоматического управления и контроля входных параметров [1].

Речь пойдёт о блоке автоматического управления и контроля входных параметров, реализованном на Arduino MEGA 2560. В нём происходит приём данных с экрана (начальная инициализация и команда о поджиге системы), а также отправка данных на экран об выдаваемых параметрах с датчиков. Помимо этого, в данном блоке проводятся все основные функции расчёта и управление аппаратной частью всей системы стенда.

Рассмотрим основные функции системы. Ниже представлена функция инициализации системы, включающая в себя проверку газопроводов на отсутствие компонентов окислителя и горючего. Если в них присутствует компонент, то происходит завершение работы стенда и требуется перезапуск системы. В случае исправности, открывается 4-е реле, отвечающее за питание всей системы и связанное с остальными тремя реле.

```
void Initialization(boolean flag)
{
    int Situation = 1;
    int Situation_caution = 0;
    Status(Situation,Situation_caution);
    if(digitalRead(Manometr_PIN_1) == 0){
        if(digitalRead(Pacxod_PIN_1) == 0){
            Situation = 10;
            Status(Situation,Situation_caution);
        }
    }
    else{
        Situation = 6;
```

```

    Situation_caution = 2;
    Status(Situation, Situation_caution);
    //return
}
} else{
    Situation = 6;
    Situation_caution = 1;
    Status(Situation, Situation_caution);
    //return
}

if(digitalRead(Manometr_PIN_2) == 0){
    if(digitalRead(Pacxod_PIN_2) == 0){
        Situation = 11;
        Status(Situation,Situation_caution);
    }
    else{
        Situation = 6;
        Situation_caution = 4;
        Status(Situation, Situation_caution);
        //return
    }
} else{
    Situation = 6;
    Situation_caution = 3;
    Status(Situation, Situation_caution);
    //return
}
}
Situation = 2;
Status(Situation,Situation_caution);
digitalWrite(relays_PIN_begin+3, LOW); // 4-е реле
flag = false;
}

```

Следующая функция OpenSources отвечает за последовательное открытие каналов газопроводов и их проверка на открытость путём измерения изменений показаний манометров и расходомеров каждого из соответствующих каналов. В случае если отсутствует давление в системе, клапаны закрываются путём закрытия всех реле и прекращается работа системы. При исправном состоянии открывается 1-е реле с окислителем, и с некоторой незначительной задержкой происходит замыкание 2-го реле с горючим, тем самым позволяя в газовой камере произвести смешивание компонентов топлива [2].

```

void OpenSources(){
    int Situation = 14;
    int Situation_caution = 0;
    Status(Situation,Situation_caution); //Сообщение об начале открытия каналов
    digitalWrite(relays_PIN_begin, LOW); // 1-е реле
    OpenSource_1 = true;
    delay(0.025); //Ожидание увеличение давления на 1-м газопроводе
    if(digitalRead(Manometr_PIN_1) > 1){ //Проверка манометра и расходомера 1-го
канала

```

```

if(digitalRead(Рacход_PIN_1) > 1){
    Situation = 12;
    Situation_caution = 0;
    Status(Situation,Situation_caution);
}
else{
    Situation = 12;
    Situation_caution = 1;
    Status(Situation,Situation_caution);
    //return
}
} else{
    Situation = 12;
    Situation_caution = 1;
    Status(Situation,Situation_caution);
    //return
}
}
delay(0.025); //Время ожидания открытия между 1-м и 2-м каналами (в мс)
digitalWrite(relays_PIN_begin+1, LOW); // 2-е реле
OpenSource_2 = true;
if(digitalRead(Манометр_PIN_2) > 1){ //Проверка манометра и расходомера 2-го
канала
    if(digitalRead(Рacход_PIN_2) > 1){
        Situation = 13;
        Situation_caution = 0;
        Status(Situation,Situation_caution);
    }
    else{
        Situation = 13;
        Situation_caution = 1;
        Status(Situation,Situation_caution);
        //return
    }
} else{
    Situation = 13;
    Situation_caution = 1;
    Status(Situation,Situation_caution);
    //return
}
}
Situation = 15;
Situation_caution = 0;
Status(Situation,Situation_caution); //Сообщение об завершении открытия каналов
}

```

Далее, сразу после завершения функции открытия газопроводов, происходит поджигание смеси. Подаётся сообщение о запуске системы поджигания, включается 3-е реле поджига, остаётся включенным около 100 мс, а затем проводится считывание температуры с датчика сигнала, и если этот параметр больше определённой температуры, то поджиг состоялся. В случае неудачи [3], происходит отключение системы путём выключения всех реле с выводом сообщения об аварийном отключении стенда.

```

void Ignition(bool Burn){
  int Situation = 3;
  int Situation_caution = 0;
  Status(Situation,Situation_caution); //Сообщение о запуске системы поджигания
  delay(0.020); //Ожидание запуска зажигания
  digitalWrite(relays_PIN_begin+2, LOW); // 3-е реле
  delay(100); // Ожидание зажигания системы (в мс)
  //Считывание сигнала с датчика температуры
  if (//Проверка датчика температуры на поджиг системы ){
    Burn = true;
    digitalWrite(relays_PIN_begin+2, HIGH); // 3-е реле
    Situation = 4;
    Situation_caution = 0;
    Status(Situation,Situation_caution); //Сообщение о завершении поджигания
    flag_Work = true;
  } else{
    digitalWrite(relays_PIN_begin+2, HIGH); // 3-е реле
    digitalWrite(relays_PIN_begin+3, HIGH); // 4-е реле
    Situation = 6;
    Situation_caution = 5;
    Status(Situation,Situation_caution); //Сообщение о несостоявшемся поджиге
  }
}
}

```

После поджига, система выходит на номинальную работу с первичным выводом сообщения об этом, а затем проводится периодическая проверка датчиков, на случай отказа которых происходит выключение системы. При нормальной работе, значения с датчиков отправляются на экран оператора.

```

void Work(){
  if(flag_Working == false){
    int Situation = 5;
    int Situation_caution = 0;
    Status(Situation,Situation_caution); //Сообщение об выходе на нормальную работу
стенда
    flag_Working = true;
  }

  CheckSystem();
  SendSerial();
}

```

Общий принцип работы бесконечного цикла программы представлен следующим образом:

```

void loop() {
  ReadSerial();
  if (flag_Initialization == true) {Initialization(flag_Initialization);} //Инициализация
  if ((flag_Ignition == true) && (flag_Burn = false)) {
    OpenSources(); //Открытие газопроводов
  }
}

```

```
Ignition(flag_Burn); //Зажигание компонентов стенда
}
if (flag_Work == true){ Work(); }
```

В нашем случае используются флаги переключения, говорящие системе о том, что данная часть кода отработана и в повторном использовании не нуждается. В этом цикле сначала происходит считывание входных данных с экрана о нажатии кнопок с определёнными адресами, которые отвечают за различные команды работы Arduino MEGA 2560. Затем, в случае получения команды инициализации, она проводится с переходом в блок поджига, при поступлении команды с экрана производится зажигание системы с предварительным открытием каналов газопроводов. И, в последнюю очередь, начинается работа системы без возможности повторного использования инициализации и поджига, но с постоянным приёмом данных с экрана.

Библиографические ссылки

1. Конструкция и отработка РДТТ / А. М. Виницкий, В. Т. Волков, И. Г. Волковицкий и др. М.: Машиностроение, 1980.
2. 2004. Особенности испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги / В. П. Назаров, В. Ю. Пиунов, В. Г. Яцуненко, Д. А. Савчин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 339–354. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-339-354.
3. Лисейкин В. А., Тожокин И. А. Особенности управления и аварийной защиты изделия при огневых испытаниях стендового блока первой ступени РН «Союз-2-1В» // Вестник СГАУ. 2013. № 4 (42). С. 181–195.
4. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тигиин А. П. Теория ракетных двигателей / под ред. В. П. Глушко. М. : Машиностроение, 1989.
5. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе / Л. Н. Лавров, А. А. Болотов, В. И. Гапаненко и др. М. : Машиностроение, 1993.
6. Струйная автоматика в системах управления : сб. статей / под ред. Б. В. Орлова. М. : Машиностроение, 1974.
7. Калугин В. Т. Аэрогазодинамика органов управления полетом летательных аппаратов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана.

© Широков А. Д., Феоктистов Д. А., Орешенко Т. Г., 2023

ИНТЕГРАЦИЯ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ В СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРОМ

И. Д. Головки

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

В данной статье обсуждается интеграция машинного зрения в системы управления квадрокоптерами. Освещаются преимущества этой интеграции, такие как улучшенный автономный полет, расширенные задачи и эффективная эксплуатация, а также ее потенциальные применения в различных областях, включая развлечения, рекреацию, промышленность и коммерцию. В статье также затрагиваются проблемы, которые необходимо преодолеть, и будущее этой технологии. Статья подкреплена четырьмя литературными источниками.

Ключевые слова: система управления квадрокоптером, машинное зрение, автономный полет, оптический поток, инспекция и картографирование, съемка, камера, квадрокоптер.

Квадрокоптеры – это захватывающая новая технология, которая быстро набирает популярность в последние годы. Эти беспилотные летательные аппараты (БПЛА) состоят из четырех несущих винтов и центрального корпуса, что позволяет им летать во всех направлениях с большой стабильностью и маневренностью. Одним из наиболее важных компонентов квадрокоптера является его система управления, которая определяет его положение, ориентацию и траекторию в режиме реального времени и соответствующим образом регулирует его пропеллеры. В этой статье мы рассмотрим недавнюю инновацию по интеграции машинного зрения в системы управления квадрокоптерами и обсудим преимущества и проблемы этой технологии.

Использование машинного зрения в системах управления квадрокоптерами дает ряд преимуществ по сравнению с традиционными системами управления. Во-первых, это позволяет квадрокоптерам летать автономно, не полагаясь на сигналы *GPS* или другие внешние источники информации. Это особенно полезно для полетов в закрытых помещениях, где сигналы *GPS* могут быть слабыми или недоступными. Благодаря машинному зрению квадрокоптеры могут обнаруживать препятствия и избегать их, отслеживать цели и ориентироваться в сложных условиях, таких как загроможденные помещения или узкие проходы. Это было продемонстрировано в исследовании *Kim* в 2015 году, где они показали, что квадрокоптер, оснащенный монокулярной камерой и алгоритмом оптического потока, способен летать автономно и точно в помещении [1].

Во-вторых, машинное зрение позволяет квадрокоптерам выполнять более сложные задачи, такие как аэрофотосъемка, картографирование и инспекция. Например, квадрокоптеры, оснащенные камерами и алгоритмами машинного зрения, могут захватывать изображения структур и ландшафтов с высоким разрешением, создавая 3D-модели, которые можно использовать для анализа и проектирования. Аналогичным образом, квадрокоптеры могут осматривать инфраструктуру, такую как мосты и здания, в поисках признаков повреждения или износа. Это может быть более безопасной и эффективной альтернативой традиционным методам контроля, для которых часто требуются

строительные леса или другое оборудование для доступа. Это обсуждалось в обзоре *Zhang* в 2018 году, которые проанализировали текущее состояние техники в области контроля и картографирования с помощью квадрокоптеров и определили несколько перспективных применений и проблем [2].

В-третьих, машинное зрение позволяет квадрокоптерам выполнять задачи более эффективно и точно. Анализируя изображения и видео в режиме реального времени, квадрокоптеры могут принимать более обоснованные решения об окружающей среде и соответствующим образом корректировать траекторию полета. Это приводит к более быстрым, плавным и безопасным полетам, что может быть особенно важно для промышленного и коммерческого применения. Например, при проведении поисково-спасательных операций квадрокоптеры, оснащенные системой машинного зрения, могут быстро обследовать большую территорию в поисках признаков выживших или другой важной информации. Это было продемонстрировано в исследовании *Li* в 2019 году, которые разработали систему управления квадрокоптером с машинным зрением и протестировали ее в реальном сценарии поиска и спасения, показав, что она способна обнаруживать и отслеживать цель-человека в режиме реального времени [3].

Однако внедрение машинного зрения в системы управления квадрокоптерами не лишено своих проблем. Одной из самых больших проблем является обеспечение стабильности и точности алгоритмов, используемых для обработки изображений и оценки положения и ориентации квадрокоптера. Эти алгоритмы должны быть способны работать со сложными и динамичными средами, а также с шумом и другими источниками ошибок. Другой проблемой является аппаратное обеспечение, необходимое для реализации машинного зрения, такое как камеры, процессоры обработки изображений и микроконтроллеры. Эти компоненты должны быть компактными, легкими и энергоэффективными, обеспечивая при этом необходимую производительность и надежность. Эти проблемы обсуждались в исследовании *Wang* в 2017 году, которые проанализировали текущее состояние систем управления квадрокоптерами с использованием машинного зрения и определили несколько технических проблем и направлений для будущих исследований [4].

Для достижения этой интеграции были разработаны различные методы диагностики для обеспечения оптимальной работы системы машинного зрения.

Алгоритмы анализа изображений: Первым шагом в интеграции машинного зрения в систему управления квадрокоптером является разработка алгоритмов анализа изображений, которые могут обнаруживать и отслеживать объекты в режиме реального времени. Эти алгоритмы предназначены для анализа изображений, снятых камерой квадрокоптера, и предоставления точной информации об окружающей среде. Алгоритмы анализа изображений могут обнаруживать препятствия, вычислять расстояние до объектов и даже оценивать их скорость.

Слияние датчиков: ещё одним методом диагностики, используемым при интеграции машинного зрения в систему управления квадрокоптером, является слияние датчиков. Слияние датчиков подразумевает объединение данных с различных датчиков для повышения точности системы. Например, данные машинного зрения могут быть объединены с данными других датчиков, таких как акселерометры, гироскопы и GPS, чтобы получить более точную картину положения и ориентации квадрокоптера.

Тестирование производительности – это важный метод диагностики, используемый для обеспечения оптимальной работы системы машинного зрения. Это тестирование включает в себя анализ производительности системы в различных условиях, таких как различные условия освещения, расстояния и размеры объектов. Тестирование производительности помогает выявить любые слабые места в системе и дает возможность оптимизировать систему для повышения производительности.

Диагностика неисправностей – это метод диагностики, используемый для выявления и изоляции неисправностей в системе машинного зрения. Он включает в себя анализ выходных данных системы и выявление любых аномалий или ошибок. Диагностика неисправностей может помочь выявить такие проблемы, как шум изображения, неисправности датчиков или ошибки обработки.

Калибровка системы – это важный метод диагностики, используемый при интеграции машинного зрения в систему управления квадрокоптером. Калибровка включает в себя настройку параметров системы машинного зрения для обеспечения ее точной работы. Это включает в себя регулировку фокуса объектива камеры, установку правильной экспозиции и калибровку датчиков для обеспечения точности предоставляемых ими данных.

Методы диагностики, приведенные выше играют важную роль в обеспечении оптимальной работы системы машинного зрения. Используя эти методы, можно обнаружить неисправности, откалибровать систему и оптимизировать ее работу для достижения максимальной точности и надежности.

В заключение, интеграция машинного зрения в системы управления квадрокоптерами представляет собой важный шаг вперед в разработке беспилотных летательных аппаратов. Благодаря своей способности летать автономно, выполнять сложные задачи и эффективно работать, машинное зрение обладает потенциалом изменить то, как мы используем квадрокоптеры в широком спектре применений. Несмотря на то, что предстоит преодолеть еще много проблем, будущее этой технологии выглядит очень многообещающим, и мы можем ожидать дальнейшего роста и инноваций в этой области в ближайшие годы.

Библиографические ссылки

1. Kim J., Kim K., & Kim K. Autonomous indoor flight of a monocular camera-equipped quadcopter using optical flow. *Journal of Field Robotics*, 2015, 32 p.
2. Zhang X., Zhang J., & Chen G. A review of quadcopter-based inspection and mapping: Current status and future directions. *Sensors*, 2018, 18 p.
3. Li Y., Guo J., & Liu J. Human target detection and tracking for a search and rescue quadcopter control system with machine vision. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 96 p.
4. Wang Y., He J., & Du J. A survey of quadcopter control systems with machine vision. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 86 p.

© Головки И. Д., 2023

УДК 621.454

**ОСОБЕННОСТИ ЦИКЛОГРАММЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ
РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ-ДЕМОНСТРАТОРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО
МЕТОДАМИ 3D-ПЕЧАТИ**

М. А. Шикарев, В. Ю. Журавлев

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

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: 89134467140@bk.ru

Разработка циклограммы испытаний ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) является важной частью процесса планирования испытаний. Циклограмма испытаний РДМТ определяет количество испытываемых изделий, длительность и критерий прекращения испытаний, число ступеней контроля и т. п. Конечный вид циклограммы испытаний зависит от уникальных характеристик испытываемого РДМТ: топливная пара, расходы компонентов, время работы двигателя и др. Также циклограмма испытаний разрабатывается с учётом конструктивных особенностей испытательного стенда и применяемого оборудования.

Ключевые слова: ракетный двигатель малой тяги, циклограмма испытаний, стендовые испытания.

Ракетные двигатели малой тяги (РДМТ) выступают в роли исполнительных органов в системе управления космических летательных аппаратов. Они служат для ориентации, стабилизации, коррекции летательных аппаратов (ЛА) в пространстве. С помощью таких двигателей осуществляются операции торможения, стыковки, посадки, причаливания ЛА.

Особые условия эксплуатации РДМТ определяют ряд специфических требований применяемых к ним:

- многорежимность;
- большой ресурс по суммарному времени работы;
- большой ресурс по суммарному количеству включений;
- высокая надёжность при эксплуатации, обуславливаемая большой продолжительностью нахождения космических аппаратов (КА) на орбите.

Главная отличительная особенность РДМТ – способность работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

Непрерывным режимом работы РДМТ считается режим однократного включения двигателя такой продолжительности, начиная с которой удельный импульс тяги не зависит от времени включения двигателя. Для большинства созданных и эксплуатируемых двухкомпонентных РДМТ минимальная длительность включения, с которой начинается непрерывный режим, находится в пределах от 0,5 до 1,0 с. Максимальная продолжительность непрерывного режима работы может составлять десятки минут.

Импульсным режимом работы является режим многократных кратковременных включений РДМТ, при котором удельный импульс тяги имеет прямую зависимость от времени включения, порядкового импульса в серии и частоты включений. У большего количества существующих двухкомпонентных РДМТ время включения при импульсном режиме работы составляет от 0,03 до 1,00 с.

Рассматриваемый в данной работе ракетный двигатель-демонстратор работает на газообразных компонентах топлива – природный газ (CH_4) и кислород (O_2). Согласно ГОСТ 22396–77 его можно отнести к ракетным двигателям малой тяги РДМТ, так как его тяга составляет всего 0,2 кН.

В работах [1; 2] представлен процесс проектирования и изготовления ракетного двигателя-демонстратора методом SLM-печати. SLM-технология относится к современным технологиям аддитивного лазерного сплавления металлического порошкового материала на 3D-принтере. Процессам проектирования и изготовления двигателя сопутствовали контрольно-испытательные работы: испытания материала на растяжение, определение твёрдости материала, металлографический анализ камеры двигателя, рентгенографический контроль, виброиспытания. Результаты описанных испытаний приведены в работах [3–5].

Следующими этапами контрольно-испытательных работ станут испытания камеры двигателя-демонстратора на прочность и герметичность, пролив смесительной головки. Последним этапом контрольно-испытательных работ является проведения стендовых огневых испытаний двигателя.

Огневые стендовые испытания двигателя-демонстратора планируется проводить как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

Проведение испытаний РДМТ позволяет:

- на стадии исследования и проектирования: оценить степень совершенства новых проектных решений, выявить ошибки, допущенные при проектировании и изготовлении опытных образцов, уточнить значения разных эксплуатационных характеристик и оценить уровень показателей качества изделия, выявить наиболее технически совершенные варианты конструкций разрабатываемого изделия;

- на стадии изготовления РДМТ: оценить технический уровень изготовленного двигателя, эффективность технологического процесса серийного производства изделий, контролировать показатели надёжности.

Достоверное заключение о надёжности произведённых двигателей можно сделать только на основе испытаний их опытных образцов в условиях максимально приближенных к реальным условиям работы.

Стендовые испытания РДМТ – многофакторный эксперимент. В процессе испытаний варьируется определённое количество факторов в заранее известных диапазонах. Однофакторные испытания применительно к РДМТ практически не применяются, так как их недостаточно из-за несоответствия условиям нормальной эксплуатации двигателя.

Количество испытаний РДМТ в натуральных условиях эксплуатации в большинстве случаев исключено в связи с их высокой стоимостью, поэтому испытания проводятся с имитацией условий натуральных испытаний и учётом влияния всех эксплуатационных факторов, воздействующих на достоверность оценки показателей надёжности при конструкторской отработке в наземных условиях.

К основным параметрам РДМТ, подлежащим измерению и регистрации при огневых испытаниях, относятся: тяга, создаваемая двигателем, расходы компонентов топлива, давления газов в камере сгорания (КС), температуры компонентов топлива, стенок камеры двигателя; время работы двигателя.

Целью планирования испытаний является определение состава значимых факторов, их возможных сочетаний и влияние на выходное качество исследуемого процесса.

План испытаний – один из главных организационно-технических документов, который определяет число испытываемых изделий, продолжительность испытаний, критерии прекращения испытаний, проводимые мероприятия по контролю испытаний, порядок действий с отказавшими в процессе испытаний изделиями (замена, восстановление).

Согласно ГОСТ 22396–77 циклограмма испытаний это – графическое изображение программы испытаний РДМТ.

Циклограмма представляет собой график, по оси абсцисс которого откладывают интервалы времени выполнения определённых операций процесса запуска, работы или останова двигателя, а по оси ординат – изменение давления газа в КС или тягу двигателя. Время, затрачиваемое на выполнение какой-либо операции, складывается из длительности срабатывания агрегата автоматики, обеспечивающего выполнение операции, и времени заполнения следующей за агрегатом автоматики полости. Время заполнения следующей за агрегатом автоматики полости определяется по скорости течения газа. В определённых случаях для контроля протекания или завершения операции в конструкцию испытательного стенда вводятся сигнализаторы различных параметров рабочего процесса (давления, температуры, воспламенения топлива, наличия жидкости и др.) [6].

Основными элементами пневмогидравлической схемы стенда огневых испытаний двигателя-демонстратора являются: изделие – камера двигателя, баллоны со сжатыми газообразными компонентами топлива, электроклапаны (ЭК) и обратные клапаны (ОК), устанавливаемые на магистралях подачи, газовые редукторы (ГР), устанавливаемые перед ЭК, система гибких резиновых шлангов от баллонов до смесительной головки камеры двигателя (магистральной подачи), система электрозажигания, крепёжная арматура и защитные конструкции, информационно-измерительная и управляющая система (ИИиУС). При значительной длине магистралей для выравнивания давления по их длине в конструкцию стенда могут включаться ресиверы, используемые в качестве накопителя для хранения сжатого газа под давлением.

Безопасность испытаний обеспечивается конструкцией испытательного комплекса и систем стенда. Конструкция испытательного комплекса не предусматривает наличие замкнутых пространств, вентиляция обеспечивается естественным образом. Баллоны с компонентами топлива хранятся в специальных металлических ящиках, и сами по себе они отделены друг от друга бетонной стеной, что препятствует образованию горючей смеси при утечках.

В целях безопасности после испытаний проводится продувка магистралей для удаления остатков компонентов топлива из полостей элементов стенда.

Измерительная и управляющая системы (ИиУС) стенда огневых испытаний РДМТ должна обеспечивать необходимую и достаточную точность и надёжность средств измерений, безопасность испытаний, заданный алгоритм измерений, максимально возможную автоматизацию управления элементами стенда, возможность визуального контроля параметров двигателя-демонстратора, возможность выборочной обработки информации в процессе испытаний, обработку получаемой информации в режиме единого времени [7].

Разработанные измерительная и управляющая системы стенда огневых испытаний двигателя-демонстратора состоят из следующих подсистем:

- измерительная подсистема, считывающая показатели давления в магистралях и камере сгорания двигателя, расходы компонентов, токи и напряжения электроклапанов, показания тягоизмерительного устройства;
- подсистема сбора аналоговых и дискретных данных с разного рода датчиков;
- подсистема управления, через которую осуществляются испытания в ручном и автоматическом режиме по циклограмме;

- подсистема, контролирующая ход испытаний в реальном времени, отслеживающая значения всех измеряемых параметров, отображающая их в удобном виде (табличном, графическом);
- подсистема формирования отчетов о проведенных испытаниях и архивирования протоколов экспериментов [7].

Измерительная подсистема включает в себя манометры, контролирующие давление в баллонах с компонентами и после газовых редукторов (ГР), манометры и газовые расходомеры, устанавливаемые на магистралях подачи после электроклапанов (ЭК), тензодатчики, с помощью которых измеряется тяга двигателя.

Разработка циклограммы испытаний производится с учётом выбранной архитектуры ИИиУС стенда, так как принцип логического построения и технические характеристики элементов ИИиУС напрямую влияют на скорость обработки данных и эффективность управленческих команд. ИИиУС отвечает за управление открытием и закрытием электроклапанов и за управление системой зажигания, также через эту систему задаётся последовательность опроса датчиков с заданием частоты опроса.

Запуск двигателя демонстратора реализуется следующим образом: перед запуском двигателя производится операция продувки магистралей и камеры двигателя воздухом, поступающим от компрессора при открытии специальных продувочных вентилей, затем ГР горючего и окислителя настраиваются на определённое давление, в соответствии с программой испытаний. Давление после ГР не должно превышать допустимого давления для ЭК. Испытатель открывает вентиль на баллонах с компонентами, компоненты заполняют соответствующие магистрали, рабочие полости ГР вплоть до ЭК. Затем подаются управляющие сигналы на открытие ЭК одновременно или с задержкой в зависимости от требуемого соотношения компонентов. Компоненты топлива проходят до смесительной головки, и в этот момент подаётся ток на свечу зажигания.

Момент подачи тока на свечу может вычисляться по методике, описанной в работе [8]. Однако результаты подобных расчётов должны быть подтверждены и скорректированы на основе опытных данных непосредственно во время испытаний, так как существует множество факторов влияющих на процесс протекания газообразного компонента топлива по магистрали (температура окружающей среды, различие местных сопротивлений магистралей, и т.д.). Экспериментально момент подачи тока на свечу зажигания вычисляется при помощи серии пусков и остановов двигателя с постепенным уменьшением промежутка времени между началом подачи компонентов топлива в КС и отключением системы зажигания.

Останов двигателя производится закрытием вентилей подачи на баллонах с компонентами и закрытием ЭК, после чего компоненты перестают поступать в КС.

В заключении можно отметить, что на конечный вид циклограммы испытаний влияет множество факторов, таких как выбранная конструкция стенда и применяемая элементная база, особенности конструкции РДМТ и режимы его работы. Циклограмму испытаний необходимо отрабатывать экспериментально при разных температурах для получения наиболее полного представления о характеристиках испытываемого двигателя-демонстратора. Термостатирование стенда, выполненного по открытой схеме довольно трудно обеспечить, поэтому важную роль при проведении испытаний будут играть погодные условия. Полученные эмпирические данные по испытаниям рассматриваемого в работе двигателя-демонстратора можно будет экстраполировать на повторные испытания, а также на испытания подобных РДМТ в будущем.

Библиографические ссылки

1. Особенности проектирования камеры ракетного двигателя малой тяги при использовании аддитивных технологий / Н. С. Шестов, П. А. Бривкальн, Е. Е. Жигурова,

К. Е. Мумбер // 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: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 237–239.

2. 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, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Часть 1. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 205–207.

3. Оценка соответствия заявленных механических свойств материала камеры ЖРД малой тяги, изготовленной методом 3D-печати / В. Ю. Журавлев, Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер [и др.] // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 24–26 февраля 2022 года. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 7–11.

4. Анализ результатов рентгенографических исследований изделий РКТ изготовленных методом SLM-печати / Э. С. Манохина, М. А. Шикарев, А. П. Рубайло [и др.] // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Часть 1. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 186–187.

5. Особенности методики виброиспытаний камеры – демонстратора ЖРД малой тяги, изготовленной с использованием аддитивных технологий / И. В. Дергач, И. А. Фесенко, А. А. Фоменко [и др.] // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 24–26 февраля 2022 года. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 95–100.

6. Борисов В. А. Конструирование основных узлов и систем ракетных двигателей [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие ; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). Самара, 2011.

7. Неретин Е. С., Чубаров О. Ю. Информационно-измерительная и управляющая система огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги // 2010. № 41. С. 19.

8. Салич В. Л. Моделирование рабочего процесса вытеснительной системы подачи топлива на горячем газе // Проблемы и перспективы развития двигателестроения : материалы докладов международной научно-технической конференции, Самара, 22–24 июня 2016 года. Том 2. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, 2016. С. 25–26.

© Шикарев М. А., Журавлев В. Ю., 2023

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Шевчук^{1,2*}, О. В. Пастушенко¹, В. В. Двирный^{1,2,3,4}, Г. В. Двирный²,
А. А. Снежко³, Е. С. Сидорова⁴

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

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

³Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Северная, 1

⁴Сибирский федеральный университет

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

*E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

Развитие перспективных применений автоматических космических аппаратов, таких, как радарное дистанционное зондирование Земли, сопровождается освоением новых сверхвысокочастотных радиодиапазонов сантиметровых и миллиметровых длин волн. При этом неизбежно ужесточаются требования к точностным характеристикам антенн и их элементов, обеспечение которых происходит на всех стадиях проектирования, изготовления и наземной экспериментальной отработки космического аппарата. В ходе наземной экспериментальной отработки для подтверждения точностных характеристик антенн и других размеростабильных конструкций проводят высокоточные измерения их температурных деформаций в условиях вакуума и экстремальных температур. В свою очередь, это требует высокой точности в части обеспечения стабильности, однородности температурного поля и скорости линейного изменения температуры на объекте испытаний. Авторами предложены решения с использованием перспективных технологий, позволяющие повысить точностные и эксплуатационные характеристики испытательного оборудования и, как следствие, при подтверждении точностных характеристик размеростабильных конструкций значительно снизить стоимость и обеспечить высокую достоверность термовакуумных испытаний.

Ключевые слова: космический аппарат, термовакуумные испытания, наземная экспериментальная отработка, термовакуумная камера, установка кондиционирования газообразного азота, имитатор солнечного излучения.

Орбитальная спутниковая группировка России включает более 160 космических аппаратов (КА) связи, навигации, топогеодезического и метеорологического назначения, дистанционного зондирования Земли и мониторинга состояния на ее поверхности. При этом дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является одним из наиболее востребованных и активно применяемых направлений.

С каждым годом происходит увеличение количества КА ДЗЗ, новых технологий, услуг и сервисов, повышается качество передаваемой информации и различных геоинформационных продуктов, созданных на основе данных ДЗЗ. Так, в рамках Федеральной космической программы России на 2016–2025 годы (ФКП-2025) предусмотрено доведение к 2022–2023 годам количества КА ДЗЗ в составе орбитальной группировки до 20 [1]. Создана и успешно функционирует Единая территориально-распределенная

информационная система приема, сбора, обработки, хранения, распространения и предоставления данных ДЗЗ из космоса, обеспечивающая государственных потребителей.

В МЧС России данные ДЗЗ применяются для прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их мониторинга. В целях информационного обеспечения мероприятий по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, в МЧС России с 1997 года существует Система космического мониторинга чрезвычайных ситуаций (СКМ ЧС). В настоящее время СКМ ЧС активно применяется, например, для решения следующих задач:

- мониторинг паводковой обстановки;
- мониторинг лесопожарной обстановки;
- мониторинг аварийных разливов нефтепродуктов на суше и акваториях;
- поиск аварийных объектов на суше и акваториях;
- мониторинг потенциально опасных территорий и объектов[2].

Для получения пространственной информации о земной поверхности из космоса, вместе со съемкой оптико-электронными системами в видимом и инфракрасном диапазонах длин электромагнитных волн, широко применяется съемка радарными системами в сантиметровом и миллиметровом радиодиапазоне. При этом в отличие от оптических снимков, регистрирующих отраженное солнечное излучение, качество радарных снимков совершенно не зависит от облачности и освещенности.

Большинство радарных космических систем работают в области радиоволн, включающей диапазоны X, C, S, L, P с длинами волн от 0,5 до 75 см. С точки зрения развития спутниковых систем также перспективны сверхвысокочастотные радиодиапазоны, такие, как Ku и Ka. В то же время с ростом частот, переходом к более коротким длинам волн неизбежно возрастают и требования к точностным характеристикам антенн и их элементов.

Надежная работа антенны в составе КА обуславливается ее способностью максимально сохранять свои геометрические параметры при воздействии на КА криогенных температур, вакуума и механических нагрузок, в том числе и во время маневра на орбите. Поэтому в составе современных космических аппаратов, обеспечивающих услуги связи, навигации и геодезии, широко применяются размеростабильные прецизионные конструкции - антенны различных диаметров, антенные панели, штанги, спицы крупногабаритных антенн, ферменные конструкции.

Обеспечение заданных точностных характеристик происходит на всех стадиях проектирования, изготовления и наземной экспериментальной отработки КА. В ходе наземной экспериментальной отработки, в условиях вакуума, в поле экстремальных положительных и отрицательных температур проводят испытания (термовакуумные испытания, или ТВИ) размеростабильных конструкций, при которых с высокой точностью, с погрешностью до 20–40 мкм, измеряют их температурные деформации. В свою очередь, это требует высокой точности в части обеспечения стабильности, однородности температурного поля и скорости линейного изменения температуры на объекте испытаний (ОИ).

Расчеты и экспериментальные данные показывают, что термовакуумные испытания могут с достаточной точностью проводиться при следующих условиях:

- давление в термовакуумной камере – не более $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.;
- температура окружающего пространства – не выше минус 180 °С;
- коэффициенты стенок термобарокамеры – $A_s \geq 0,9$ и $\epsilon \geq 0,9$;
- интенсивность имитации солнечного потока – не менее 1 440 Вт/м², с неоднородностью до ± 15 %, непараллельностью до 4° спектром, близким к солнечному ($\lambda \geq 0,2$ мкм);
- инфракрасное излучение от имитаторов тепловых потоков – до 1,8 кВт/м² [3].

Для получения теплового состояния ОИ в термовакуумной камере традиционно используют циркуляцию в ее криогенных экранах жидкого азота, а тепловое воздействие

имитируют расположенными вокруг ОИ мощными инфракрасными нагревателями или имитатором солнечного излучения (ИСИ), или же объединяют оба этих метода [4].

Метод получения теплового состояния ОИ при помощи инфракрасных нагревателей относительно недорог и прост в реализации. Вокруг ОИ на определенном расстоянии размещают регулируемые секции (панели), называемые также имитаторами теплового потока (ИТП), состоящие из линейчатых или точечных излучателей – как правило, кварцево-галогенных ламп с отражателями. Внешний вид типичной панели ИТП показан на рис. 1.

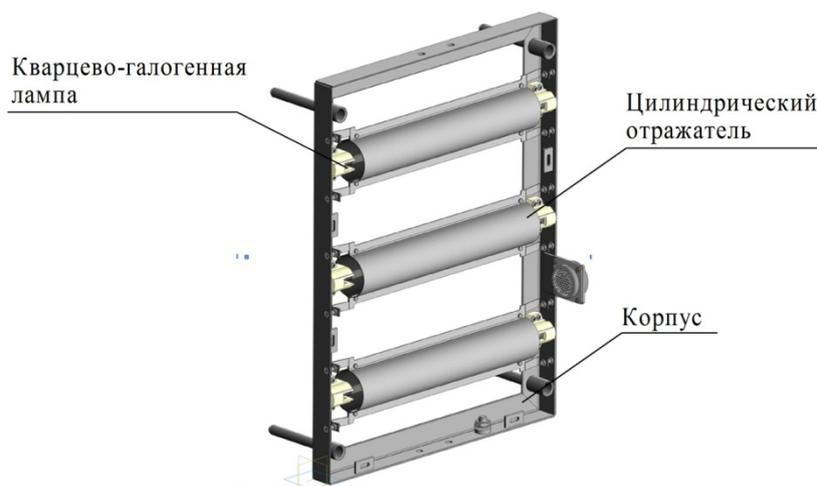


Рис. 1. Панель имитатора теплового потока из трех кварцево-галогенных ламп

К недостаткам указанного метода следует отнести значительное несоответствие спектра излучения кварцево-галогенных ламп с максимумом в инфракрасном диапазоне спектру Солнца и отраженного излучения Земли, что при использовании спектрально селективных отражающих или поглощающих покрытий ОИ, работающих в другом диапазоне, неизбежно приводит к высокой погрешности имитации. Известны методы коррекции спектрального несоответствия с учетом радиационных свойств облучаемых поверхностей, однако их применение ограничено или совсем неосуществимо, например, в случае облучения одной секцией ИТП нескольких поверхностей с разными радиационными свойствами. Еще одним, не менее существенным недостатком, следует считать высокую непараллельность излучаемого ИТП теплового потока, что приводит к быстрому падению уровня его интенсивности при увеличении расстояния до ОИ и не позволяет получить достаточную точность имитации при значительных перепадах по глубине облучаемых поверхностей. Наконец, применяемые в этом случае методы контроля точно устанавливаемыми на поверхностях ОИ температурными датчиками не дают исчерпывающей информации о тепловом состоянии всего ОИ, что также вносит дополнительную погрешность имитации. Таким образом, применение ИТП ограничено и позволяет создать однородное температурное поле на ОИ, как правило, лишь при гладкой и выпуклой форме его облучаемых поверхностей и однородности их радиационных характеристик [5].

Имитация теплового воздействия Солнца имитатором солнечного излучения (ИСИ) свободна от указанных выше недостатков, но связана со значительными техническими трудностями и сложностью эксплуатации. Традиционные ИСИ построены на основе газоразрядных ксеноновых ламп, которые в силу своих особенностей не могут быть размещены непосредственно в термовакуумной камере. Для преобразования потоков их излучения в однородное световое поле необходима громоздкая и сложная оптическая система из большого количества преломляющих и отражающих оптических элементов. Как следствие, недостатками таких ИСИ являются низкая, порядка 10 %, энергоэффективность, вызванная удаленностью световых источников от ОИ, высокими потерями

в громоздкой оптической системе, а также сложность, трудоемкость и высокая стоимость эксплуатации с участием квалифицированного персонала.

Общим недостатком описанных выше двух методов является неоправданно высокий расход жидкого азота и электроэнергии, что во многих случаях из экономических соображений ограничивает продолжительность ТВИ.

Одним из перспективных решений, направленных на получение стабильного и однородного температурного поля на ОИ в широком диапазоне рабочих температур, является рециркуляция в тепловых экранах термовакуумной камеры газообразного азота при помощи установок кондиционирования газообразного азота (англ. GN₂TCU – Gaseous-Nitrogen Thermal Conditioning Unit) (рис. 2). Отличительной особенностью этой технологии является создание экранами термовакуумной камеры на ОИ как отрицательных, так и положительных температур, что позволяет в большинстве случаев обойтись без большого количества мощных потребителей электроэнергии – ИТП или же полностью исключить их. По нашим предварительным расчетам, применение установок кондиционирования вместо традиционных систем с циркуляцией в контуре жидкого азота в существующих термовакуумных камерах для ТВИ КА позволит сократить его потребление на величину до 20 % в режимах температурных переходов и до 50 % в установившихся температурных режимах [6].

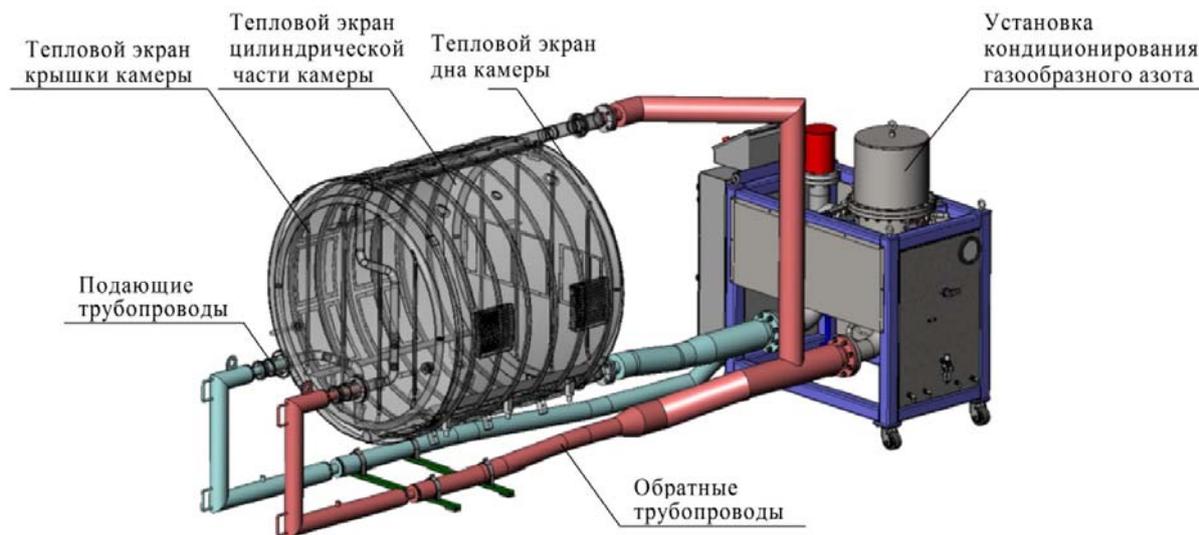


Рис. 2. Схема подключения установки кондиционирования газообразного азота (корпус горизонтальной термовакуумной камеры условно не показан)

Опыт ведущих зарубежных производителей показал, что кондиционирование газообразного азота как средство обеспечения температурного режима применимо для большинства случаев ТВИ КА. При этом в контуре системы не циркулирует жидкий теплоноситель, что исключает риск загрязнения внутрикамерного пространства и ОИ. Благодаря высокому уровню автоматизации с использованием современных программируемых логических контроллеров достигается простота и гибкость управления. При этом характеристики установок кондиционирования газообразного азота постоянно совершенствуются производителями сразу в нескольких направлениях, таких, как расширение границ температурного диапазона, оптимизация потребления жидкого азота и максимальная автоматизация управления системой, включая быструю перенастройку для различных видов испытаний [7].

В области имитации солнечного излучения наиболее перспективно построение имитаторов солнечного излучения на основе иных принципов, допускающих размещение

светового источника ИСИ внутри термовакuumной камеры, в непосредственной близости от ОИ. Такое решение представляется реализуемым только после появления в последнем десятилетии новых разработок твердотельных источников - высокоэффективных светодиодов. Как один из наиболее рациональных вариантов конструкции, авторами предложен ИСИ с излучателем в виде двухмерного массива (матрицы) с распределенными параметрами из множества точечных источников излучения, каждый из которых оснащен простым первичным оптическим элементом. В случае если расстояние до объекта испытаний (ОИ) многократно превышает расстояние между соседними точечными источниками матрицы, потоки их излучения, многократно смешиваясь, образуют на ОИ однородное рабочее поле. Наиболее практичной представляется конструкция ИСИ, собираемая из необходимого для каждого конкретного случая ТВИ количества автономных секций (модулей). Внешний вид одного автономного модуля показан на рис. 3.

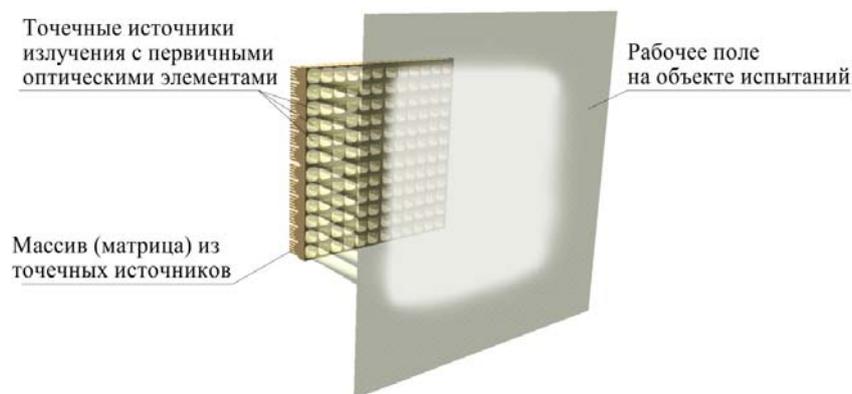


Рис. 3. Излучатель ИСИ в виде матрицы из точечных источников

Результаты проведенных авторами ряда экспериментов и математического моделирования подтверждают принципиальную возможность создания такого ИСИ с комбинированием последних разработок высокоэффективных светодиодных сборок в видимой области совместно с лампами накаливания в преимущественно инфракрасной области солнечного спектра. Полученные в результате моделирования эксплуатационные характеристики крупногабаритного ИСИ из большого количества модулей (рис. 4) значительно превосходят, а точностные - не уступают аналогичным характеристикам традиционных ИСИ на основе газоразрядных ксеноновых ламп [8; 9].

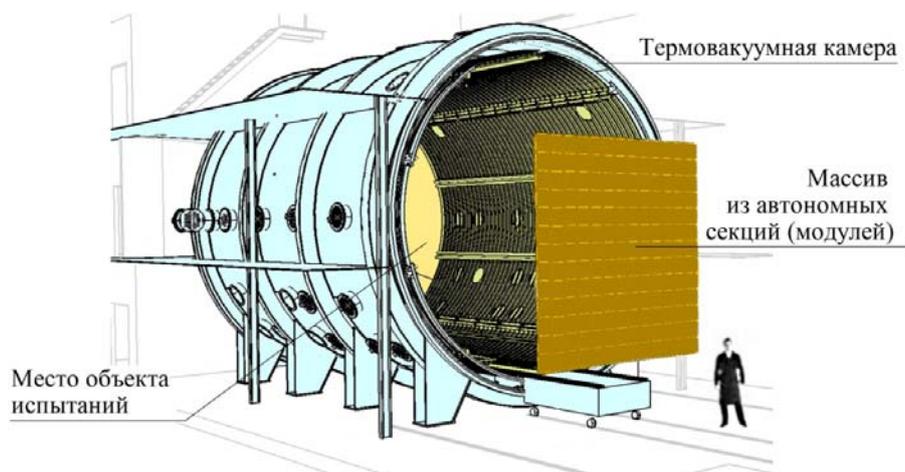


Рис. 4. Световой источник комбинированного ИСИ в горизонтальной термовакuumной камере (крышка камеры условно не показана)

Сравнительные характеристики смоделированного ИСИ и традиционных ИСИ на основе газоразрядных ксеноновых ламп показаны в таблице.

Сравнительные световые характеристики модели и традиционных ИСИ для ТВИ КА

| Характеристика | Модель | Традиционные ИСИ |
|--|-----------|------------------|
| Неравномерность распределения ЭО в рабочей плоскости, % | 5,2–3,3 | до 15 |
| Энергоэффективность, % | 19,5 | 5-10 |
| Спектральное соответствие, определенное в [9] на основе методики ГОСТ Р МЭК 60904-9, не хуже | Класс С | Класс С |
| Ресурс источников излучения, ч | До 10 000 | 300–500 |

Таким образом, повышение точностных и эксплуатационных характеристики испытательного оборудования с использованием новых, перспективных технологий позволит значительно снизить стоимость и обеспечить высокую достоверность термовакуумных испытаний при подтверждении точностных характеристик прецизионных размеростабильных конструкций на стадии наземной экспериментальной отработки космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Хайлов М.Н., Заичко В.А. Научно-технические проблемы сбора, хранения, обработки, распространения и применения космической геопространственной информации в интересах российских потребителей // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2020. № 1. С. 6–15.
2. Алексеенко Я. В., Фахми Ш.С. Применения информационной системы космического мониторинга МЧС России для обеспечения эффективных управленческих решений по защите населения и территория от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса : сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции. 2017. С. 67.
3. Колесников А. П. Системы терморегулирования космических аппаратов : курс лекций ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. 140 с.
4. ГОСТ Р 56469–2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакуумные испытания. Введ. 2015-01-15. М. : Стандартинформ, 2015. 11 с.
5. Палешкин А.В., Мамедова К.И. Моделирование расчетных внешних тепловых нагрузок к поверхности космического аппарата с помощью инфракрасных нагревателей // Труды МАИ. 2016. Вып. 85. С. 6.
6. Pollara R. A. Improved thermal vacuum chamber temperature performance via gaseous nitrogen thermal conditioning units // Proceedings of the 13th European Conference on Spacecraft Structures, Materials & Environmental Testing. Braunschweig, Germany. 1-4 April, 2014. ESA-SP Vol. 727, ISBN: 978-92-9221-291-9. Edited by L. Ouwehand, 2014, id. 203.
7. Михалкин В.М., Пастушенко О.В., Двирный В.В., Двирный Г.В., Шевчук А.А. Снижение эксплуатационных расходов термовакуумных испытаний космических аппаратов с использованием технологии кондиционирования газообразного азота // Космические аппараты и технологии. 2020. Т. 4. № 1. 36-44. doi: 10.26732/j.st.2020.1.05.
8. Шевчук А.А. Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 672–686. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686.
9. Специализированная светодиодная сборка имитатора внеатмосферного солнечного излучения / А.А. Шевчук, В.В. Двирный, М.С. Майбах и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 4. С. 734–746. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-734-746.

© Шевчук А. А., Пастушенко О. В., Двирный В. В., Двирный Г. В., Снежко А. А., Сидорова Е. С., 2023

НАЗЕМНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННОГО КОМПОЗИТНОГО РЕФЛЕКТОРА ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. В. Иванов

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

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: ivs@iss-reshetnev.ru

В работе представлены структура, этапность, описание рабочих мест и методология испытаний комплексной наземной экспериментальной отработки прецизионного рефлектора высокочастотной антенной системы (АС) телекоммуникационного космического аппарата (КА), практическая реализация которой позволила подтвердить правильность примененных конструкторско-технологических решений и обеспечить выполнение предъявленных к конструкции рефлектора технических требований в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

Ключевые слова: космический аппарат, антенная система, прецизионный рефлектор, композиционный материал, экспериментальная отработка.

Введение. Бортовые зеркальные АС с рефлекторами разных диаметров и формой отражающей поверхности входят в состав полезной нагрузки телекоммуникационных КА. Прием и передача информации в зоне обслуживания с требуемым уровнем радиотехнических параметров решается применением в составе КА офсетных раскрываемых АС со сложным механическим интерфейсом (без автономной конструкции, соединяющей рефлектор с облучателем) [1]. Компоновка типовой АС представлена на рис. 1. В связи с большим диаметром апертуры для обеспечения размещения КА в ограниченной полезного груза ракеты рефлектор АС установлен на механизм раскрытия и наведения, с помощью которого переводится в сложенную конфигурацию и фиксируется на антенной панели КА механизмами зачековки. После вывода КА на целевую орбиту и срабатывания механизмов зачековки рефлектор с помощью механизма раскрытия переводится в рабочую конфигурацию, в которой выполняет свою целевую функцию в течение всего срока активного существования КА.

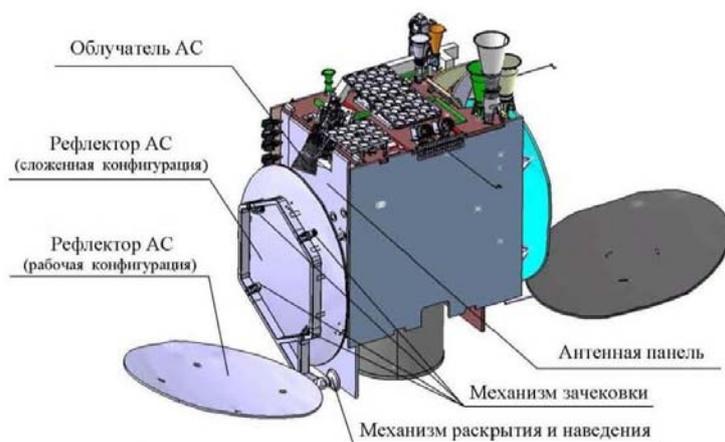


Рис. 1. Компоновка офсетной АС со сложным механическим интерфейсом в составе КА

В составе КА конструкция рефлектора АС должна гарантировать работоспособность всей системы в части гарантированного обеспечения требуемого уровня радиотехнических характеристик и заданной погрешности наведения электрической оси диаграммы направленности на зону обслуживания на Земле при воздействии комплекса внешних воздействий целевой орбиты и участка выведения на нее. Основные факторы внешних воздействий и критерии положительной оценки их влияния на конструкцию рефлектора АС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Факторы внешних воздействий на конструкцию рефлектора АС

| Факторы внешних воздействий | Критерии положительной оценки |
|--|---|
| Диапазон рабочих температур ± 150 °С (с учетом всего спектра тепловых случаев) | Квалификация материалов с гарантированным запасом и сохранение целостности конструкции без деградации технических характеристик и геометрических параметров |
| Вакуум порядка 10^{-8} Па | |
| Радиация, электростатический разряд | |
| Стойкость к воздействиям продуктов пассивной интермодуляции (ПИМ) | Уровень мощности ПИМ 4, 6 и 7 порядка не более -193 dBc |
| Жесткость (собственная частота колебаний в сложенной конфигурации) | не менее 45 Гц |
| Квазистатические и синусоидальные нагружения | Обеспечение прочности и жесткости с проектными запасами по напряжениям и уровням вибраций (в диапазоне частот 5–100 Гц) не менее 1,5 |
| Интерфейсные нагрузки | Проектный запас по допустимым силам и моментам в механических интерфейсах не менее 1,5 |
| Акустическое воздействие | Обеспечение прочности при воздействии уровня звукового давления 150 дБ (3×10^{-3} Па) |
| Нагрузки наземного этапа (подъемно-такелажные работы, транспортировка) | Обеспечение прочности и жесткости при воздействии перегрузок с ускорением до 3,5 g |

Разработка комплексной программы отработки, построение блок-схемы и матрицы испытаний. Наземная экспериментальная отработка (НЭО) является завершающим этапом создания конструкции со следующими основными целями:

1. Подтверждение правильности конструкторско-технологических решений и правильности выбора материалов при изготовлении рефлектора;
2. Проверка соответствия технических характеристик рефлектора заданным требованиям в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным;
3. Квалификация технологических процессов и рабочих мест проведения испытаний;
4. Отработка конструкторской и программно-методической документации.

Основным содержанием НЭО являются проведение специфических испытаний, имитирующих условия внешних воздействий целевой орбиты. Исходя из высокого уровня предъявленных технических требований программа НЭО должна носить комплексный характер и основываться на принципе поэтапного перехода от конструкторского макетирования и испытаний образцов материалов к автономным отработочным испытаниям опытных образцов рефлектора и заканчиваться контрольными испытаниями, подтверждающими соответствие заданным требованиям, высокую надежность и качество и подтверждение готовности к натурным испытаниям в составе КА на целевой орбите [2].

Объектом испытания НЭО являлся рефлектор приемо-передающей офсетной АС С-диапазона с контурной диаграммой направленности диаметром 2400 мм из состава полезной нагрузки телекоммуникационного КА среднего класса «Экспресс-АМУ7» на базе платформы «Экспресс-1000» (рис. 2).

Составные части рефлектора изготовлены из углепластикового композиционного материала (УКМ), их функциональное разделение и оригинальная схема армирования УКМ обеспечили создание прочной, легкой и размеростабильной конструкции (табл. 2), защищенной патентом на изобретение РФ [3].



Рис. 2. Проектная разработка и изготовленный летный рефлектор офсетной АС с контурной ДН

Таблица 2

Конструктивное исполнение составных частей рефлектора АС

| Составная часть рефлектора | Конструктивное исполнение | Целевая функция |
|--|---|---|
| Отражатель | Трехслойная сотовая панель с обшивками из УКМ и алюминиевым сотозаполнителем | Формирование высокоточной отражающей поверхности с минимальной высотой и снижения градиента температур по сечению и снижения уровня термодформаций |
| Штанга | Монооболочная рама прямоугольного сечения из УКМ с интерфейсами для установки кронштейнов | Силовая конструкция для обеспечения прочности, жесткости и восприятия нагрузок в механических интерфейсах с конструкцией КА |
| Элементы крепления штанги к отражателю | Набор пластин и уголков из УКМ, равномерно распределенных по площади отражателя | Распределенное крепление отражателя к штанге с обеспечением механической и температурной развязки между ними для исключения передачи деформации штанги на высокоточную конструкцию отражателя |
| Интерфейсные кронштейны | Металлические детали из титанового сплава, вклеенные в конструкцию штанги | Реализация механических и тепловых интерфейсов для крепления к механизму раскрытия и наведения и механизмам зачекочки и интеграции на конструкцию КА |
| Юстировочные элементы (ЮЭ) | Металлические сферы диаметром 12,7 мм с зеркальной поверхностью, встроенные в конструкцию | Контроль изменения формы и геометрии отражателя и штанги до и после испытательных воздействий при помощи оптических измерений лазерным радаром |

Для реализации НЭО были разработан План испытаний с основными фазами:

- разработка сквозного графика с построением блок-схемы (рис. 3) и формированием перечня аттестованных рабочих мест испытаний;
- разработка матрицы испытаний (табл. 3), выпуск программ и методик испытаний;
- пошаговое выполнение процедур с контрольными операциями и выпуском протоколов.

Описание рабочих мест и методик испытаний. Критерием положительной оценки результатов испытаний всего этапа НЭО является сохранение уровня радиотехнических характеристик (РТХ) рефлектора в составе АС, измерения РТХ проводились до и после завершения НЭО на рабочем месте измерения радиопараметров – автоматизированном измерительно-вычислительном комплексе на базе сканера ближнего поля. Рабочее место организовано в безэховой камере, оснащенной пирамидальными погло-

тителями из радиопоглощающего материала для предотвращения влияния на результаты измерений отраженного радиосигнала и исключения погрешностей в интерпретации результатов высокочастотных измерений параметров АС (рис. 4).



Рис. 3. Блок-схема испытаний рефлектора

Таблица

Матрица испытаний рефлектора АС

| Процедура испытаний и контроля | Испытательное (контрольное) оборудование |
|--|--|
| Неразрушающий контроль клеевых соединений (КС) | Акустический дефектоскоп (АД) |
| Измерение профиля поверхности. Контроль ЮЭ | Контрольно-измерительная машина (КИМ) |
| Выпуск протокола измерений | <i>Контрольная операция</i> |
| Измерение массы | Весы |
| Термовакuumные испытания | Термобарокамера, термодатчики |
| Неразрушающий контроль КС | АД |
| Измерение профиля поверхности. Контроль ЮЭ | КИМ, лазерный радар |
| Выпуск протокола измерений | <i>Контрольная операция</i> |
| Испытания на квазистатические нагрузки и синусоидальные вибрации | Вибростенд, вибропреобразователи, акселерометры, цифровой усилитель |
| Акустические испытания | Реверберационная камера, датчики силы, измерительные капсулы, цифровой регистратор |
| Неразрушающий контроль КС | АД |
| Измерение профиля поверхности. Контроль ЮЭ | КИМ, лазерный радар |
| Выпуск протокола измерений | <i>Контрольная операция</i> |
| Испытания на термоупругие деформации | Горизонтальная вакуумная установка, термодатчики, лазерный радар |
| Неразрушающий контроль КС | АД |
| Измерение профиля поверхности. Контроль ЮЭ | КИМ, лазерный радар |
| Выпуск протокола измерений | <i>Контрольная операция</i> |
| Испытания на воздействие продуктов ПИМ | Безэховая камера, генераторы частоты и анализатор спектра, тестовые фильтры и облучатели |
| Заключительные контрольные проверки | Внешний осмотр, итоговый отчет |

Рабочие места измерений профиля поверхности отражателя и координат ЮЭ отражателя и штанги оснащены КИМ и лазерным радаром со специализированными программными комплексами (рис. 5). По результатам измерений выпускается протокол, содержащий массив измеренных точек профиля в формате диаграмм распределения отклонений от теоретического профиля, и координаты ЮЭ в системе координат АС, совпадающей с системой координат параболоида, формирующей отражающую поверхность.

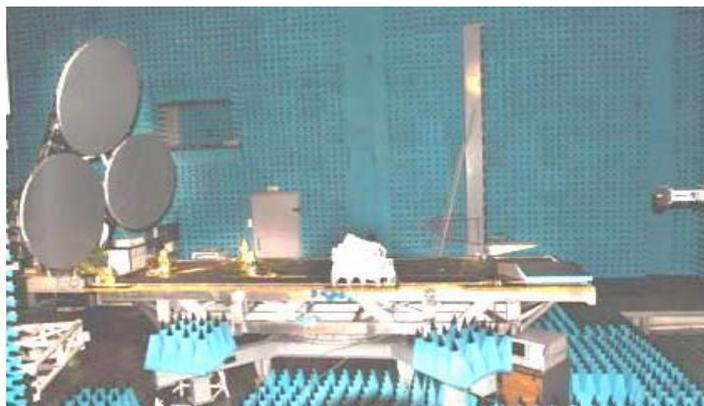


Рис. 4. Рабочее место измерений РТХ АС на базе сканера ближнего поля



а



б

Рис. 5. Рабочие места измерений профиля поверхности рефлектора и координат ЮЭ
а – контрольно-измерительная машина; *б* – лазерный радар

Рабочее место термовакуумных испытаний рефлектора организовано на базе горизонтальной вакуумной установки (рис. 6), оснащенной криоэкранами и имитаторами солнечного излучения для создания температурных режимов испытаний, соответствующих температурам эксплуатации рефлектора в составе КА на орбите. Рефлектор подвергается термоциклированию в количестве 3 циклов в диапазоне температур от 150 °С до минус 150 °С в вакууме, целью испытаний является отсутствие видимых изменений конструкции, до и после испытаний проводились измерения профиля поверхности и координат ЮЭ.



Рис. 6. Рабочее место термовакуумных испытаний рефлектора

Рабочее место испытаний рефлектора на синусоидальные вибрации (рис. 7) организовано на базе вибрационного стенда, реализующего режимы механических воздействий на рефлектор в процессе наземной эксплуатации, транспортирования и выведения КА на целевую орбиту. Целью испытаний является подтверждение прочности и жесткости рефлектора при воздействии динамических нагрузок и отсутствие видимых нарушений целостности конструкции. До испытаний проводились измерения профиля поверхности рефлектора и координат ЮЭ.

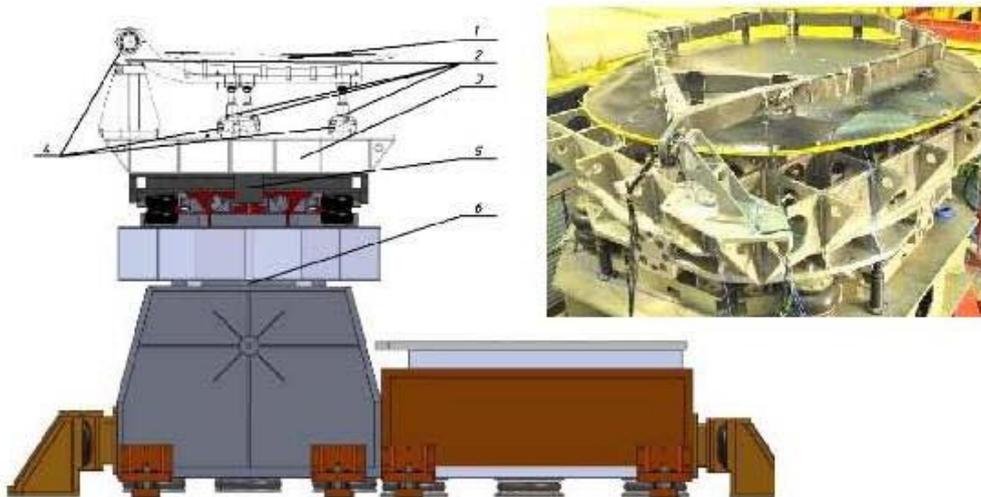


Рис. 7. Рабочее место испытаний рефлектора на синусоидальные вибрации:
1 – рефлектор; 2 – акселерометры; 3 – оснастка; 4 – жесткие имитаторы механизмов;
5 – стол вибростенда; 6 – вибростенд

Рабочее место акустических испытаний рефлектора (рис. 8) организовано на базе акустической реверберационной камеры, в которой при помощи управляющих микрофонов и автоматизированной системы акустического нагружения реализуют воздействие на рефлектор звукового давления со стороны ракеты-носителя на участке выведения КА на целевую орбиту. Целью испытаний является подтверждение прочности, жесткости и отсутствие видимых нарушений целостности конструкции рефлектора при воздействии звукового давления. После испытаний проводились измерения профиля поверхности и координат ЮЭ с целью анализа изменения геометрических параметров рефлектора после комплекса механических и акустических воздействий.



Рис. 8. Рабочее место акустических испытаний рефлектора

Рабочее место испытаний рефлектора на термоупругие деформации (рис. 9) организовано на базе горизонтальной вакуумной установки, оснащенной криоэкранами и имитаторами солнечного излучения для создания температурного режима в соответствии с графиком (рис. 9). В момент последовательного наступления тепловых случаев M1 – M7 проводилось измерение точек термодетформированного профиля рефлектора лазерным радаром в реальном режиме времени через иллюминатор вакуумной установки. В дальнейшем расчетным методом путем сравнения массивов точек отклонений измеренного фактического профиля рефлектора от теоретического для каждого теплового состояния M1 – M7 определялись уровни гигро- и термоупругих деформаций конструкции рефлектора, необходимой для определения составляющей погрешности бюджета ошибок наведения и ее влияния на изменение положения электрической оси диаграммы направленности АС.



Рис. 9. Рабочее место испытаний рефлектора на термоупругие деформации

Рабочее место испытаний рефлектора на воздействие продуктов ПИМ (побочными гармоническими сигналами, вносящими интермодуляционные искажения в полезный радиосигнал), организовано в безэховой камере, состав тестового оборудования представлен на рис. 10. После сборки схемы испытаний проводилось облучение рефлектора двумя несущими радиочастотами с использованием двух тестовых облучателей с фиксацией фактического уровня продуктов ПИМ на анализаторе спектра.



Рис. 10. Рабочее место испытаний рефлектора на воздействие продуктов ПИМ

Заключение. После завершения всех этапов НЭО в соответствии с блок-схемой и матрицей испытаний был выпущен итоговый технический отчет со следующими выводами:

– успешно завершён комплекс испытаний прецизионного композитного рефлектора на воздействие полного перечня факторов внешних воздействий этапов наземной и летной эксплуатации, критерии положительной оценки результатов испытаний выполнены;

– испытания конструкции подтвердили правильность оригинальных конструктивно-технологических решений и выбор инновационных материалов при разработке рефлектора, технические характеристики рефлектора соответствуют заданным требованиям;

– рефлектор допущен к сборке, интеграции и приемочным испытаниям в составе КА.

В 2021 году телекоммуникационный КА «Экспресс-АМУ7» был успешно запущен и принят заказчиком в летную эксплуатацию, что свидетельствует об успешной квалификации разработанной комплексной программы наземной экспериментальной обработки рефлектора.

Библиографические ссылки

1. Иванов А.В., Белов О.А., Чичурин В.Е. Проектирование крупногабаритного высокоточного рефлектора антенны космического аппарата с контурной диаграммой направленности // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 2. С. 378–388.

2. Иванов А.В. Практическая реализация импортозамещения в сфере создания высокотехнологичных прецизионных антенных систем телекоммуникационных космических аппаратов // Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции ученых и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю. А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК Энергия» (8–12 ноября 2021 года) г. Королев Московской области, 2021. С. 533–535.

3. Патент № 2655473, С1, МПК Н01Q 15/16, Н01Q 1/12. Рефлектор / Белов О.А., Иванов А.В. № 2017120285; заявл. 08.06.2017; опубл. 28.05.2018. Бюл. № 16.

© Иванов А. В., 2023

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА 3D-СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ

М. В. Карабонцева
Научный руководитель – В. А. Левко

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

Для контроля точности процесса селективного лазерного сплавления экспериментальной камеры ракетного двигателя малой тяги использован метод 3D-сканирования. Проведен сравнительный анализ фактической поверхности сформированной камеры и её исходной цифровой модели. Построена 3D-модель реальной поверхности сопла камеры-демонстратора за счёт совмещения массивов точек фактических наружной и внутренней поверхностей. Даны рекомендации по настройке технологического процесса селективного лазерного сплавления.

Ключевые слова: 3D-сканирование, селективное лазерное сплавление, камера ракетного двигателя, контроль точности.

Введение. В соответствии с программой приоритетных научно-исследовательских работ СибГУ кафедрой ДИА совместно с промышленным партнером ООО «Полихром» проведен комплекс экспериментальных работ по апробации и отработке режимов 3D-печати образца камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги [1].

Изготовление камеры осуществлялось методом SLM-печати из металлического порошка хромоникелевого сплава ПР-08ХН53МБТЮ на 3D-принтере «Astra SLM 420» собственной разработки ООО «Полихром». В результате отработки технологии был получен ряд образцов экспериментальных камер ракетного двигателя малой тяги [2] (рис. 1).



Рис. 1. Образцы экспериментальных камер ракетного двигателя малой тяги, полученных методом селективного лазерного сплавления [2]

Для контроля точности процесса селективного лазерного сплавления экспериментальной камеры ракетного двигателя малой тяги предложен метод 3D-сканирования.

Применение метода 3D-сканирования для контроля точности процесса селективного лазерного сплавления. Лазерные трекары используются для контроля и сборки крупногабаритных изделий, например, фюзеляжей, контроль криволинейных поверхностей, настройка ступеней и сборочных линий.

Метод лазерной профилометрии, заключающийся в отображении и измерении поверхностей, применяют в производстве высокотехнологичных изделий, в частности металлокомпозитных баков космических аппаратов [3].

При использовании технологии оптической оцифровки (3D-сканирования) модель поверхности формируется путем совмещения отдельных фрагментов поверхности в едином координатном пространстве. Эта модель содержит полную информацию об участках поверхности объекта. Такую модель используют для оценки отклонения фактической поверхности детали от номинальной модели, спроектированной конструктором, в любой доступной точке, формирования сечений и цветовых карт отклонений [3].

С использованием 3D-сканирования осуществлен контроль точности процесса селективного лазерного сплавления экспериментальной камеры ракетного двигателя малой тяги. Оцифрованная модель образца камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги (рис. 1) сравнивалась с исходной цифровой моделью, по которой проводился процесс селективного лазерного плавления.

Распределение отклонения наружной фактической поверхности камеры-демонстратора от номинальной модели показано на рис. 2. Распределение отклонения внутренней фактической поверхности камеры-демонстратора от номинальной модели показано на рис. 3.



Рис. 2. Распределение отклонения наружной фактической поверхности камеры-демонстратора от номинальной модели

Сравнительный анализ фактической поверхности и исходной цифровой модели показывает, что для наружной фактической поверхности камеры-демонстратора в целом характерны положительные отклонения от исходной модели (рис. 2). Наибольшие значения (0,24...0,6 мм) такие отклонения наблюдаются на срезе сопла. Присутствуют локальные отрицательные отклонения (-0,03...-0,21 мм).

Для внутренней фактической поверхности камеры-демонстратора установлена асимметричность отклонений (рис. 3). На одной половине доминируют отрицательные

отклонения, на противоположной – положительные отклонения от исходной модели. В целом, внутренняя поверхность построена точнее, чем наружная поверхность. Наблюдаемый диапазон отрицательных отклонений $-0,09 \dots -0,37$ мм, положительных отклонений от $0,01$ до $0,29$ мм.



Рис. 3. Распределение отклонения внутренней фактической поверхности камеры-демонстратора от номинальной модели

Совмещение массивов точек фактических наружной и внутренней поверхностей позволило построить 3D-модель реальной поверхности сопла камеры-демонстратора (рис. 4).

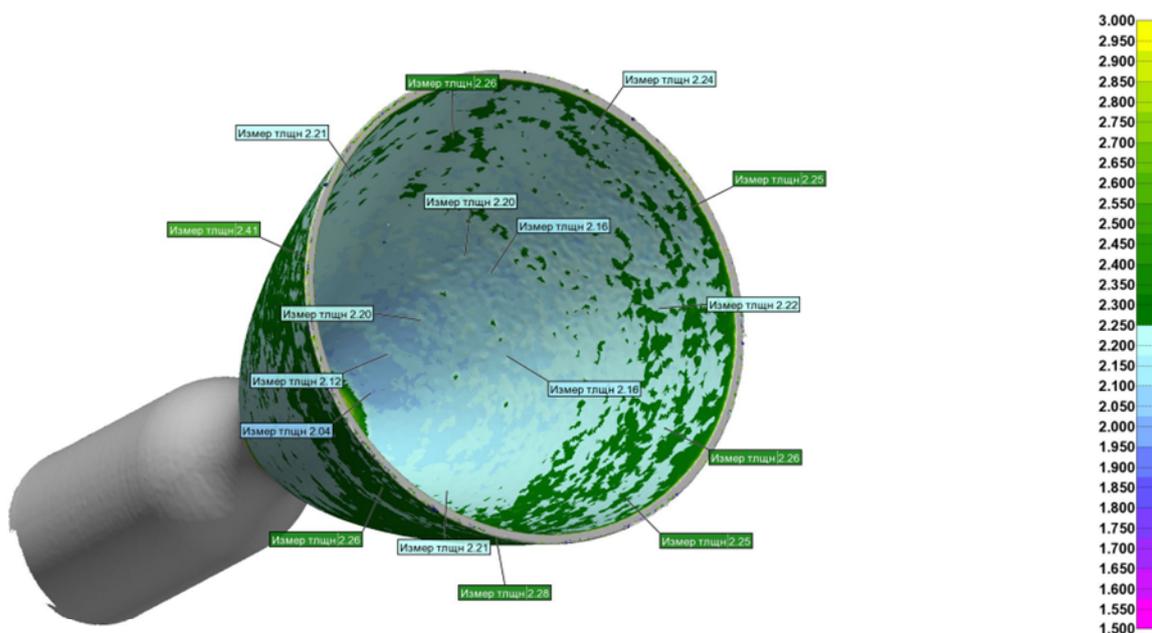


Рис. 4. Оценка толщины стенки сопла камеры-демонстратора за счёт совмещения массивов точек фактических наружной и внутренней поверхностей

Выборочный контроль размера внутреннего диаметра сопла камеры (рис. 5), показал номинальный размер $106,09$ мм, что меньше теоретического на $0,92$ мм.

Согласно исходной модели размер толщины стенки сопла $2 \pm 0,0125$ мм, шероховатость поверхности $Ra = 3,2$ мкм. Измеренная фактическая толщина стенки варьируется в интервале от 2,04 мм до 2,41 мм. Шероховатость сформированной поверхности находится в интервале $Ra = 12,5 \dots 14$ мкм.

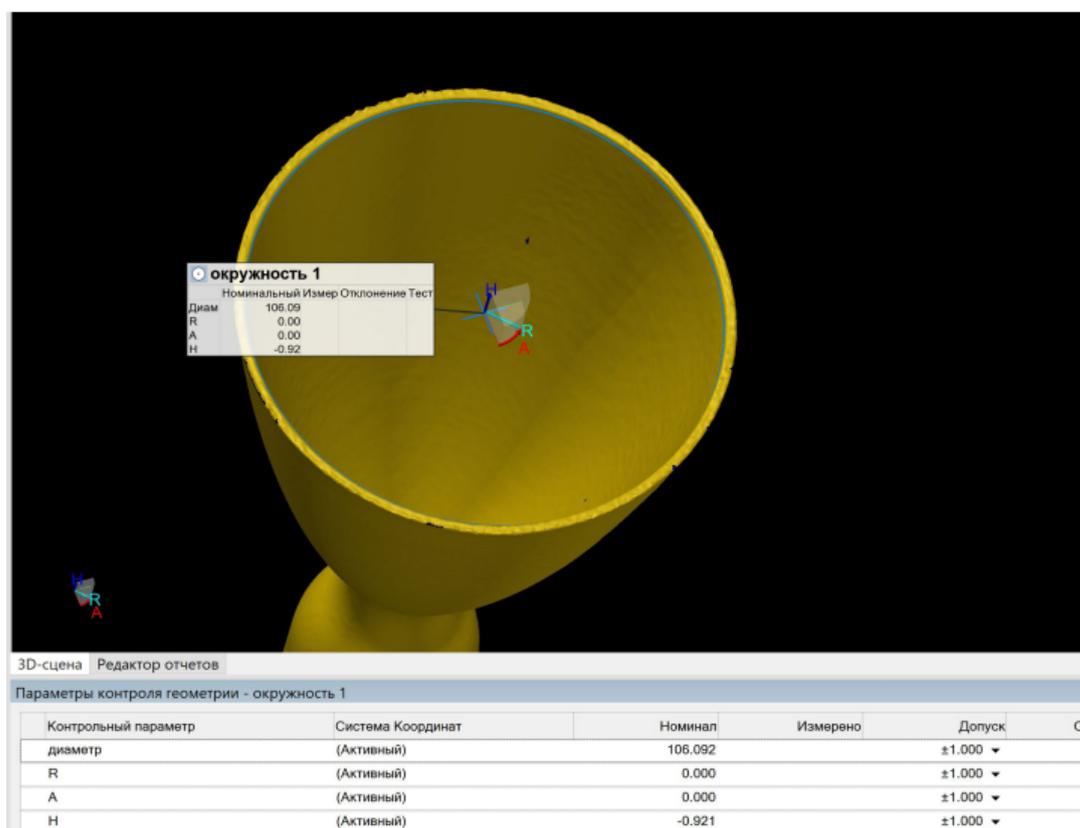


Рис. 5. Выборочный контроль размера внутреннего диаметра сопла камеры

Применение метода 3D-сканирования для контроля точности процесса селективного лазерного сплавления экспериментальной камеры ракетного двигателя малой тяги показало, что полученное изделие необходимо отнести к заготовке.

Размеры полученной заготовки включают в себя припуск для дальнейшей механической и окончательной обработки с целью обеспечения заданной рабочим чертежом детали точности размеров и шероховатости поверхности.

Полученная заготовка характеризуется высоким коэффициентом использования материала и отвечает требованиям по качественной и количественной технологичности детали [5].

На основании проведенных измерений возможно проектирование технологического процесса обработки камеры-демонстратора.

Заключение. Применение метода 3D-сканирования для контроля точности процесса селективного лазерного сплавления экспериментальной камеры ракетного двигателя малой тяги показало высокую эффективность данного метода с точки зрения повышения надежности разработки технологии изготовления изделий высокой сложности с применением передовых производственных технологий.

Библиографические ссылки

1. Разработка технологического процесса изготовления экспериментальной камеры ракетного двигателя методом селективного лазерного сплавления на 3D-принтере /

Р. А. Казаков, А. А. Фоменко, В. В. Гордеев [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: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 188–190. EDN GRAZZH.

2. 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, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Часть 1. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 205–207. EDN DLGMSA.

3. Несущая способность и безопасность металлокомпозитных баков космических аппаратов / В. В. Москвичев, Н. А. Тестоедов, В. В. Васильев [и др.]. Новосибирск : Федеральное государственное унитарное предприятие «Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука», 2021. 440 с. ISBN 97850200414747. DOI 10.7868/978-5-02-0041474-7. EDN SSODQW.

4. Осипович Д. А., Ярушин С. Г. Выбор метода оцифровки для контроля геометрии крупногабаритных сложнопрофильных деталей и узлов авиационных двигателей. Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2014. № 1 (60). С. 103–110. URL: <https://moluch.ru/archive/60/8774/>.

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

© Карабонцева М. В., 2023

СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СООТВЕТСТВИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ИМИТАТОРА ВНЕАТМОСФЕРНОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

О. В. Пастушенко^{1,2}, А. А. Снежко^{1, 2, 3}, В. В. Двирный^{1, 2, 3, 4}, Г. В. Двирный²,
М. С. Козловский², А. А. Шевчук^{1, 2*}

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

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

³Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Северная, 1

⁴Сибирский федеральный университет

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

*E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

Рассмотрена конструкция предложенного ранее перспективного имитатора солнечного излучения, предназначенного для наземной экспериментальной отработки космических аппаратов на этапе термовакуумных испытаний. Высокие технические и эксплуатационные характеристики достигаются, в частности, комбинированием излучения альтернативных источников – высокоэффективных светодиодных сборок и ламп накаливания. При этом необходимо решить ряд неординарных задач, одной из которых является соответствие с заданной точностью спектра имитируемого излучения внеатмосферному спектру Солнца. Предложен способ, обеспечивающий необходимое спектральное соответствие. Наиболее высокая точность имитации спектра Солнца достигается при применении специализированных светодиодныхборок и автоматизированной системы управления с обратной связью.

Ключевые слова: термовакуумные испытания, наземная экспериментальная отработка, имитатор солнечного излучения, светоизлучающий диод, светодиодная сборка, галогенная лампа, спектральное соответствие.

Имитатор солнечного излучения (ИСИ) является одним из основных и наиболее сложных элементов испытательного оборудования, применяемого при наземной экспериментальной отработке космических аппаратов (КА) на этапе термовакуумных испытаний (ТВИ). Объектом испытаний (ОИ) при этом могут быть как КА в целом, так и их отдельные составные части. При этом тепловое состояние ОИ в условиях вакуума и экстремальных температур, приближенных к условиям орбитального функционирования, получают, в том числе, при помощи ИСИ [1]. Согласно предъявляемым требованиям, ИСИ для ТВИ КА создают поток непрерывного теплового излучения с основными характеристиками, близкими к аналогичным характеристикам реального излучения Солнца. Так, к действующим в Акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «РЕШЕТНЁВ») ИСИ для ТВИ КА предъявляются следующие требования:

- непараллельность светового потока: до 4°;
- уровень энергетической освещенности (ЭО): 1340–1440 Вт/м²;
- неравномерность распределения ЭО в пределах рабочего поля: до 15 %;

- спектральный диапазон, близкий к диапазону солнечного излучения в области 200–2000 нм [2].

Ужесточение требований к КА, широкое применение размеростабильных прецизионных конструкций, обязательное подтверждение их точностных характеристик на этапе ТВИ в самое ближайшее время потребуют использования испытательного оборудования с более высокими характеристиками. Однако отработанная за несколько десятилетий конструкция традиционных ИСИ на основе газоразрядных ксеноновых ламп, крайне редко – газоразрядных металлогалогенных ламп [3] практически достигла своего совершенства, что делает невозможным дальнейшее улучшение их характеристик. Другими недостатками традиционных ИСИ являются их крайне низкая энергоэффективность [4], высокая стоимость и трудоемкость эксплуатации [5].

Наиболее перспективна альтернативная конструкция ИСИ на основе других принципов, при которой, в отличие от традиционной, источники излучения размещают в термовакуумной камере, в непосредственной близости от ОИ. Реализация такой конструкции стала возможна благодаря появлению в последнем десятилетии новых разработок высокоэффективных светодиодов, которые могут быть адаптированы к работе в условиях ТВИ.

Так, в работе [6] представлена наиболее простая и рациональная конструкция такого ИСИ в виде двумерного массива с распределенными параметрами, или матрицы, состоящей из множества точечных световых источников. Каждый такой источник оснащен простым первичным оптическим элементом, формирующим направленный поток излучения. Расстояние до ОИ значительно превышает малое расстояние между соседними точечными источниками матрицы, и их световые потоки, многократно смешиваясь, образуют на ОИ однородное рабочее поле (рис. 1).

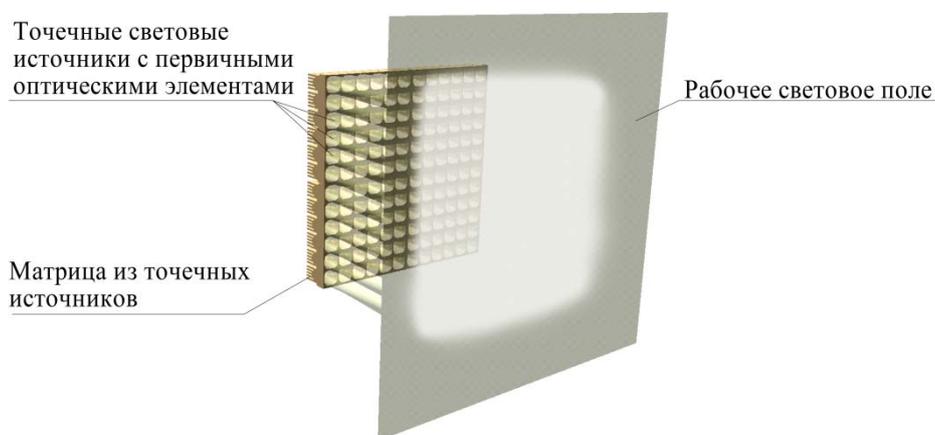


Рис. 1. ИСИ в виде матрицы из множества точечных источников

Результаты проведенного моделирования в специализированном ПО для оптического проектирования Zemax показали, что непараллельность светового потока, уровень и неравномерность распределения ЭО модели соответствуют указанным выше предъявляемым к ИСИ для ТВИ КА требованиям или превосходят их [6].

Вместе с этим, не менее важно необходимое спектральное соответствие ИСИ. Поскольку в КА широко применяются различные спектрально селективные отражающие и поглощающие покрытия, невыполнение этого условия неизбежно приведет к дополнительной погрешности имитации теплового воздействия на ОИ реального солнечного излучения.

Рассмотрим задачи, решение которых необходимо для обеспечения спектрального соответствия перспективного ИСИ.

1. Компоновка матрицы, выбор источников излучения.

При определении компоновки излучающей матрицы ИСИ дополнительно рассмотрим следующие спектральные характеристики:

- спектральный диапазон, который, согласно предъявляемым к ИСИ для ТВИ КА требованиям, должен охватывать не только видимую, но и инфракрасную область длин волн солнечного излучения.

На сегодняшний день наиболее отработаны, эффективны и коммерчески доступны светодиоды видимой области длин волн. Это позволяет применять в ИСИ компактные светодиодные сборки из нескольких, по меньшей мере, пяти или шести кристаллов различных, с равным шагом, длин волн, результирующее излучение которых создает в видимой области непрерывный спектр. В то же время высокая стоимость, малое количество длин волн, невысокая эффективность инфракрасных светодиодов делают их применение неоправданным. В связи с этим предложено комбинирование, как минимум, двух типов источников излучения с различными спектральными характеристиками – светодиодных сборок и галогенных ламп накаливания, которые являются эффективными и самыми недорогими источниками инфракрасного излучения [6; 7].

Равномерность спектра светодиодной сборки прямо зависит от числа составляющих ее кристаллов различных длин волн. При этом число кристаллов не может быть слишком большим – размер излучающей поверхности сборки должен стремиться к точечному, что необходимо для правильного формирования направленного потока излучения оптическими элементами. Поэтому для повышения равномерности спектра возможно использование нескольких типов светодиодных сборок с различными, взаимно дополняющими друг друга спектральными характеристиками.

- спектральная однородность в рабочем поле ИСИ, для достижения которой источники различных типов, с различными спектральными характеристиками, должны размещаться в матрице с равномерным чередованием.

Примеры предлагаемой компоновки матрицы ИСИ с двумя и тремя типами источников излучения показаны на рис. 2.

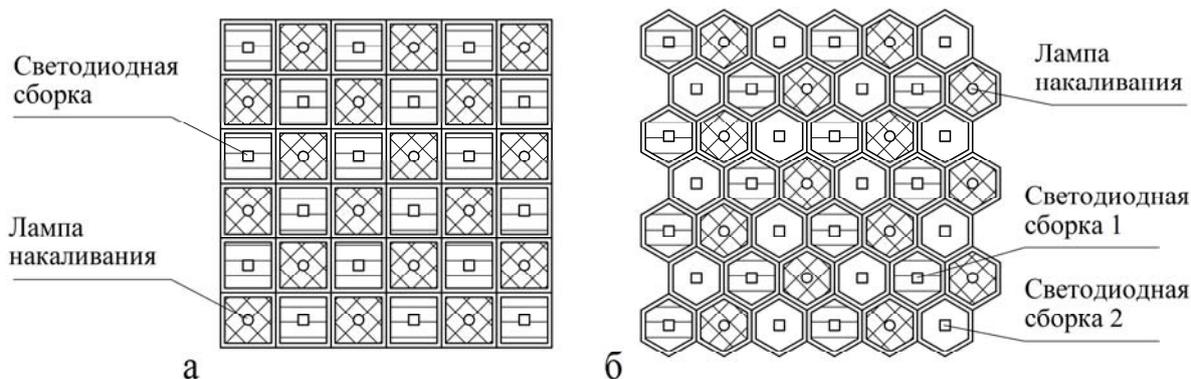


Рис. 2. Варианты компоновки матрицы ИСИ:

- а – компоновка с лампами накаливания и одним типом светодиодных сборок;
- б – компоновка с лампами накаливания и двумя типами светодиодных сборок

2. Критерий спектрального соответствия, методы его определения.

Следует отметить, что на сегодняшний день не существует государственных стандартов, регламентирующих характеристики ИСИ для ТВИ КА. В частности, спектр традиционно применяемых в ИСИ газоразрядных ксеноновых ламп близок к внеатмосферному спектру Солнца, стабилен и принимается «как есть». Однако для альтернативных источников излучения необходима методика оценки спектрального соответствия. В этом случае может использоваться методика на основе близкого по назначению

ГОСТ Р МЭК 60904-9–2016 [8], регламентирующего характеристики ИСИ наземных условий.

Согласно предлагаемой нами в [9] методике, имитируемый спектральный диапазон ИСИ и внеатмосферного солнечного излучения разбивают на необходимое количество поддиапазонов. Рассчитывают отношение ЭО каждого поддиапазона ИСИ по отношению к общей ЭО ИСИ и сравнивают полученное значение с известным значением для аналогичного поддиапазона реального солнечного излучения.

В зависимости от требуемой точности имитации спектра солнечного излучения, принимают критерий спектрального соответствия. В частности, согласно [8], существует три класса спектрального соответствия; минимальным критерием для низшего класса С является соответствие всех поддиапазонов, не выходящее за пределы 0,4–2,0. Интересно отметить, что только этому классу соответствуют и традиционно применяемые в ИСИ для ТВИ КА газоразрядные ксеноновые лампы [9].

3. Обеспечение спектрального соответствия на различных уровнях ЭО.

Основной проблемой при имитации различных уровней ЭО комбинированным ИСИ является смещение максимума излучения ламп накаливания при снижении их мощности в сторону инфракрасной области. Это приводит к рассогласованию спектров светодиодных сборок и ламп накаливания, провалу в результирующем спектре и общему спектральному несоответствию ИСИ.

Решением проблемы может быть применение специализированных светодиодных сборок, имеющих расширенный, включающий инфракрасную область спектральный диапазон, совместно с адаптивной отдельной регулировкой мощности кристаллов светодиодной сборки в области ее согласования с лампами накаливания [9].

Спектры комбинированного ИСИ на максимальном и минимальном уровне ЭО, полученные с применением такого способа, показаны на рис. 3.

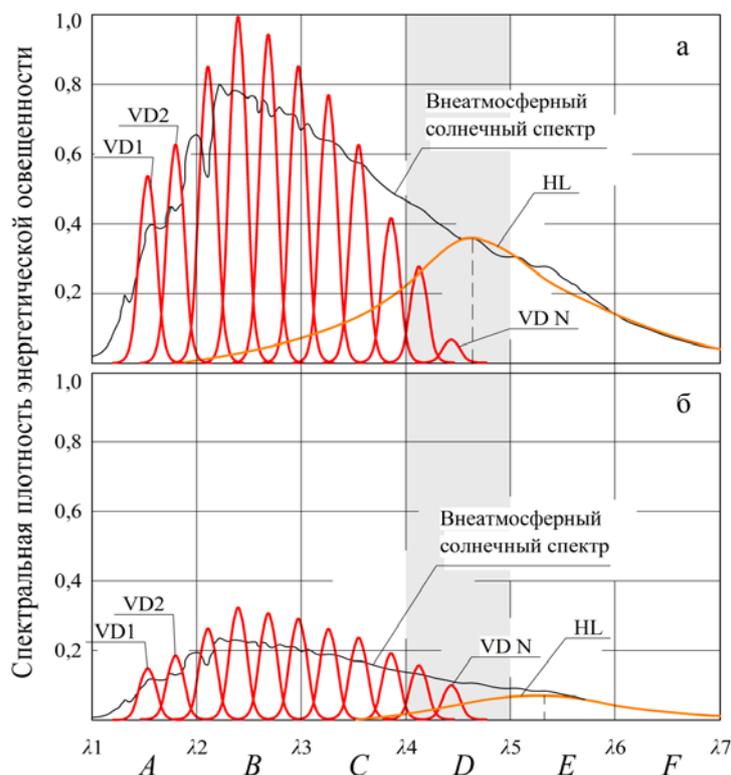


Рис. 3. Спектр комбинированного ИСИ:
а – уровень ЭО 1400 Вт/м²; б – уровень ЭО 400 Вт/м²;
VD1 – VDN – спектры кристаллов светодиодных сборок;
HL – спектр ламп накаливания

В соответствии с принципом суперпозиции, имитируемое солнечное излучение с уровнем энергетической освещенности $E_{ИСИ}$ складывается из излучений всех кристаллов светодиодных сборок различных длин волн $VD1 \cdots VDN$ с уровнями энергетической освещенности $E_1 \cdots E_N$ и ламп накаливания HL с уровнем энергетической освещенности E_{HL} :

$$\begin{aligned} E_{ИСИ} &= E_1 + \cdots + E_N + E_{HL} = \\ &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [k_1 \cdot I_1(\lambda) + \cdots + k_N \cdot I_N(\lambda) + k_{HL} \cdot I_{HL}(\lambda)] d\lambda = \\ &= k_1 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I_1(\lambda) d\lambda + \cdots + k_N \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I_N(\lambda) d\lambda + k_{HL} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I_{HL}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\lambda_{\min} - \lambda_{\max}$ – спектральный диапазон имитатора солнечного излучения;

$I_1(\lambda) \cdots I_N(\lambda)$ и $I_{HL}(\lambda)$ – спектральные плотности энергетической освещенности отдельных кристаллов светодиодных сборок $VD1 \cdots VDN$ и ламп накаливания HL соответственно, Вт/м²·нм;

$k_1 \cdots k_N$ и k_L – коэффициенты мощности отдельных кристаллов светодиодных сборок $VD1 \cdots VDN$ и ламп накаливания HL соответственно.

Из формулы (1) следует, что уровень энергетической освещенности имитируемого солнечного излучения определяется суммарным значением коэффициентов мощности $k_1 \cdots k_N$ и k_{HL} , а результирующий спектр – их взаимным соотношением, что и реализуют совместным управлением уровнем ЭО и спектральным соответствием имитатора солнечного излучения при помощи системы управления.

Смещение максимума излучения ламп накаливания может компенсироваться увеличением мощности двух кристаллов светодиодных сборок в инфракрасной (затененный участок на рис. 3) и остальных кристаллов в видимой области, в частности, по следующему алгоритму:

- устанавливают системой управления мощность ламп накаливания в поддиапазонах E и F , соответствующую заданному уровню ЭО имитируемого солнечного излучения;
- устанавливают отдельно в области совместного излучения сборок светодиодных излучателей и ламп накаливания (поддиапазон D) такие мощности кристаллов светодиодных сборок, при которых выполняется критерий спектрального соответствия в этом поддиапазоне;
- устанавливают отдельно мощности остальных кристаллов светодиодных сборок по критерию спектрального соответствия в остальных поддиапазонах $A - C$;
- измеряют уровень ЭО и при необходимости, не выходя за пределы критерия спектрального соответствия, выполняют системой управления точную подстройку уровня ЭО пропорциональным изменением мощности всех указанных источников излучения.

Результаты проведенного в [9] моделирования показали, что уже со специализированной светодиодной сборкой из шести кристаллов различных длин волн и галогенными лампами достигается спектральное соответствие не хуже класса C . При этом более высокие результаты могут быть получены при использовании автоматизированной системы управления с обратной связью по показаниям датчиков спектра и ЭО, размещенных в рабочем поле ИСИ.

Блок-схема одного из вариантов такой системы управления показана на рис. 4.

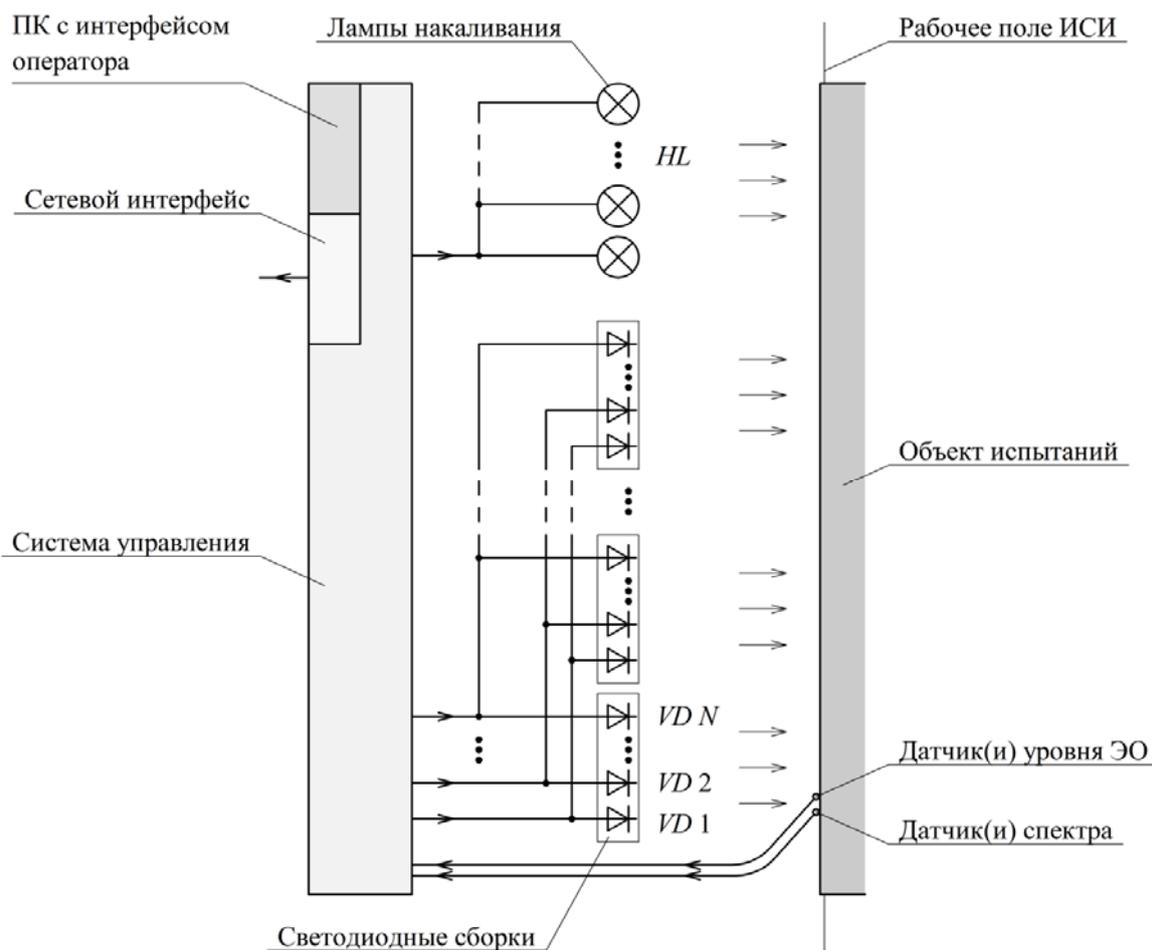


Рис. 4. Блок-схема системы управления комбинированного ИСИ

Таким образом, описанный способ позволяет обеспечить спектральное соответствие предлагаемого перспективного ИСИ, соответствующее предъявляемым к ИСИ для ТВИ КА требованиям. Одним из путей дальнейшего повышения точности имитации спектра Солнца является применение светодиодных сборок, специально разработанных для комбинированного ИСИ, и автоматизация системы управления с использованием обратной связи.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 56469–2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакуумные испытания. Введ. 2015-01-15. М. : Стандартинформ, 2015. 11 с.
2. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов / С. В. Кравченко, С. Б. Нестеров, В. А. Романько, Н. А. Тестоедов, В. И. Халиманович, В. В. Христинич // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). С. 149–175.
3. Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review / M. Tawfikab, X. Tonnelliera, C. Sansoma // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 90. July 2018. P. 802–813.
4. Крат С. А. Повышение эффективности имитаторов солнечного излучения // Сибирский журнал науки и технологий. 2011. № 2 (35). С. 124–127.
5. Двирный Г. В., Шевчук А. А., Двирный В. В. [и др.]. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для назем-

ной отработки космических аппаратов // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 271–280.

6. Шевчук А. А. Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 672–686. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686.

7. Двирный Г. В., Шевчук А. А., Пастушенко О. В. Пути повышения технических и эксплуатационных характеристик имитаторов солнечного излучения для наземной отработки космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (10–13 нояб. 2020, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. Ч. 1. С. 268–270.

8. ГОСТ Р МЭК 60904-9–2016. Приборы фотоэлектрические. Ч. 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения. Введ. 2017-10-01. М. : Стандартиформ, 2017. 12 с.

9. Специализированная светодиодная сборка имитатора внеатмосферного солнечного излучения / А. А. Шевчук, В. В. Двирный, М. С. Майбах и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 4. С. 734–746. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-734-746.

© Пастушенко О. В., Снежко А. А., Двирный В. В.,
Двирный Г. В., Козловский М. С., Шевчук А. А., 2023

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ТРАКТА КАМЕР ЖРД, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ

Г. А. Кирюшкин*, 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

В данной статье рассмотрены особенности конструкций камеры двигателей, которые были изготовлены с помощью 3D-печати и представлены некоторые методы контроля их геометрии.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, аддитивные технологии, камера сгорания.

Введение. В наше время спрос к аддитивным технологиям сильно вырос. Это произошло благодаря существенному сокращению времени производства деталей и узлов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), а значит и снижению себестоимости изделия. Помимо снижения себестоимости аддитивные технологии позволяют оптимизировать конструкции для снижения массы и улучшения газодинамических характеристик изделия.

Возможности аддитивных технологий при производстве изделий ракетно-космической техники открывают большие перспективы: производство деталей, которые невозможно изготовить традиционными технологиями, управление физико-механическими свойствами синтезируемого материала [1] и многое другое.

Крупнейшие машиностроительные компании и научные ведомства уже используют 3D-печать [2]. Несколько лет назад NASA запустили проект Low Cost Upper Stage Propulsion по разработке ЖРД, замыслом которого было ускорение процесса изготовления основных узлов и агрегатов двигателя благодаря использованию аддитивных технологий. В самом начале проекта выяснили, что необходимо все заново сконструировать из-за особенностей новых технологий. В результате этого проекта удалось сильно уменьшить число деталей (рис. 1), так как в конструкцию ЖРД были внесены существенные изменения. Снижение числа деталей было достигнуто благодаря построению целостных конструкций со сложной внутренней структурой за счет печати изделий.

В конструкции камер сгорания ЖРД присутствует множество спаянных профилированных трубок, используемых для протока охлаждающей жидкости, из-за чего ее изготовление становится трудоёмким и очень затратным [3]. Для обеспечения наилучшего охлаждения конструкции камеры ЖРД необходимо использовать медные сплавы, которые обладают высоким коэффициентом теплопроводности по сравнению с никелевыми сплавами. В таблице приведены коэффициенты теплопроводности некоторых медных и никелевых сплавов.

С помощью аддитивных технологий инженеры создали целостную камеру сгорания со сложными внутренними каналами для циркуляции одного из компонентов топлива, минуя различные этапы техпроцесса традиционного производства. Корпус камеры был создан следующим образом: внутренний корпус изготовлен из медного сплава, а внешняя рубашка – из сплава никеля с хромом Inconel 625.

Коэффициент теплопроводности различных сплавов

| Сплав | Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м ² ·°С), при температуре °С | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 600 |
| Ni – Cr (90 % Ni; 10 % Cr) | 17,1 | 18,8 | 20,9 | 22,8 | 24,5 | – |
| Ni – Cr (80 % Ni; 20 % Cr) | 12,3 | 13,8 | 15,6 | 17,1 | 18,8 | 22,4 |
| Нейзильбер (62 % Cu; 15 % Ni; 22 % Zn) | – | 31,2 | 45 | 45 | 48,5 | – |
| Латунь (70 % Cu; 30 % Zn) | – | 129,1 | 143,6 | 147,1 | 147,1 | – |

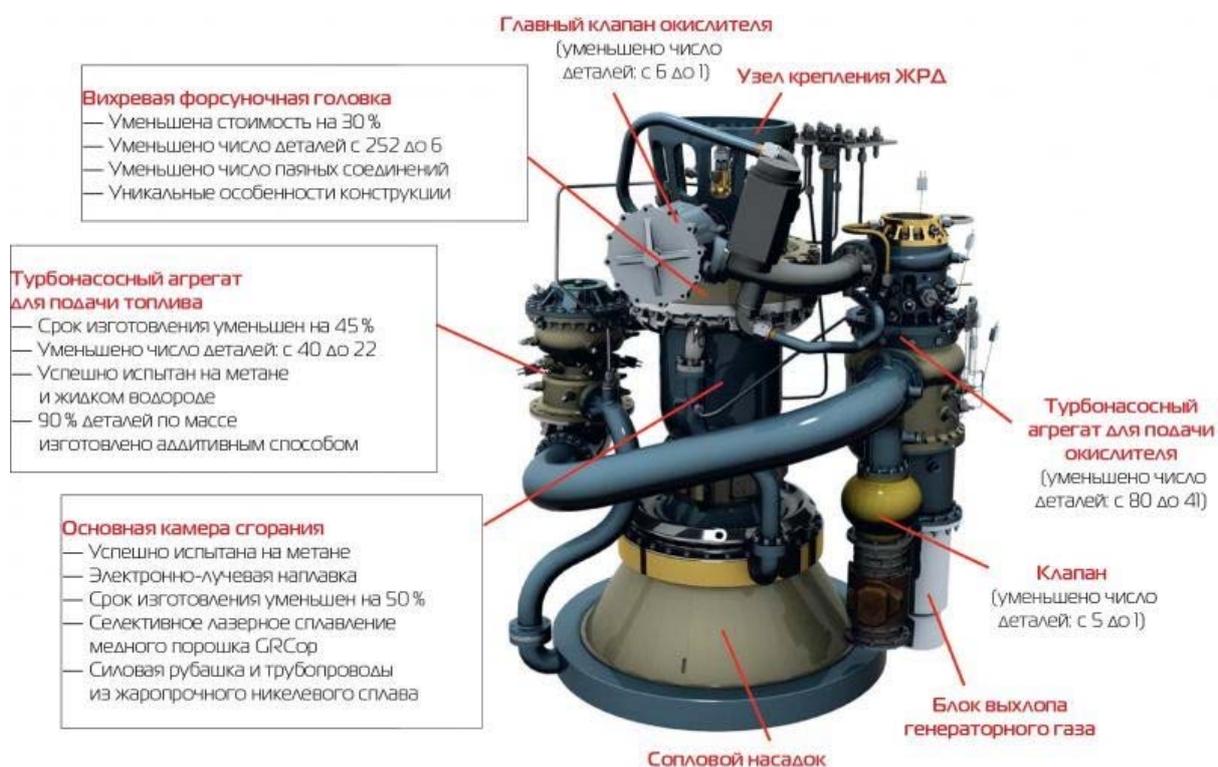


Рис. 1. Демонстратор ЖРД, созданный в проекте LCUSP

При изготовлении камеры использовались 2 технологии аддитивного производства, а именно:

- 1) селективное лазерное сплавление (SLM) для создания внутреннего корпуса;
- 2) электронно-лучевая наплавка (EBF 3) для создания внешней рубашки, которая не-сла силовую нагрузку

В процессе разработки была выявлена и решена проблема свариваемости сплавов внутренней и внешней стенок, сохранения геометрии внутренних каналов в процессе наплавки Inconel 625 на медную стенку. Этого удалось добиться благодаря разработанным математическим моделям нагрева и сплавления материалов с отличающимися друг от друга характеристиками и контролю температуры плавления проволоки из инконеля. Созданная биметаллическая конструкция не имела внутренних напряжений и каких-либо дефектов.

Схема камеры двигателя представлена на рис. 2.

Также для упрощения конструкции и более быстрого создания изделия, можно ограничиться всего одним материалом. Например, так сделали студенты СибГУ им. М. Ф. Решетнева, создав камеру-демонстратор ЖРД малой тяги из алюминиево-кремневого сплава силумин (РС-300) [4].

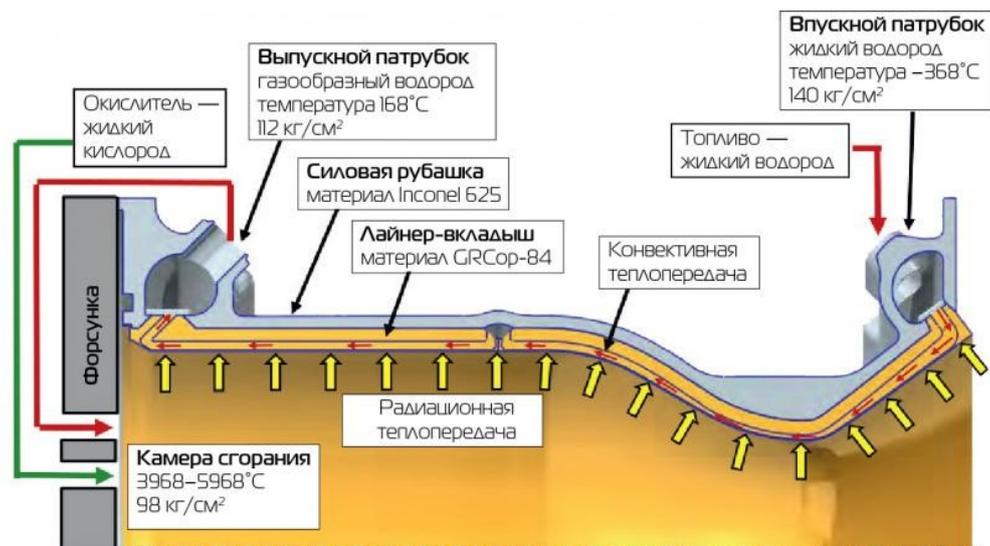


Рис. 2. Схема камеры ЖРД

Ниже представлены рис. 3 и 4 конструкционных схем камер, изготовленных традиционным способом и с помощью аддитивных технологий. Главным отличием является отсутствие сварных и паяных швов, а также меньшее количество деталей у второй схемы.

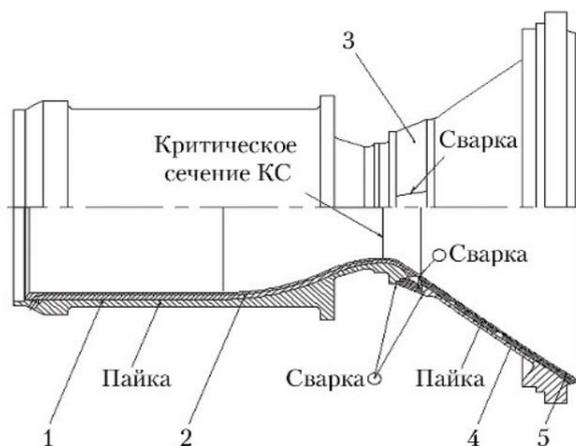


Рис. 3. Традиционная конструкционная схема камеры ЖРД:

1 – рубашка входной части; 2 – внутренняя оболочка входной части; 3 – накладки; 4 – наружная оболочка закритической части; 5 – внутренняя оболочка закритической части

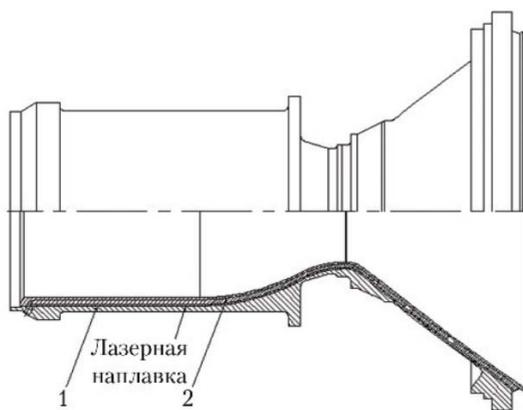


Рис. 4. Конструкционная схема камеры ЖРД, изготовленного с помощью 3D-печати:

1 – наружная оболочка; 2 – внутренняя оболочка

Одной из задач конструкторов является сохранение геометрических характеристик изделия при создании его с помощью 3D-печати. В камере двигателя возникают тепловые потоки от продуктов сгорания, которые в большинстве случаев приводят к перегреву стенки. Чтобы это предотвратить, обычно стенка камеры выполняется двойной, и в зазоре между двумя стенками, который также называют трактом охлаждения, протекает жидкость, отбирающая тепло от стенки. В случае создания камеры нетрадиционными методами геометрия тракта может нарушиться из-за различных факторов, поэтому необходимо проводить дополнительный контроль над этим. Существует несколько неразрушающих методов, позволяющих его осуществлять, например рентгенографический метод. Он позволяет контролировать детали любой формы, обнаруживать скрытые дефекты материалов и определять состояние закрытых деталей, которые невозможно демонтировать для осмотра [5]. Также для проверки каналов охлаждающего тракта можно использовать гидравлический пролив жидкости через них, так авторы статьи [6] провели контроль и выявили, что каждый канал обеспечивает проходимость. Помимо этого конструкцию камеры можно разрезать и осмотреть каналы визуально, такой метод обычно применяют на изделиях для оптимизации режимов печати.

Библиографические ссылки

1. Изготовление деталей камеры сгорания малоразмерного газотурбинного двигателя из интерметаллидного сплава ВКНА с использованием селективного лазерного сплавления / В. Г. Смелов, А. В. Сотов, А. В. Агаповичев, Е. А. Носова // Проблемы и перспективы развития двигателестроения : материалы докладов международной научно-технической конференции, Самара, 22–24 июня 2016 года. Часть 2. Самара : Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 2016. С. 113–114.
2. Зайнудинов А. М., Александров Ю. Б. Перспективы использования 3D-печати в авиастроении // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 5-2(36). С. 64–65.
3. Аддитивные технологии для печати ракет [Электронный ресурс]. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/additivnye-tehnologii-dlya-pechati-raket.html> (дата обращения: 11.02.2023).
4. 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, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Часть 1. Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 205–207.
5. Хамдиев И. Ю., Ещенко Д. И. Применение рентгеновского излучения в авиации // Научные междисциплинарные исследования : сборник статей XIV Международной научно-практической конференции, Саратов, 20 мая 2021 года. Москва: «КДУ», «Добросвет», 2021. С. 15–18.
6. Отработка конструктивных и технологических решений для изготовления опытных образцов внутренней оболочки камеры сгорания многофункционального жидкостного ракетного двигателя с использованием аддитивных технологий / А. Л. Артемов, В. Ю. Дядченко, А. В. Лукьяшко [и др.] // Космическая техника и технологии. 2017. № 1(16). С. 50–62.

© Кирюшкин Г. А., Алексеенко В. В., Шестерня В. И., 2023

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СТЕНДА ДЛЯ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ-ДЕМОНСТРАТОРА МАЛОЙ ТЯГИ

Э. С. Манохина, В. Ю. Журавлев, Р. В. Коваль

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: xim96@inbox.ru

Приведена принципиальная схема учебного стенда для ракетного двигателя-демонстратора малой тяги.

Ключевые слова: аддитивные технологии, стенд, РДМТ.

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 ракетным двигателям малой тяги (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.

Для испытания камеры-демонстратора РДМТ разработан стенд для огневых испытаний, принципиальная электропневмосхема (ЭПС) представлена на рис. 1.

Была разработана электропневмосхема с учетом всех требований безопасности. Пространственно габаритное расположение элементов стенда представлено на рис. 2.

Для обеспечения подачи компонентов спроектированы магистрали, состоящие из баллонов сжатого газа, редукторов давления, электропневмоклапанов.

Для воспламенения используется батарея аккумуляторная, блок питания, блок зажигания.

Управления 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.

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.

Имеется возможность изготовить камеры РДМТ других размеров, особенностью всех камер является их изготовление всего из двух деталей: КД и смесительной головки, что обеспечивается возможностью SLM-печати.

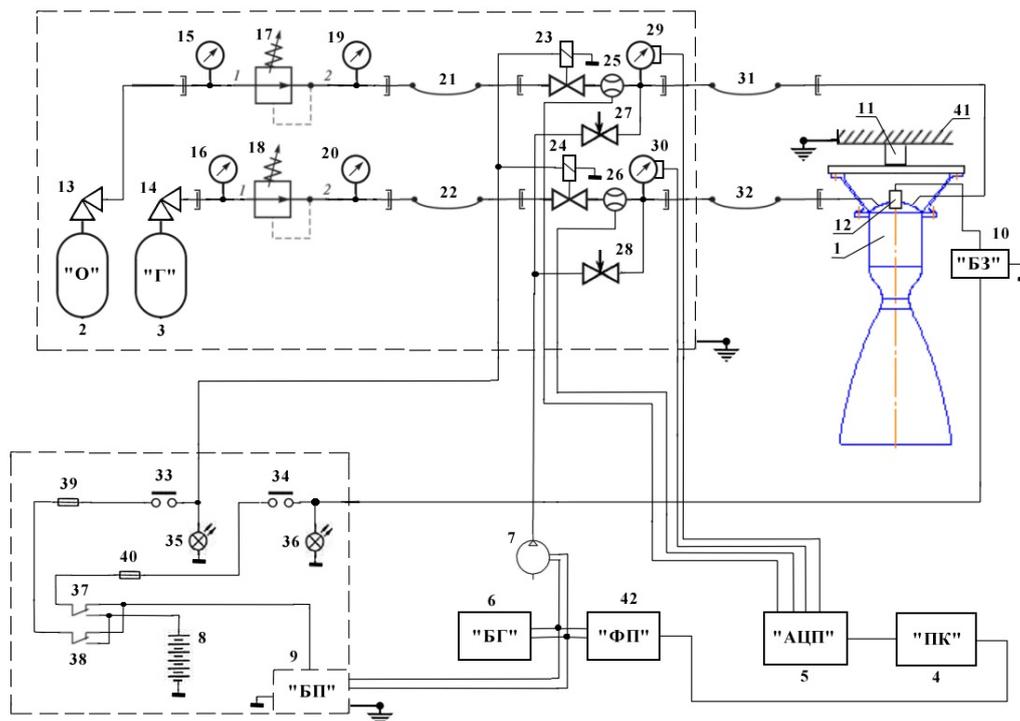


Рис.1 – Электропневмосхема стенда:

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.

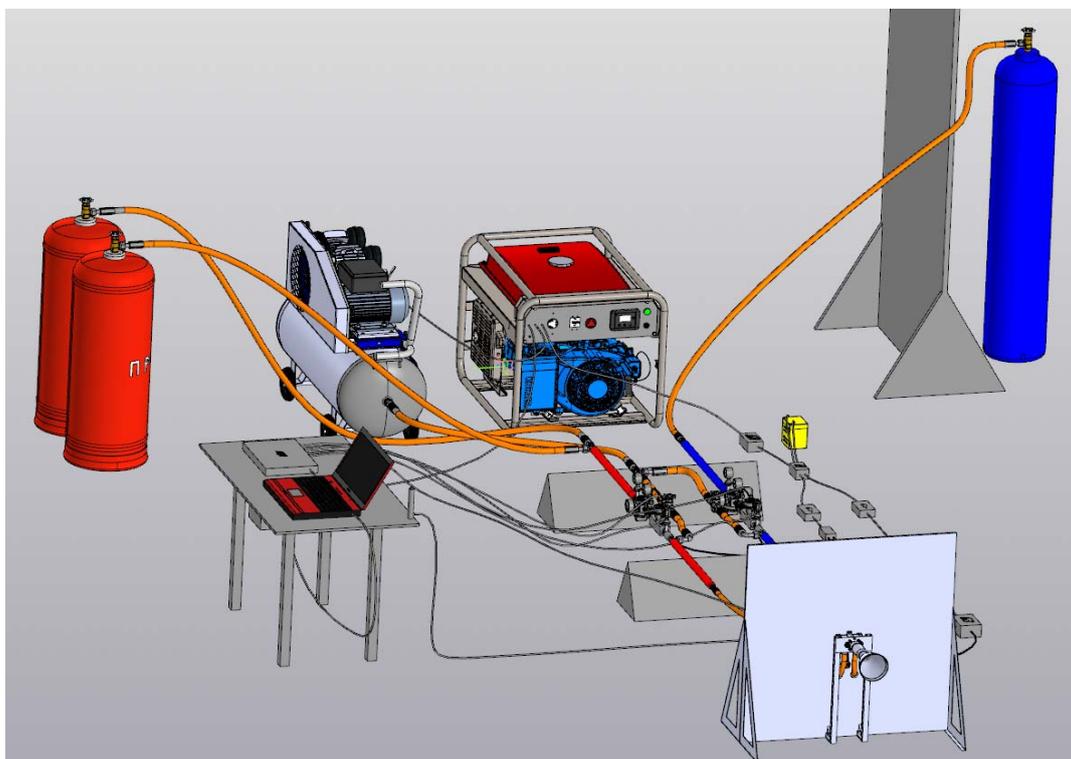


Рис. 2. 3D-модель ЭПС стенда

Для обеспечения безопасности проведения испытаний спроектирован 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.

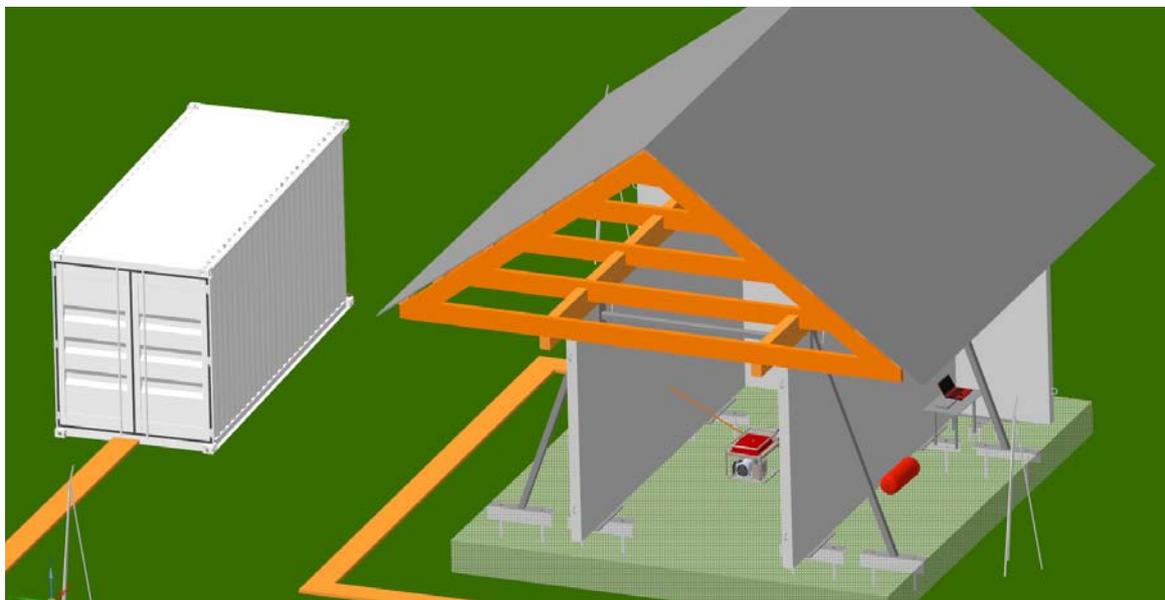


Рис. 3. Конструкция стенда

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.

Такой объем информации 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.

Для качественной оценки результатов испытаний обычно используются различные статические методы, основанные на фиксировании параметров изделий, количестве отказов.

Для всех используемых средств измерений выбираются диапазоны измерений, пороги чувствительности и другие нормированные метрологические характеристики. Принципиальное условие выбора средств измерений состоит в том, что они выполняют свои функции при заданных параметрах в нормативно-технической документации.

В проектировании и разработке камеры и стенда активное принимали студенты технологического инкубатора СибГУ.

В настоящее время разрабатывается программное обеспечение по управлению процессами пуска, останова двигателя и измерения параметров двигателя, а также циклограмма работы двигателя.

В перспективе планируется разработка газогенератора, изготовленного методом SLM-печати для дальнейшей модернизации стенда с возможностью испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги

Библиографические ссылки

1. Шикарев М.А., Манохина Э.С., Журавлев В.Ю. Выбор принципиальной схемы учебно-демонстрационного стенда для автономных испытаний камеры ЖРД малой тяги // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 24–26 февраля 2022 года. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 106–110.

2. Яцуненко В.Г., Назаров В.П., Коломенцев А.И. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей. Красноярск, Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т; Моск. авиац. ин-т, 2016, 248 с.

3. Испытание и обеспечение надежности ракетных двигателей / А.И. Коломенцев, М.В. Краев, В.П. Назаров [и др.]. Красноярск, Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т ; Моск. авиац. ин-т, 2006, 336 с.

© Манохина Э. С., Журавлев В. Ю., Коваль Р. В., 2023

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ КАМЕР РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. И. Шестерня*, В. В. Алексеенко, 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

В данной статье рассмотрены различные камеры двигателей, которые были изготовлены с помощью 3D-печати и их испытания, по которым можно разработать методологию, применяемую для изделий, изготовленных по данной технологии.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, аддитивные технологии, камера сгорания, огневые испытания, испытания на вибрацию, испытания на герметичность и прочность.

Введение. Создание деталей сложных форм для ракетной техники является весьма трудоемким. Так как некоторые изделия невозможно получить с помощью традиционных методов производства, начали активно развиваться аддитивные технологии. Они обладают рядом преимуществ над субтрактивным производством:

- скорость производства изделий;
- возможность применения новых материалов, которые сложно обработать традиционным способом;
- контроль физико-механических свойств синтезируемого материала

Открылась возможность для использования аддитивных технологий при создании камер, турбин и многих других деталей авиационных и ракетных двигателей.

Проведя термодинамический расчет жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) в компьютерной программе и определив размеры камеры сгорания, можно изготовить ее за несколько дней (в зависимости от выбранного материала) и исследовать на стенде, сравнив данные, полученные в программе, с полученными в ходе испытаний.

Из-за особенности применения ракетных двигателей возникают высокие требования к их надежности. В процессе полета ракеты камера сгорания двигателя подвергается определенной нагрузке, которая возникает вследствие давления продуктов сгорания и неравномерного нагрева конструкции. Несмотря на точность вычислительных систем, информацию о надежности двигателей, изготовленных с помощью 3D-печати, можно получить в результате проведения комплекса испытаний.

Важным этапом при проведении испытаний является разработка их методик. В первую очередь применение аддитивных методов производства для деталей ракетных двигателей невозможно без знания механических и физических свойств материалов. Поэтому большое значение имеет определение механических характеристик и структуры металлических материалов деталей, получаемых с помощью 3D-печати [1]. Для этого проводят металлографический анализ и испытания на опытных образцах при различных видах нагрузки.

При разработке комплексной методологии испытаний изделий ракетно-космической техники, изготовленных по технологии 3D-печати, целесообразно использовать результаты исследований отечественных и зарубежных научных организаций. В частности,

известны работы по сравнительному анализу образцов, изготовленных из жаростойкого сплава Инконель 718 методом аддитивной печати. Сравнивая результаты исследований механических свойств данных образцов с образцами, полученными литьем и ковкой, выяснилось, что свойства деталей, полученных SLM методом, превосходят свойства литого образца, но ниже, чем у кованного [2]. Авторы статьи [3] провели исследования материала силумин (PC-300), из которого камера-демонстратор изготовлена на 3D-принтере. Они определили химический состав материала, провели металлографический анализ, испытания на растяжение и твердость образцов и измерили шероховатость поверхности изделия. Данные отличались от справочных, так как образцы были напечатаны из порошкового материала.

В ходе реализации научно-образовательного проекта в СибГУ им. М.Ф. Решетнева были проведены рентгенографический контроль и виброиспытания камеры двигателя (рис. 1), изготовленной из силумина, а также создана методика испытаний на прочность и герметичность. Испытания на вибрацию необходимы для проверки сопротивления камеры к отрицательному воздействию вибраций, которые возникают в ходе эксплуатации изделия [4]. Испытания камеры на прочность нужны для подтверждения ее прочности как важнейшего параметра надежности, а испытания на герметичность позволяют определить локальные течи в самом корпусе камеры. В ходе испытаний на вибрацию команда установила, что изделие успешно их прошло, каких-либо дефектов и повреждений при осмотре не было выявлено. Испытания на прочность и герметичность камера еще не проходила, однако разработка технологического процесса испытаний завершена.

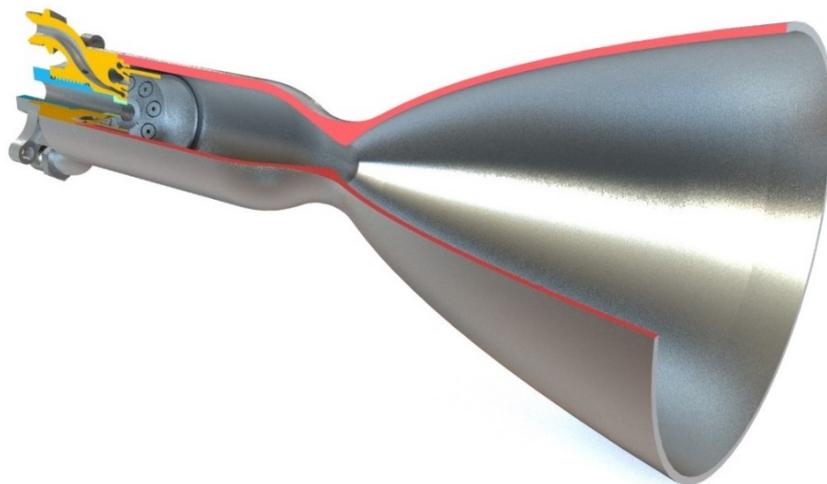


Рис. 1. Камера двигателя, изготовленная с помощью SLM-технологии

Основным методом определения надежности двигателей является проведение огневых (стендовых) испытаний, поэтому в настоящее время различными организациями проводятся исследования и испытания изделий, полученных при помощи аддитивных технологий. В АО ГНЦ «Центр Келдыша» [5] разработали стендовую установку для моделирования смесеобразования в камере сгорания. Смесительная головка камеры и регенеративно охлаждаемое сопло (рис. 2) были изготовлены с применением аддитивных технологий. В результате успешных огневых испытаний были выявлены особенности гидравлики и теплообмена в сопле, а также подтверждена точность методов расчета охлаждения, которые применяются к такому соплу, что позволит повысить достоверность проектировочных расчетов камер маршевых ЖРД в случае изготовления их методами аддитивного производства.



Рис.2. Сопло, изготовленное из Inconel 718 на 3D принтере

Обобщив все вышесказанное, можно сказать, что для проверки надежности ЖРД, камеры которых изготавливаются с использованием 3D печати, следует проводить металлографический анализ и исследования механических характеристик материала, испытания на вибрацию, прочность и герметичность. Также необходимы контроль шероховатости поверхностей, рентгенографический контроль и огневые испытания.

Библиографические ссылки

1. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей / Л.А. Магеррамова, Ю.А. Ножницкий, С.А. Волков [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 3. С. 81–98.
2. Huang, L. Microstructure characteristics and mechanical behaviour of a selective laser melted Inconel 718 alloy / L. Huang, Y. Cao, G. Li, Y. Wang // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9. P. 2440–2454.
3. Контроль качества камеры ракетного двигателя малой тяги, изготовленной методом 3D-печати на лазерном принтере / Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков [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 : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 179–181.
4. Особенности методики виброиспытаний камеры – демонстратора ЖРД малой тяги, изготовленной с использованием аддитивных технологий / И.В. Дергач, И.А. Фесенко, А.А. Фоменко [и др.] // Испытания, диагностика, надежность. Теория и практика : сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 24–26 февраля 2022 года. Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 95–100.
5. Результаты испытаний модельной кислородно-метановой камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя, созданной с использованием методов аддитивного производства / С.В. Мосолов, И.Г. Ложино-Ложинская, Д.М. Позвонков, Д.Ф. Слесарев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2021. № 3(138). С. 60–79.

© Шестерня В. И., Алексеенко В. В., Кирюшкин Г. А., 2023

МЕТОДИКА И ТЕХНОЛОГИЯ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. П. Назаров, К. Ф. Голиковская, Л. П. Назарова

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

Рассматриваются вопросы балансировки роторов турбоагрегатов ракетных двигателей. Представлены особенности проектирования технологического процесса балансировки.

Ключевые слова: балансировка, ракетный двигатель, турбоагрегат.

Работоспособность и надежность двигателей летательных аппаратов (ДЛА) в значительной степени зависят от уровня вибраций, представляющих собой сложные колебательные перемещения механической и пневмогидравлической систем.

Источниками вибраций в процессе работы двигателя в значительной степени являются турбоагрегаты, которые испытывают воздействие циклических нагрузок от вращения неуравновешенных роторов, парциальности газового потока, несоосности вращающихся деталей, овальности посадочных поверхностей опор и т.п. Определяющее влияние на амплитуду и частоту возбуждающих вибрационных сил в системе «ротор-корпус» оказывает неуравновешенный ротор.

С увеличением неуравновешенности ротора вибрации резко возрастают, достигая опасных значений. Они вызывают разрушение подшипников, нарушение герметичности уплотнений, заклинивание вращающегося ротора и в итоге могут привести к аварийному исходу работы двигателя. Вибрации двигателя пилотируемого космического аппарата оказывают вредное физиологическое воздействие на экипаж, приводят к искажению показаний бортовых приборов. Поэтому борьба с вибрациями – актуальная конструкторская и технологическая проблема современного аэрокосмического двигателестроения [1].

В процессе проектирования турбоагрегатов, к которым относятся турбонасосные агрегаты (ТНА) и бустерные насосные агрегаты (БНА), стремятся уменьшить вероятность появления вибраций, выбирая наиболее оптимальные решения в отношении конструкции и технологии изготовления, добиваются весовой симметрии всех вращающихся деталей и сборочных единиц. Однако при производстве и эксплуатации агрегатов возникают условия, нарушающие симметрию и приводящие к появлению неуравновешенности. Для уменьшения неуравновешенности проводят балансировку тел вращения путем изменения их массы или геометрии.

Балансировка ротора является одним из наиболее сложных и ответственных этапов технологического процесса изготовления ТНА и БНА. Способы и методика проведения балансировки, величины допускаемой неуравновешенности скоростного ротора устанавливаются конструкторской и отраслевой нормативной документацией. Для выполнения балансировочных работ требуется специальное технологическое оборудование, высокий профессиональный уровень рабочих и инженерно-технических работников.

Ротор турбоагрегата ЖРД представляет собой упругую систему. При вращении под действием неуравновешенных радиальных сил его вал приобретает упругую деформацию изгиба и совершает вынужденные гармонические колебания.

Реальная конструкция ротора в связи с распределенной массой деталей по продольной оси имеет бесконечное число форм колебаний. При определенных условиях круговая частота собственных колебаний может совпадать с частотой возмущающей силы. Этот режим работы ротора называется резонансным. Соответствующая ему угловая скорость вращения называется критической угловой скоростью вращения ротора.

В зависимости от соотношения между максимальной эксплуатационной и критической угловыми скоростями различают жесткие и гибкие роторы ТНА [2]. Роторы БНА, как правило, являются жесткими.

Жесткими считают роторы, эксплуатационная угловая скорость которых ниже критической угловой скорости. Соответственно, у гибких роторов рабочая угловая скорость превышает критическую. Современные ТНА, для которых характерна тенденция достижения высоких значений угловых скоростей, могут иметь не только жесткие, но и гибкие роторы.

Из анализа силовых параметров неуравновешенного жесткого ротора известно, что основными видами неуравновешенности являются статическая и динамическая, а их частными видами могут быть моментная и квазистатическая неуравновешенности. На рис. 1 изображены схемы различных видов неуравновешенности.

Статическая неуравновешенность определяется параллельным смещением оси ротора относительно его главной центральной оси инерции. Центр масс ротора расположен на расстоянии $\overline{e_{no}}$ от оси. Этот радиус-вектор в балансировочной технике называют эксцентриситетом массы ротора.

Моментная неуравновешенность появляется при пересечении осей в центре масс ротора. Пересекающиеся оси образуют вектор – угол $\bar{\theta}$. Его направление определяет плоскость, в которой лежат пересекающиеся оси. Для векторов малых углов с достаточной точностью можно применять правила векторной алгебры.

Динамическая неуравновешенность возникает при перекрещивании оси ротора и его главной центральной оси инерции в пространстве. В реальных конструкциях роторов ТНА, БНА ЖРД чаще всего встречается именно этот, наиболее общий вид неуравновешенности.

Квазистатическая неуравновешенность появляется при пересечении оси ротора и главной центральной оси инерции не в центре масс.

Количественная мера неуравновешенности – дисбаланс при конструкторских и технологических расчетах – изображается в виде вектора в полярных координатах (рис. 2).

Координатную систему можно представить, как проекцию полярных координат на торце ротора. Центр находится на оси вращения (геометрической оси вала ротора). Длина вектора пропорциональна значению дисбаланса, а угол – его направлению.

Реальный ротор турбоагрегата имеет множество дисбалансов в плоскостях, перпендикулярных оси вращения. Сумму всех векторов дисбалансов называют главным вектором дисбалансов и обозначают символом $\overline{D_{no}}$. В общем случае $\overline{D_{no}}$ является векторной суммой:

$$\overline{D_{co}} = \overline{D_1} + \overline{D_2} + \dots + \overline{D_n}$$

Вектор перпендикулярен оси ротора, проходит через его центр масс и равен произведению массы ротора m_0 на ее эксцентриситет:

$$\overline{D_{co}} = m_0 \overline{e_{co}}.$$

Отношение модуля главного вектора к массе ротора называют удельным дисбалансом. Главный вектор дисбалансов полностью определяет статическую неуравновешенность жесткого ротора. По правилам статики главный вектор дисбалансов можно раз-

ложить на два параллельных вектора, лежащих в параллельных плоскостях, перпендикулярных оси ротора, т.е. заменить его составляющими \overline{D}_{no1} и \overline{D}_{no2} .

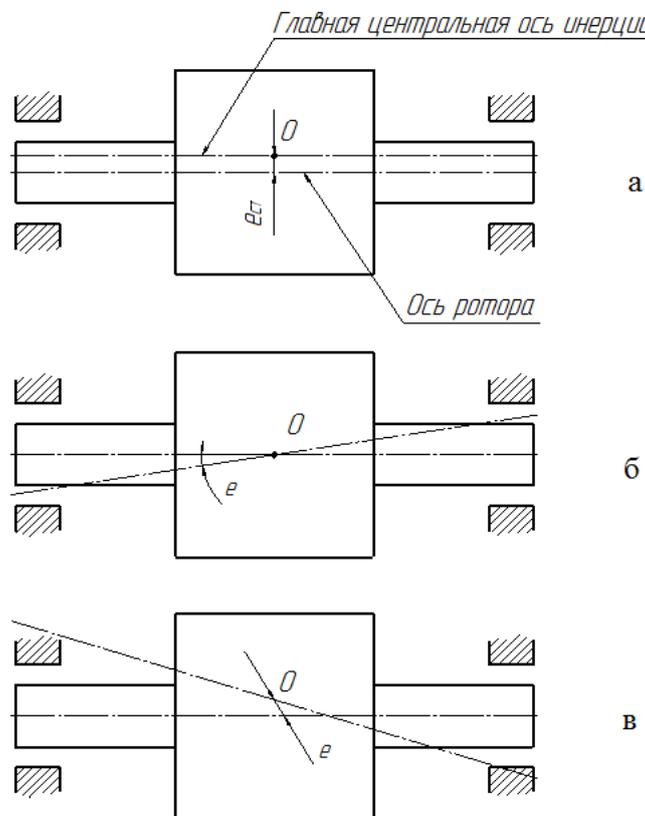


Рис. 1. Виды неуравновешенности роторов:
 а – статическая неуравновешенность; б – моментная неуравновешенность;
 в – динамическая неуравновешенность

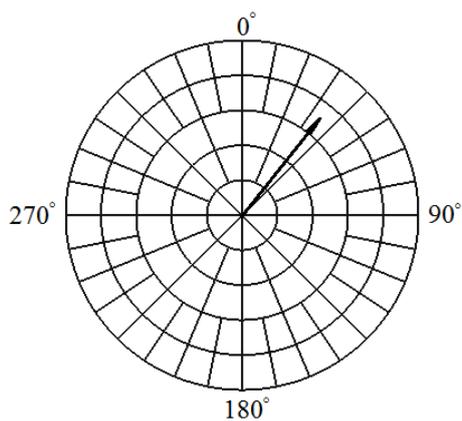


Рис. 2. Вектор дисбаланса в полярных координатах

Геометрическую сумму моментов всех дисбалансов ротора относительно его центра масс называют главным моментом дисбалансов и обозначают символом \overline{M}_D . Он также является векторной суммой:

$$\overline{M}_D = \overline{M}_1 + \overline{M}_2 + \dots + \overline{M}_n.$$

Вектор \overline{M}_D перпендикулярен оси ротора, проходит через его центр масс и равен центробежному моменту инерции жесткого ротора:

$$\bar{M}_D = \frac{1}{2}(J_x - J_z) \sin 2\bar{\theta}.$$

Главный момент дисбалансов полностью определяет моментную неуравновешенность жесткого ротора. Для уменьшения дисбалансов ротора производят корректировку масс. Теоретически ее можно выполнить удалением, добавлением или перемещением масс ротора.

В технологии производства турбонасосных агрегатов ЖРД процесс определения значений и углов дисбалансов ротора и уменьшения величины неуравновешенной массы называют балансировкой ротора.

Технология уравнивания в общем случае включает три этапа:

- выявление неуравновешенности;
- преобразование результатов измерений в параметры технологического метода;
- устранение неуравновешенности.

Каждый из этих этапов может выполняться на специальном оборудовании последовательно или параллельно. Выбор способа устранения неуравновешенности осуществляется при проектировании ТНА и БНА. Технологические рекомендации для конструкторов по обоснованному выбору предусмотрены ГОСТ 22061–76 «Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения» [3].

Однако методические рекомендации стандарта не могут охватить все многообразие конструкций роторов турбоагрегатов. В связи с этим при разработке технологического процесса балансировки широко используется производственный опыт предприятий отрасли.

Выбор технологического метода зависит от конструктивных особенностей ротора, программы выпуска, материалов деталей ротора, технических требований к ротору, определяемых его назначением и условиями эксплуатации, а также возможностей оборудования предприятия, технико-экономических характеристик метода и других факторов.

Для жестких роторов при статической (силовой) неуравновешенности корректировка массы обычно ведется в одной плоскости исправления, при динамической неуравновешенности – в двух (иногда более двух) плоскостях.

Экспериментальные исследования показывают, что любой ротор в общем случае обладает моментно-силовой, т.е. статической и динамической неуравновешенностью. Неуравновешенность ротора может рассматриваться в виде эквивалентной системы с двумя центробежными силами $F_{\text{л}}$ и $F_{\text{п}}$ действующими в двух плоскостях коррекции (условно левой и правой).

Примем за меру сил системы центробежную силу в правой плоскости:

$$F = F_1.$$

Угловое положение силы в левой плоскости $F_{\text{л}}$ будем отсчитывать $F_{\text{п}}$. Тогда неуравновешенность в правой плоскости коррекции будет характеризоваться силой F и углом ($\varphi_1 = 0^\circ$, а в левой – силой $F_{\text{л}}$ и углом φ_e , Исходя из предыдущего условия, примем:

$$F_e = \lambda F,$$

где

$$\lambda = \frac{F_e}{F_1}.$$

Величину главного вектора \bar{A} системы можно найти по соотношению:

$$\bar{A} = F \sqrt{1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos \varphi_{\Lambda}}.$$

Экспериментальные значения $\lambda = \frac{F_e}{F_1}$ лежат в пределах (0,1–3,5), что свидетельствует о перемещении главного вектора вдоль оси вращения на некоторую величину относительно центра массы полностью уравновешенного ротора.

Графические зависимости изменения величины модуля главного вектора и главного момента неуравновешенных сил представлены на рис. 3.

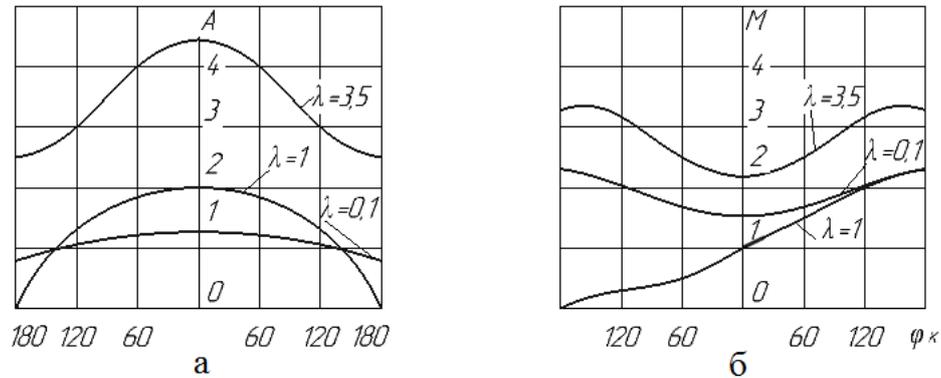


Рис. 3. Графики изменения величины модулей:
а – изменение главного вектора неуравновешенных сил;
б – изменение главного момента неуравновешенных сил

На рис. 3, а показано изменение главного вектора, характеризующего силовую (статическую) составляющую общей неуравновешенности при $\lambda = 0,1; 1,0; 3,5$ и различных взаимных угловых положениях сил в плоскостях коррекции.

Величина динамической (моментной) составляющей общей неуравновешенности ротора при сохранении положения главного вектора в центре массы ротора может быть определена по формуле

$$M = L \sqrt{[F\lambda \sin(\varphi_e - \varphi_c)]^2 + \left[\frac{A}{2} \cdot \frac{\lambda \cos(\varphi_e - \varphi_c) - \cos \varphi_c}{\lambda \cos(\varphi_e - \varphi_c) + \cos \varphi_c} \right]^2},$$

где L – расстояние между плоскостями коррекции; φ_n – угол между F_n и главным вектором \vec{A} системы.

На рис. 3, б приведен график, показывающий изменение величины M в зависимости от λ и φ_e . При построении этого графика используется соотношение:

$$\operatorname{tg} \varphi_c = \frac{\sin \varphi_e}{\cos \varphi_e + \frac{1}{\lambda}}.$$

Анализ этих графиков позволяет дать рекомендацию о наиболее рациональной последовательности устранения неуравновешенности. Первая стадия устранения неуравновешенности должна быть направлена на достижение равенства $F_e = F_1$, т.е. достижение $\lambda = 1,0$.

На этом же этапе надо стремиться развернуть F_e и F_n в одну диаметральную плоскость с одинаковым направлением, если предпочтительна остаточная статическая неуравновешенность, и с противоположным направлением F_e и F_n если желательно, чтобы остаточная неуравновешенность была динамической. На последующих стадиях надо одновременно уменьшать обе силы до допустимого значения.

Основным элементом технологического процесса балансировки, также как и любого технологического процесса, является операция. Она представляет собой часть технологического процесса, выполняемую на одном рабочем месте.

Операцию расчлняют на переходы – определенные действия рабочего. К ним относятся: пуск станка, измерение значения дисбаланса в первой плоскости коррекции, установка и снятие детали и т.п.

Балансировка ротора может быть выполнена за одну операцию или же за несколько операций. Эффективность выполнения i -го перехода или операции устранения неуравновешенности может быть оценена степенью уменьшения неуравновешенности δ_i – отношением оставшейся неуравновешенности к начальной:

$$\delta_i = \frac{F_i}{F_{i-1}}.$$

Степень уменьшения неуравновешенности зависит от точности определения значения и угла дисбаланса, а также точности уменьшения корректирующей массы. Для современных балансировочных станков считается приемлемым снижение начального дисбаланса в 15...20 раз. При больших начальных дисбалансах может потребоваться несколько предварительных операций. Количество операций тем больше, чем выше точность балансировки.

Каждая операция выполняется с погрешностью, характеризующейся угловым расположением $\Delta\varphi$ и погрешностью величины уравнивающей центробежной силы F_N по сравнению с необходимой для устранения фактической неуравновешенностью F_{i-1} .

Погрешность по величине силы может оцениваться соотношением:

$$\delta_N = \frac{F_N}{F_{N-1}}.$$

Между δ_i , δ_N , e , $\Delta\varphi$, существует зависимость:

$$\delta_i = \sqrt{(\delta_N - \cos \Delta\varphi)^2 + \sin^2 \Delta\varphi}.$$

График этой зависимости приведен на рис. 4. Он позволяет дать технологические рекомендации для разработки процесса устранения погрешности.

Если невозможно выдерживать точно угол, т.е. вести процесс с $\Delta\varphi = 0^\circ$, то целесообразно стремиться к $\delta_N < 1$. Чем больше угловая погрешность, тем меньше должна быть величина δ_N . При погрешности по углу, приближающейся к прямому углу, снижение начальной неуравновешенности получается лишь при δ_N , близких к нулю. И наоборот технологические методы, изменяющие первоначальную массу ротора относительно малыми «порциями» за одно воздействие (луч лазера, «взрывная» проволока и др.), допускают значительные угловые погрешности для отдельных воздействий.

Процесс устранения неуравновешенности следует вести так, что бы пересечение линий δ_N с линиями $\Delta\varphi$ (рис. 4) оказывалось в области рационального процесса. Для каждого значения существует предельно допустимая погрешность по углу $\Delta\varphi_{10aa}$. При больших угловых погрешностях неуравновешенность будет увеличиваться до величины

$$0,5 \delta_N = | \cos \Delta\varphi_{10aa} |$$

При одинаковых угловых погрешностях лучший эффект дают процессы, обеспечивающие условие $\delta_N < 1$.

С учетом этих рекомендаций осуществляется разработка технологических процессов балансировки и ведется проектирование балансирующего оборудования.

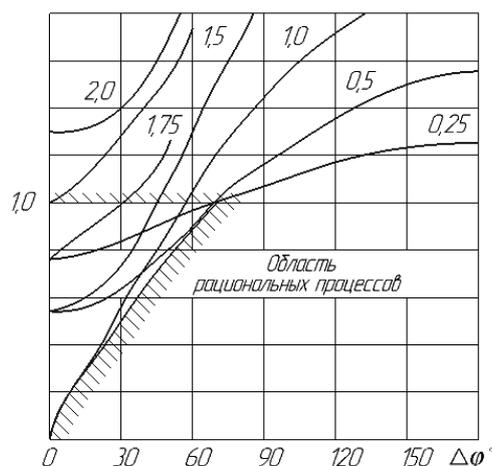


Рис. 4. График эффективности процесса уравнивания

При разработке технологических процессов балансировки выполняют комплекс взаимосвязанных работ [4]:

- подбор типового технологического процесса;
- определение последовательности и содержания технологических операций;
- выбор средств технологического оснащения;
- назначение режимов работы оборудования;
- нормирование и тарификация работ;
- выбор средств механизации и автоматизации элементов технологических процессов;
- организация производственных участков; оформление маршрутно-технологической документации.

На стадии технологической подготовки производства ведется отработка технологичности конструкции ротора, уточняются его основные показатели: класс ротора, класс точности балансировки, количество плоскостей коррекции и др.

Библиографические ссылки

1. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей / Г.Г. Гахун, В.И. Баулин и др. М. : Машиностроение, 1989.
2. Левит М.Е., Рыженков В.М. Балансировка деталей и узлов. М. : Машиностроение, 1986.
3. ГОСТ 22061–76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения. М. : Изд-во стандартов. 1984. 136 с.
4. Назаров В.П. Балансировка роторов турбонасосных агрегатов. Красноярск : СибГАУ, 2017. 108 с.

© Назаров В. П., Голиковская К. Ф., Назарова Л. П., 2023

РАЗРАБОТКА ПРИВОДА СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ТИПА CUBESAT

И. В. 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: nazarov12000@mail.ru

В данной статье повествуется о проблемах и возможностях, связанных с разработкой привода на солнечной батарее для малых космических аппаратов, а также достижений, достигнутые в этой области.

Ключевые слова: летательный аппарат (ЛА), солнечная батарея, система энергообеспечения, источники питания, солнечные элементы, ресурса космического аппарата, привод солнечной батареи.

В последние годы освоение космоса растет беспрецедентными темпами. Небольшие космические аппараты, или CubeSats, набирают популярность благодаря своей экономичности и универсальности. Эти космические аппараты, как правило, имеют ограниченные возможности питания, полагаясь на батареи или солнечные панели для удовлетворения своих энергетических потребностей. Однако растет интерес к разработке приводов на солнечных батареях для небольших космических аппаратов, чтобы увеличить их дальность полета и возможности.

Разработка привода на солнечных батареях для малых космических аппаратов в последние годы стала быстро развивающейся областью в связи с растущим спросом на более эффективные и надежные источники питания. Использование солнечной энергии в качестве источника питания имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными источниками энергии, такими как возобновляемость и экологичность.

Ученые и инженеры работают над разработкой легких и эффективных солнечных панелей и двигательных установок, которые могут быть интегрированы в CubeSats. Одной из главных проблем при разработке привода на солнечных батареях для небольших космических аппаратов является ограниченная площадь поверхности, доступная для солнечных панелей. Это означает, что используемые солнечные панели должны быть высокоэффективными и легкими, а также способными выдерживать суровые условия космоса.

В данной статье рассмотрены проблемы и возможности, связанные с разработкой привода на солнечной батарее для малых космических аппаратов, а также достижения, достигнутые в этой области.

Одной из основных проблем при разработке привода на солнечной батарее для малых космических аппаратов является ограниченное доступное пространство. Небольшие космические аппараты часто проектируются компактными и легкими, с ограниченным пространством для источников питания и других компонентов.

Использование солнечных панелей в качестве источника питания может быть проблематичным, так как они могут быть громоздкими и занимать на поверхности малого спутника ценное пространство [1].

Привод от солнечной батареи обеспечивает компактную и эффективную альтернативу, обеспечивая больше места на космическом корабле для других важных компонентов.

Еще одной проблемой при разработке привода на солнечной батарее является обеспечение его надежности и долговечности. Небольшие космические аппараты (см. рисунок) часто используются в суровых условиях, таких как глубокий космос, где они подвергаются воздействию высоких уровней радиации, экстремальных температур и других факторов окружающей среды [2].



Формат малого искусственного спутника Земли для исследования космоса типа CubeSats

Привод солнечной батареи должен быть способен выдерживать эти условия и продолжать обеспечивать энергией космический корабль. Чтобы преодолеть эту проблему, инженеры и ученые работают над разработкой новых материалов и технологий, которые могут обеспечить большую защиту от суровых условий в космосе. Например, использование радиационно-стойких материалов, таких как карбид кремния, может помочь повысить долговечность привода солнечной батареи.

Несмотря на эти проблемы, разработка привода на солнечной батарее для малых космических аппаратов открывает многочисленные возможности. Одним из наиболее существенных преимуществ привода на солнечной батарее является его масштабируемость. Небольшой космический корабль может быть сконструирован таким образом, чтобы питаться от солнечной батареи любого размера, в зависимости от конкретных потребностей миссии. Такая масштабируемость обеспечивает большую степень индивидуализации и гибкости при проектировании малых космических аппаратов, что позволяет создавать космические аппараты для широкого спектра задач, от научных исследований до коммерческих операций.

Разработка привода на солнечной батарее также может произвести революцию в области исследования космоса. Благодаря надежному и эффективному источнику питания небольшие космические аппараты могут эксплуатироваться в течение более длительных периодов времени, что позволяет проводить более обширные и детальные исследования нашей Солнечной системы и за ее пределами. Кроме того, привод от солнечной батареи может позволить отправлять небольшие космические аппараты в ранее недоступные места, такие как глубокий космос, где традиционные источники энергии были бы нежизнеспособны [3].

В дополнение к разработке приводов на солнечных батареях, также важно учитывать методы диагностики и поломки конструкций. Это важнейшие аспекты конструкции любого космического аппарата, и они играют решающую роль в обеспечении надежности и безопасности космического аппарата. Главной проблемой является ограниченная

площадь поверхности для солнечных панелей и сложным характером двигательной установки, существуют также риски, связанные с эксплуатацией приводов на солнечных батареях для небольших космических аппаратов. Одним из потенциальных рисков является возможность разрушения конструкций, которые могут произойти по целому ряду причин, таких как столкновения с космическим мусором или усталость материала.

Методы диагностики используются для обнаружения и диагностирования любых проблем или неисправностей, которые могут возникнуть во время эксплуатации космического аппарата. Эти методы могут включать анализ телеметрических данных, бортовые датчики и наземные системы мониторинга. Используя методы диагностики, инженеры могут обнаружить потенциальные проблемы на ранней стадии и предпринять корректирующие действия до того, как они станут более серьезными.

Поломка конструкции, на примере привода, может происходить из-за ряда факторов, включая усталость, коррозию и разрушение материала.

Если привод на солнечной батарее космического аппарата сломается, это может иметь серьезные последствия. Способность космического аппарата маневрировать и поддерживать свою позицию в космосе будет нарушена, и он может потенциально стать «запертым» или даже столкнуться с другими объектами в космосе. Кроме того, научная миссия космического аппарата может быть серьезно ослаблена, поскольку он может не иметь возможности собирать необходимые данные или проводить необходимые эксперименты без работающей системы управления движением. Но если привод на солнечной батарее космического аппарата не только сломается, но и потерпит коррозию, это может вызвать еще более серьезные проблемы.

Коррозия может возникнуть в результате воздействия космической среды на системы управления движением космического аппарата, что может привести к необратимым повреждениям в конечном итоге, например, может привести к деградации производительности системы управления движением космического аппарата, что может привести к снижению скорости или точности его маневрирования. Это может привести к потере контроля над космическим аппаратом и его потенциальному столкновению с другими объектами в космосе.

Чтобы предотвратить поломки конструкции, конструкторы космических аппаратов должны убедиться, что космический аппарат изготовлен из высококачественных материалов, способных выдерживать суровые условия космоса. Они также должны проводить регулярные проверки и техническое обслуживание, чтобы гарантировать сохранение структурной целостности космического аппарата на протяжении всего срока его службы, а также иметь запасные планы на случай возможных отказов. В случае поломки конструкции необходимо использовать методы диагностики для выявления первопричины и определения соответствующего курса действий. Это может включать анализ телеметрических данных, проведение считывания показаний бортовых датчиков и мониторинг космического аппарата с земли.

В контексте приводов на солнечных батареях для малых космических аппаратов методы диагностики и поломки конструкций особенно важны. Солнечные паруса и ионные двигатели – это сложные двигательные установки, которые требуют тщательного контроля и технического обслуживания для обеспечения их надлежащей работы. В случае солнечных парусов любое повреждение паруса может привести к потере тяги, в то время как ионные двигатели требуют точного контроля процесса ионизации для поддержания их эффективности.

Чтобы решить эти проблемы, исследователи разрабатывают новые методы диагностики и материалы, способные выдержать суровые условия космических путешествий. Например, некоторые ученые разрабатывают самовосстанавливающиеся материалы, которые могут восстанавливаться при повреждении. Другие изучают новые методы

диагностики, такие как использование искусственного интеллекта для анализа телеметрических данных в режиме реального времени.

Также, чтобы снизить риск поломок конструкции, конструкторы космических аппаратов должны провести тщательные испытания и анализ материалов, используемых в конструкции привода на солнечной энергии. Они также должны учитывать воздействие космического мусора и других факторов окружающей среды на структурную целостность космического аппарата [4].

Методы диагностики не менее важны для обеспечения надежной работы приводов на солнечных батареях для малых космических аппаратов. Любые неисправности или проблемы с двигательной установкой должны быть быстро обнаружены и диагностированы, чтобы предотвратить дальнейшие повреждения и обеспечить безопасность космического аппарата.

В заключение, разработка привода на солнечной батарее для малых космических аппаратов представляет собой как проблемы, так и возможности. Преодолев эти трудности, можно реализовать преимущества использования привода от солнечной батареи, обеспечивая более эффективный и надежный источник питания для небольших космических аппаратов. С постоянным развитием технологий разработка привода на солнечных батареях сыграет решающую роль в будущем космических исследований и технологий, а также окажет значительное влияние на коммерческий и промышленный секторы. Однако важно учитывать потенциальные проблемы, связанные с проектированием и эксплуатацией такой системы, включая ограниченную площадь поверхности для солнечных панелей, сложный характер двигательной установки и риск поломок конструкции. Благодаря тщательному планированию, тестированию и мониторингу инженеры могут преодолеть эти проблемы и разработать надежный и эффективный привод на солнечных батареях для небольших космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Романов А. А., Романов А. А. Основы космических информационных систем : учебное пособие. М. : ИКИ РАН ; МФТИ, 2019. 292 с.
2. Фортескью П., Суайнерд Г., Старк Д. Разработка систем космических аппаратов. М.: Альпина Паблишер, 2015. 765 с.
3. Абламейко С. В., Саечников В. А., Спиридонов А. А. Малые космические аппараты: пособие для студентов факультетов радиофизики и компьютер. технологий, мех.-мат. и геогр. Минск : БГУ, 2012. 159 с.
4. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://jurnal.vniiem.ru/en/text/114/15.pdf/> (дата обращения: 03.02.2023).

© Назаров И. В., 2023

ОГНЕВЫЕ И ХОЛОДНЫЕ СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е. Д. Чуева, Е. А. Федорова*, Е. А. Демин, С. В. Харлашина

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

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

*E-mail: bioomkat@mail.ru

В статье рассмотрены теоретические основы и принципы стендовых испытаний жидкостных ракетных двигателей. Изложена краткая историческая справка создания жидкостных ракетных двигателей. Указаны внешние факторы, влияющие на жидкостный ракетный двигатель. Рассмотрено определение стендовых испытаний, устройство стендовых испытательных комплексов, приведены сведения об основных элементах испытательных стендов. Изложены особенности огневых и холодных испытаний жидкостных ракетных двигателей, их стендовые испытания.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, космический аппарат, испытание, стендовое испытание, огневые стендовые испытания, холодные стендовые испытания.

Стендовые испытания – это испытания изделий, проводимые для условий близких к эксплуатационным.

В ходе стендовых испытаний решаются вопросы обеспечения надежности проектируемых и отработываемых элементов и в целом двигателя. Эти условия представляют собой совокупность сочетаний различного рода факторов, обуславливающих конструктивные, технологические и эксплуатационные характеристики ЖРД. Их большое число и разнообразие создают необходимость разработки комплекса программ для наземной (стендовой) отработки, требующих имитации всех натуральных условий эксплуатации, включая полетные. Однако следует иметь в виду, что предельно технически возможная имитация эксплуатационных условий при наземных испытаниях также требует значительных затрат на создание испытательных стендов, способных в достаточной мере имитировать реальные условия эксплуатации [1].

Интенсивная наземная отработка ЖРД и широкое использование технических решений, обеспечивающих в необходимой мере имитацию реальных условий эксплуатации, позволяют значительно сократить объем дорогостоящих летных испытаний.

Основные элементы испытательного стенда:

1. Топливная система стенда состоит из двух частей: системы горючего и системы окислителя.

2. Система наддува топливных баков состоит из баллонов высокого давления, регулирующих органов, трубопроводов, датчиков, реле давлений, запорной арматуры.

3. Тягоизмерительное устройство. Основное назначение двигателя – создание тяги заданной величины в течение определенного промежутка времени. Для каждого летательного аппарата имеется своя программа изменения тяги на траектории его полета, что позволяет при минимальной массе летательного аппарата достичь заданной конечной скорости полета.

4. Система управления. На современных стендах системы управления выполняются по блочному принципу. Каждый блок является самостоятельной функциональной единицей. Надежность систем управления должна укладываться в пределы. $P = 0,9996...0,9998$.

5. Система измерения – это важнейший элемент испытательного стенда. Высокие требования к достоверности оценки характеристик двигателя при испытании, основывающейся на измерении широкой номенклатуры параметров, определяющих как стендовые условия, так и работу двигателя, обуславливают необходимость измерения и контроля в процессе испытаний нескольких сотен (а иногда и тысяч) физических величин [1].

Среди стендовых испытаний различают огневые и холодные. Отличаются они отсутствием или наличием реакции сгорания компонентов рабочего тела. Наиболее сложным является огневые стендовые испытания ЖРД.

Огневые испытания двигателя (агрегата) – это испытания со сжиганием в нем топлива. Основная цель огневых испытаний заключается в получении информации о состоянии испытываемого изделия и процессах, протекающих в нем. Огневые стендовые испытания ЖРД обладают целым рядом специфических особенностей, которые обусловлены задачами, программами и методами испытаний.

Основными требованиями, предъявляемыми к стендовому оборудованию, можно назвать следующее:

1. Обеспечение идентичности или динамического подобия характеристик систем питания двигателя компонентами топлива, включая соответствие инерционных, волновых и гидравлических характеристик питающих магистралей.

2. Обеспечение соответствия законов изменения входных давлений в двигатель, давлений в камере сгорания и газогенераторе, времени подхода или поступления компонентов топлива к основным агрегатам.

3. Обеспечение изменения в широких пределах температуры компонентов топлива и конструкции, входных давлений, регулирования секундных расходов и тяги.

4. Для двигателей верхних ступеней достижение степени соответствия высотных условий (разрежения окружающей среды, отсутствия конвективного теплообмена между элементами конструкции и средой, влияния солнечной радиации).

5. Обеспечение идентичности прохождения команд по времени.

6. Применение конструкции узлов крепления двигателя и его агрегатов, соответствующей штатной.

7. Удобство и возможность проведения испытаний в возможно короткие сроки.

8. Экономичность испытаний.

9. Максимальная автоматизация и упрощение программы испытаний.

10. Наличие систем нейтрализации промышленных стоков.

11. Наличие однотипной измерительной аппаратуры.

Последнее требование имеет целью исключение возможности появления ошибок при сравнении и определении контролируемых параметров ЖРД за счет разнотипности аппаратуры, различия характеристик датчиков и методик их пересчета [2].

Арматура стендов должна допускать аварийное выключение двигателя и прекращение подачи компонентов топлива с нескольких автономных пультов, дублированных между собой и находящихся в различных помещениях, соединенных средствами связи. Наряду с этим необходимо иметь автоматическую систему аварийного выключения, реагирующую на резкое повышение температуры в испытательных боксах, на падение давления в подводящих магистралях и другие недопустимые изменения.

По назначению испытываемых двигателей стенды подразделяют на следующие виды:

1. Стенды для испытания двигателей первых ступеней ракет с прямым измерением тяги.

2. Стенды для испытаний двигателей верхних ступеней ракет с косвенным измерением тяги.

3. Стенды для испытания двигателей верхних ступеней ракет с прямым измерением тяги. При этом имитируют высотные условия работы двигателя, что обеспечивает необходимую степень расширения в сверхзвуковой части его сопла.

Успех огневых испытаний ЖРД в значительной мере зависит от уровня организации их подготовки и проведения, квалификации персонала испытательного комплекса, наличия высокоэффективного испытательного оборудования и средств измерений, а также других факторов [2].

Последовательность подготовки проведения огневых стендовых испытаний можно представить в виде следующих друг за другом основных этапов:

1. Составление планов проведения испытаний. Основным документом, устанавливающим плановые показатели проведения испытаний по конкретному ЖРД, является план-график испытаний. В плане-графике указываются: вид испытаний, наименование двигателя и предприятия-изготовителя изделия, срок представления образцов на испытания, адрес испытательного комплекса, сроки проведения огневых испытаний, обработки материалов испытаний и выдачи оценки результатов испытаний и заключения.

2. Разработка программы испытаний. Программа испытаний в общем случае содержит указания: общие положения и условия, последовательность и методы испытаний, перечень регистрируемых при испытаниях параметров и метрологические требования к системам их измерения, номенклатуру определяемых показателей и характеристик испытываемого двигателя, методику обработки материалов и оценки результатов испытаний, соответствующую техническим условиям на испытываемый ЖРД.

3. Разработка методик проведения испытаний. Методика испытаний является основным документом, определяющим технологические процессы подготовки и проведения огневых испытаний конкретного типа двигателя по заданной программе. Она предусматривает определение показателей и характеристик, установленных в программе испытаний, а также всех необходимых для этого воздействующих факторов и условий испытаний.

4. Разработка технологической документации. Технологическая документация на испытания разрабатывается на основании конструкторской документации с учетом конструктивных особенностей стенда и стендового оборудования, достигнутого уровня автоматизации процессов измерения и управления двигателем и элементами стенда. Уровень технологической документации зависит от категории огневых испытаний. Технологическая документация, предназначенная для проведения огневых испытаний в серийном производстве, состоит из технологических процессов подготовки двигателя и стендового оборудования и систем к работе, проведения испытаний и обработки двигателя после них.

5. Подготовка оборудования и средств измерений. Этот этап предусматривает подготовку имеющихся, а при необходимости проектирование и изготовление вновь востребованных средств испытаний [3].

Большинство узлов и агрегатов ЖРД работают в условиях, не связанных непосредственно с процессом горения топлива. В первую очередь это относится к элементам систем подачи, а также управления и регулирования ЖРД. Отработка этих элементов в значительной степени может быть проведена в лабораторных условиях с помощью автономных холодных испытаний. Проведение холодных автономных испытаний позволяет уменьшить объем испытаний полноразмерных двигателей, что существенно сокращает затраты и сроки отработки вновь создаваемых ЖРД, делает процесс отработки контроля качества элементов двигателя более безопасным, позволяет во многих случаях заменить уникальное испытательное оборудование более простым и надежным, чем это возможно на двигателе.

На стендах для холодных испытаний ЖРД выполняют гидравлические проливки топливных затворов, смесительных головок и инжекторов, проверку герметичности и прочности его элементов, регулировку двигателя на заданные расходы компонентов.

Стенд для холодных испытаний даёт возможность проводить холодных испытаний двигателя следующих видов:

1. Гидравлические проливки трубопроводов, инжекторов, контроллеров, клапанов, трактов, охлаждения камер сгорания и газогенераторов, позволяющие определить фак-

тическое сопротивление отдельных частей конструкции и принять к сведению его при расчете параметров настройки двигателя, оценить равномерность участков диспергирования топлива по поперечному сечению камеры. Пропливы в большинстве случаев производятся под водой, а полученные данные пересчитываются затем на натуральный компонент топлива и рабочий уровень расхода по формуле.

2. Испытание насосов, целью которых является определение мощностных, кавитационных и напорных характеристик, используемых для настройки двигателя и проверки качества серийных насосов, а также для оценки конструктивных изменений в насосе в процессе их опытной отработки. При определении параметров в качестве рабочего тела используется, как принято вода.

3. Испытания турбин, проводимые как с целями исследования, так и для определения реальных характеристик производства турбин. Последние необходимы при расчете параметров регулировки двигателя. Автономные испытания турбин можно проводить на натурном газе, но чаще всего применяют макетные рабочие тела – воздух или исключительно подобранный газ, например фреон.

4. Испытания по отработке и тестированию механизмов систем управления и регулирования, в процессе которых проводится проверка их функционирования в пределах установленного ресурса или количества включений, определение и настройка регулировочных характеристик, исследование влияния различных внешних факторов на их работоспособность. Данные испытания можно проводить как на натуральных, так и на модельных рабочих телах.

5. Прочностные испытания узлов и приборов, которым подвергают значительное число элементов. Для замкнутых объемов проводят статические испытания методом гидропрессовок. Диски турбин и крыльчатки насосов подвергаются динамическим испытаниям на специальных стендах при повышенной частоте вращения. У группы элементов двигателя проверяют вибрационные характеристики [4].

В заключении можно отметить, что ЖРД является важной частью космического аппарата и ракетно-космической техники в целом. В целях выявления дефектов ЖРД проводят огневые и холодные стендовые испытания. Холодные предшествуют огневые и проводятся на заводе-изготовителе, в то время как огневые на полигоне. Во время холодных испытаний проверяют толерантность ЖРД к экстремально низким температурам. Огневые испытания являются крайне сложными и ресурсно-затратными. Во время их проведения проверяют состояния процессов, протекающих в ЖРД. Эти испытания наглядно показывают готовность к эксплуатации ЖРД в реальных условиях.

Библиографические ссылки

1. Гидродинамические испытания жидкостного ракетного двигателя [Электронный ресурс] <https://spravochnick.ru/file/scientific-article/616adbd3-a0f5-4b6a-a878-996605e13b9b/?title=Гидродинамические%20испытания%20жидкостного%20ракетного%20двигателя> (дата обращения: 11.02.2023).

2. Особенности стендовых испытаний криогенных жидкостных ракетных двигателей разгонных блоков [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-stendovyh-ispytaniy-kriogennyh-zhidkostnyh-raketnyh-dvigatelay-razgonnyh-blokov/viewer> (дата обращения: 11.02.2023).

3. Особенности испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-ispytaniy-zhidkostnyh-raketnyh-dvigatelay-maloy-tyagi/viewer> (дата обращения: 11.02.2023)

4. Огневые и холодные испытания [Электронный ресурс] URL: <https://studfile.net/preview/8773635/page:3/> (дата обращения: 11.02.2023).

БАЛАНСОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ В МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЛОПАТОЧНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ

В. В. Черненко, Д. В. Черненко

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: 2887722@mail.ru

Применение балансовых испытаний для усовершенствования процесса проектирования высокоэффективных турбонасосных агрегатов космической техники представляет собой сложный процесс. Повышенный интерес к проблематике математического представления процессов переноса определяется теоретической значимостью и прикладными аспектами, в том числе, для проектирования и интенсификации работы тепло- и массообменных аппаратов в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: центробежный насос, межлопаточный канал, пространственный пограничный слой; баланс мощностей, напор.

Основное в развитии ракетно-космических и авиационных систем заключается в вопросе перевода их на инновационные пути развития, а также более активном использовании современных технологий в космической сфере. Задачи обеспечения целевых эксплуатационных показателей решаются в последовательной детерминации (причинно-следственной связи) по всему эксплуатационному циклу технической системы: обоснование тактико-технических требований; разработка технического задания на НИОКР; эскизное проектирование; разработка КД и ТД; доводочные испытания и производство. Даже незначительная ошибка на этапе проектного прогноза может многократно увеличить стоимость следующих этапов или прекратить проект [1; 2] Проектирование современных ракетных двигателей включает в себя разработку, проектирование и оптимизацию турбонасосного агрегата (ТНА), который отвечает за стабильную подачу компонентов топлива в камеру ЖРД, и в состав которого входят центробежные насосы, которые чаще всего используются в составе современных ракетных и авиационных двигателей. Использование ТНА позволяет предварительно увеличить давление топлива перед вводом его в топливную систему (насос подкачивающего типа), а также подать топливо внутрь камеры сгорания [3].

Проблеме энергосбережения в настоящее время уделяется повышенное внимание, при этом немаловажным пунктом является вопрос повышения КПД насосного оборудования. Энергопотребление и высокий экологический класс являются показателями качества насоса [4].

Существующие теоретические подходы к решению этих задач практически всегда являются полуэмпирическими – с использованием экспериментально полученных коэффициентов. При этом одной из основных проблем является переход от моделирования элементарных актов переноса к описанию процессов на промышленном контактном устройстве с учетом масштабного перехода. Решение задачи о расчете пространственного пограничного слоя в рабочем колесе в упрощенной постановке не всегда давало удовлетворяющие практику результаты. От решения этой задачи зависят сроки, затраты при проектировании промышленных аппаратов и эффективность их работы.

В настоящее время остается актуальной задачей создание малорасходных центробежных насосов, удовлетворяющих высоким энергетическим и эксплуатационными характеристикам, несмотря на разработанные в большом количестве исследовательские работы и различные методики проектирования, которые используются в ракетостроении.

Для того, чтобы повысить энергетические характеристики центробежного лопаточного нагнетателя, необходимо правильно определять распределения энергии в межлопаточном канале рабочего колеса [5].

Результаты исследований и рекомендации по проектированию изложены во многих классических и относительно современных работах. Теплоэнергетические и двигательные установки летательного аппарата – основной динамический элемент, использующий в рабочем цикле тепло-, массо- и энергообменные процессы, и, в основном, определяющий эксплуатационные характеристики. Широкое распространение в практике получило проектирование на основе анализа, базирующегося на серии проверочных расчетов течения в проточной части исследуемых объектов и соответствующей направленной коррекции ее формы и геометрии лопаточных венцов [6; 7].

Баланс мощностей – специальный баланс, который посредством системы показателей характеризует выражение закона сохранения энергии. Методы балансовых испытаний центробежного насоса включают в себя: измерение мощности суммарных и механических потерь рабочего колеса с дальнейшим выделением мощности гидравлических потерь из общей суммы с механическими. Одновременное измерение мощностей суммарных потерь и механических потерь колеса на рабочем режиме насоса при помощи измерения крутящего момента на диске, который имитирует внутреннюю торцевую поверхность насоса. Данный метод позволяет более полно выявить недостатки насоса за счет увеличения точности и достоверности результатов испытаний, основанные на анализе этих недостатков, и разработать меры по усовершенствованию насоса. Балансовые испытания, определяющие величины разных видов потерь энергии в насосе на различных режимах его работы, могут быть использованы при разработке новых современных устройств и для модернизации уже существующих. Именно баланс мощностей является единственным экспериментальным способом, определяющим частные составляющие. Остальные методы – интегральные [8].

В связи с тем, что суммарная потеря мощности в колесе, в том числе, механических потерь колеса при трении жидкости о торцевую поверхность корпуса и гидравлических потерь (потери на трение жидкости в каналах колеса), диссипируется в тепловую энергию, величина ее определяется известным выражением [3; 8; 9].

Для реализации балансовых испытаний был создан визуализационный стенд, на котором определяются энергетические параметры малорасходных центробежных насосов с требуемыми эксплуатационными параметрами, необходимыми для верификации разрабатываемых аналитических методик, учитывающих особенности течения в проточных частях систем подачи жидкостных ракетных двигателей и систем терморегулирования космических аппаратов.

Для построения баланса мощностей центробежного насоса во всём диапазоне изменения расхода \dot{V} необходимые энергетические характеристики приводятся в табличном виде или в виде зависимостей (функции полинома) полезной $N_{\text{пол}} = f(\dot{V}_n)$, затраченной $N_{\text{затр}} = f(\dot{V}_n)$ мощностей и напора центробежного насоса $H_n = f(\dot{V}_n)$ от объемного расхода \dot{V} через насос. Полиномиальная форма представления характеристик значительно облегчает дальнейшую расчётную обработку результатов балансовых испытаний.

Для экспериментальной оценки определения суммарных потерь в режиме максимального КПД проводят специальные расчеты балансовых испытаний и составление баланса мощности насоса.

Таким образом, баланс эффективной мощности насоса будет определяться выражением

$$N_{\text{пол}} = N_{\text{затр}} - (N_{\text{гт}} + N_{\text{г}} + N_{\text{ут}} + N_{\text{мех}}^{\text{ст}} + N_{\text{мех}}^{\text{кол}}),$$

где $N_{\text{пол}}$ – полезная мощность насоса; $N_{\text{затр}}$ – затраченная мощность; $N_{\text{гт}}$ – мощность, расходуемая на гидравлическое торможение; $N_{\text{г}}$ – гидравлические потери в проточной части насоса; $N_{\text{ут}}$ – мощность, на потери с утечками рабочей жидкости; $N_{\text{мех}}^{\text{ст}}$ – потери в местах контакта со статорными частями – опоры, уплотнения; $N_{\text{мех}}^{\text{кол}}$ – мощность механических потерь [2].

Определение мощности гидравлических потерь с учётом мощности потерь гидравлического торможения будет конечным этапом в построении баланса энергии центробежного малорасходного насоса.

В результате балансовых испытаний будут построены кривые зависимостей гидравлического, объемного, механического видов КПД, а также линии теоретического напора от расхода жидкости по колесу. Мощность, снимаемая с двигателя, лишь частично преобразуется в полезный эффект, а остальное рассеивается в виде потерь. Мощность, получаемая насосом от двигателя, расходуется на гидравлические, объемные и механические потери, и только часть этой общей энергии эффективно используется на транспортирование жидкости.

Результаты данного исследования используются для оптимизации числа лопаток в рабочем колесе насоса.

Библиографические ссылки

1. Беленький А. Н., Карасев Д. В., Тихонова Н. А. Развитие современной ракетно-космической отрасли: роль научно-технических инноваций. Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2016. № 20 (124). С. 124–127.
2. 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.
3. Черненко Д.В. Гидродинамика центробежных лопаточных нагнетателей энерго-силовых установок летательных аппаратов : дис. ... к.т.н. Красноярск, 2005. 167 с.
4. 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.
5. Савин Л. А., Григорьев С. В., Шахбанов Р. М. Обоснование возможностей повышения энергетических характеристик центробежных насосов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 7-2. С. 122–127.
6. Дейч М. Е. Газодинамика решеток турбомашин. М. : Энергоатомиздат, 1996. 528 с.
7. Расчетное исследование течения в осецентробежном компрессоре авиационного ГТД / Л. Г. Бойко, Е. С. Барышева, А. Е. Демин, О. Н. Дрынов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. Т. 17. № 4(57). С. 29–37.
8. Патент RU 2217724 С2 Российская Федерация, МПК G01M15/00 F04D29/00, Способ балансовых испытаний центробежного колеса / Краев М.В., Кишкин А.А., Мелкозёров М.Г., Черненко Д.В., Жуйков Д.А. 27.11.2003. Заявка № 2001104120/06 от 12.02.2001.
9. Zuev A.A., Nazarov V.P., Arngold A.A., Petrov I.M. The method of the disk friction determining of low mass flow centrifugal pumps // Siberian Journal of Science and Technology. 2019. Т. 20. № 2. С. 219–227.

КОНСТРУКЦИЯ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ – ДЕМОНСТРАТОРА МАЛОЙ ТЯГИ, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ю. Ю. Степанищев, В. В. Зуев, Д. А. Коровин, Н. А. Беккер, Р. В. Коваль

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

При разработке и изготовлении ракетного двигателя малой тяги – демонстратора при помощи аддитивных технологий большое внимание уделяется его испытаниям, в том числе стендовым, так как данная технология только осваивается в ракетно-космической технике России и нуждается в детальном изучении поведения материалов под действием различных нагрузок.

Ключевые слова: стендовые испытания, ракетный двигатель малой тяги, аддитивные технологии.

Развитие и внедрение аддитивных технологий производства является одним из приоритетных направлений научно-технологического прогресса в ракетно-космической промышленности. В связи с высокой сложностью и принципиальной новизной данных технологий, на предприятиях отрасли, а так же в научно-образовательных учреждениях проводится большой объём научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Предприятия ракетно-космической области России проявляют повышенный интерес к использованию аддитивных технологий для производства корпусных деталей и двигательных установок.

Определяющими факторами перехода с традиционного способа производства на аддитивные технологии, выступающими в качестве основных критериев их выбора, являются тенденции на сокращение затрат производства, короткий производственный цикл, значительное сокращение времени технологической подготовки производства для новых изделий, возможность использования принципиально новых конструкторско-технологических решений, высокий коэффициент использования материала, снижение трудоёмкости, а также улучшение массово-габаритных характеристик летательных аппаратов. При разработке и изготовлении новых изделий, имеющих сложную форму остро стоит проблема выявления различных недоработок конструкции при создании первого опытного образца. При традиционном способе изготовления изделий или прототипов затрачивается от нескольких недель до нескольких месяцев, что в свою очередь заметно замедляет производственный цикл изделия и его дальнейшую доработку в связи с отсутствием новых опытных образцов и возможной необходимостью изготовления новой оснастки. Однако применение аддитивных технологий способно значительно упростить этот процесс за счёт значительного сокращения производственного цикла изделия и ненужностью создания дополнительной оснастки. Данный способ позволяет в короткие сроки создавать реальные физические модели изделий, что способствует выявлению и устранению дефектов, позволяет скорректировать дальнейший процесс проектирования, провести доработку, а также провести прочностные или другие виды испытаний [1].

С этой целью в Сибирском государственном университете был разработан и изготовлен ракетный двигатель малой тяги – демонстратор (РДМТ), изготовленный методом 3D-печати на SLM-принтере и работающий на несамовоспламеняющихся компонентах топлива: газообразном кислороде O_2 и сжатом метане CH_4 . Камера сгорания и смесительная головка напечатаны из жаропрочного металла инконель 718.

Однако на этапе проектирования в большинстве случаев невозможно провести анализ всех конструкторских решений, влияющих на работоспособность и надёжность ракетных двигателей, в связи с чем разработка РДМТ невозможна без проведения целого комплекса испытаний, в том числе наземных огневых стендовых испытаний, по результатам которых, двигательная установка (ДУ) должна показать высокую степень надёжности и свою работоспособность, для введения её в эксплуатацию или внесения корректировок в конструкцию [2].

Выбор схемы стенда с использованием данной топливной пары обусловлен доступностью и безопасностью в рамках учебно-конструкторской деятельности, пара метан и кислород создают высокий удельный импульс, что позволяет использовать её для работы в импульсных режимах и многократных запусках, а так же исходя из экономических соображений. Общий вид стенда изображён на рис. 1.

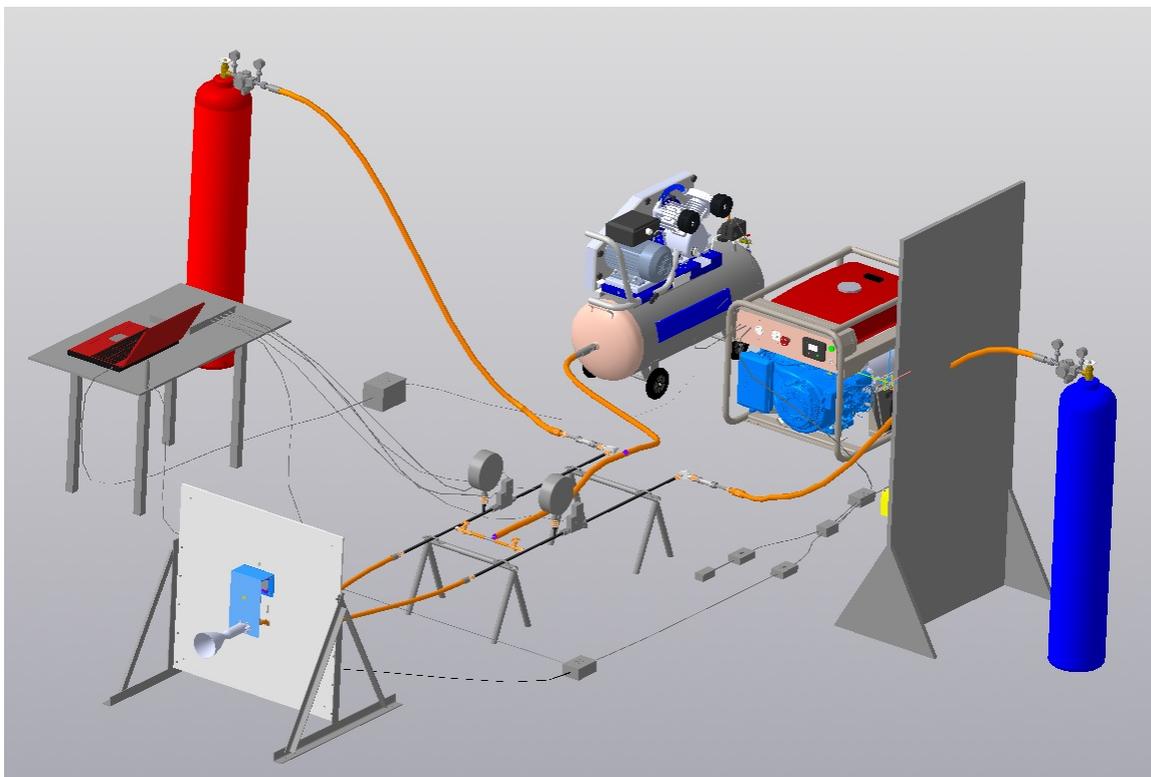


Рис. 1. Общий вид стенда

Стенд для огневых испытаний представляет собой совокупность нескольких отдельных систем, необходимых для проведения испытаний, обеспечения безопасности условий проведения испытаний, управления режимами работы ДУ и автоматикой, а так же получении точных данных о работе ДУ в системе единого времени. В него входят:

– система подачи компонентов топлива. Система подачи топлива для стенда состоит из двух частей: системы подачи окислителя и системы подачи горючего. Конструктивно данные системы выполнены раздельно в баллонах окислителя и горючего, а так же к ней предъявляются требования по: герметичности систем, применению материалов, не вступающих в реакцию с компонентами топлива, а так же исключаящими искрообра-

зование в ходе работы стенда и хранение необходимых запасов топлива, для проведения испытаний. В неё входят: два баллона высокого давления с газообразным кислородом и газообразным метаном, магистрали для подачи компонентов топлива, выполненные из нержавеющей стали и газовые редукторы.

– система зажигания компонентов топлива в камере сгорания состоящая из блока электропитания и свечи зажигания.

– система измерений. Данная система является важнейшей, при проведении стендовых испытаний, так как именно от результатов измерения широкой номенклатуры параметров ДУ определяются как условия проведения стендовых испытаний, так и работа двигателя. В неё входят: тягоизмерительное устройство, датчики давления, датчики расхода компонентов и датчики температуры.

В связи с этим система измерений должна выполнять функции визуального контроля основных параметров ДУ и стенда, дистанционное измерение по заданной программе, сохранения информации на носителях, а так же обеспечивать высокую точность и надёжность средств измерения и иметь высокую помехозащищённость средств её измерения

– система управления предназначена для: автоматического запуска, изменения режимов работы и останова; автоматического контроля за некоторыми основными параметрами ДУ, при достижении критических значений подаёт сигнал, а так же обеспечивает, в случае необходимости, аварийный останов ДУ; автоматического управления клапанами магистралей и поддержания заданных давлений; ручного управления элементами стенда двигателя при выполнении подготовительных и заключительных операций [3].

– система безопасности. Взрыво- и пожаробезопасность стенда заключается разделением стенда на отсеки: камеры двигателя; баллонов с кислородом; баллонов с метаном; магистралей; управления; оборудования пожаротушения, а так же использование обратных клапанов и управление экстренным останомом. Вид стенда на местности изображён на рис. 2.

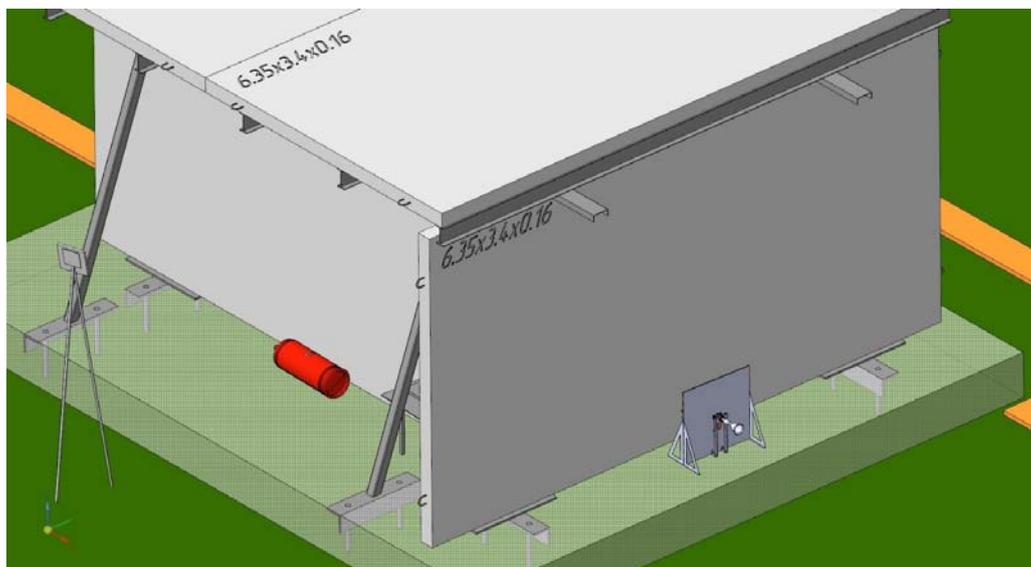


Рис. 2. 3D-модель стенда на местности.

Таким образом, в данной работе описана конструкция разрабатываемого стенда и основные требования, предъявляемые к её системам. В дальнейшем поставлены цели по сборке стенда и проведению наземных огневых испытаний РДМТ-демонстратора на полигоне, для проверки заявленных характеристик ДУ и его надёжности.

Библиографические ссылки

1. 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 : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 208–210.
2. Особенности испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги / В. П. Назаров, В. Ю. Пиунов, В. Г. Яцуненко, Д. А. Савчин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 339–354. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-339-354.
3. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / В. Г. Яцуненко, В. П. Назаров, А. И. Коломенцев ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. 248 с.

© Степанищев Ю. Ю., Зуев В. В., Коровин Д. А.,
Беккер Н. А., Коваль Р. В., 2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЯГИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Д. В. Шемет, И. А. Батранюк, Р. В. Коваль
Научный руководитель – В. Ю. Журавлев

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: diana-s.99@mail.ru

Рассмотрена система измерения тяги и спроектирована оснастка для испытаний ракетных двигателей, изготовленных методом аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, тягоизмерительное устройство, измерение тяги, ракетный двигатель.

В связи с возникновением аддитивных технологий и активное их введение в производственную среду возникает необходимость измерений различных характеристик объектов, полученных методом SLM (селективного лазерного спекания). В рамках научно-образовательного проекта «Проектирование, изготовление методами аддитивных технологий и испытания ракетного двигателя малой тяги, работающего на экологически чистых компонентах топлива» возникает необходимость измерения реактивной силы с достаточной точностью.

По результатам расчетов в системах автоматизированного проектирования была смоделирована конструкция камеры ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) (2) для газообразных компонентов топлива: горючее – метан, окислитель – кислород. Технологически двигатель был выращен из двух частей отдельно, при отработанном режиме печати порошка. Первая часть – смесительная головка, вторая – камера двигателя. После механической и химической обработки поверхностей составные части проходили сборку путем сварочных операций в среде защитного газа аргона. Сварные швы испытывались на герметичность.

Объект исследования: Г-образная пластина.

Проблема: определение максимально допустимых нагрузок г-образной пластины, исходя из заявленных характеристик выбранного материала и исходных геометрических размеров пластины.

Решение проблемы: проведение расчета.

Целью данной работы является исследование Г-образной пластины и разработка оптимальной системы для измерения практической силы тяги. К такой системе предъявляются следующие требования: компактность, простота конструкции, и, как следствие, возможность транспортировки.

Для измерения тяги РДМТ необходима универсальная конструкция как для активной фазы испытаний, так и для градуировки показаний приборов. (3) Важность выбора конструкции при испытаниях на тягоизмерительном устройстве (ТИУ) обосновывается возникающими силами инерции, которые дают существенные погрешности при оценке динамических характеристик. (4) Если частоты импульсного режима испытываемого РДМТ совпадают с собственной частотой ТИУ, в результате возникающий резонанс влияет на увеличение величины погрешности. ТИУ с изгибающим элементом (рис. 1) помогает обеспечить превышение собственной частоты над чистотой импульсного режима.

Тягу P , создаваемую РДМТ, будем определять как силу реакции, с которой упругие элементы ТИУ воздействуют на испытуемый двигатель, препятствуя его перемещению при работе в направлении действия тяги.

1. ТИУ с горизонтальным расположением двигателя и упругим элементом:

Упругий элемент под действием тяги P деформируется, и двигатель перемещается в горизонтальном направлении, изгибая упругий элемент на величину ε . Измерение величины деформаций можно зафиксировать при помощи стандартизированных тензометрических, емкостных и индуктивных преобразовательных элементов.

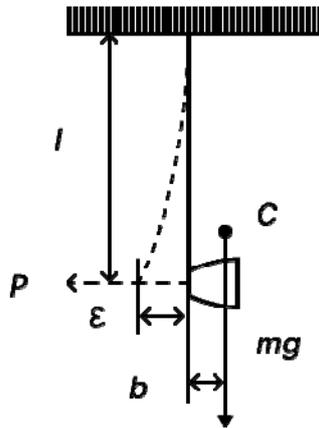


Рис. 1. ТИУ с изгибающим элементом

Изгибающий момент определяется по формуле

$$Pl = bmg.$$

Перемещение конца защемленной балки с учетом теоремы Кастилиано

$$\varepsilon = \frac{\partial \Pi}{\partial P} = \frac{Pl^3}{3EJ} = \frac{mgl^3}{3EJ},$$

где m – суммарная масса двигателя и балки; E – модуль упругости первого рода; J – осевой момент инерции сечения балки.

Тогда, собственная частота балки, найдется как

$$f_{0\text{ТИУ}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\varepsilon}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{mgl^3}{3EJ}}.$$

2. ТИУ с вертикальным расположением двигателя:

Данный вариант предполагает установку двигателя на шарнирном маятнике, который под действием тяги P отклоняется на некоторый угол до момента уравнивания упругой системой F с характеристикой: $k = \psi(\Delta\varepsilon)$.

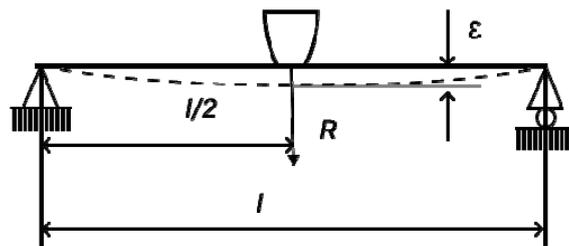


Рис. 2. ТИУ вертикальным расположением двигателя

Балка прогибается на величину ε под действием тяги двигателя, и значение деформации может быть зарегистрировано.

Для ТИУ с вертикальным расположением РДМТ, перемещение средней точки балки составит

$$\varepsilon = \frac{Pl^3}{48EJ} = \frac{mgl^3}{3EJ}.$$

Тогда, частота собственных колебаний подвижной части ТИУ, в данном случае

$$f_{0\text{ТИУ}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\varepsilon}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{48EJ}{Pl^3}}.$$

Формулы частот собственных колебаний подвижных частей ТИУ, в дальнейшем будем использовать при анализе с целью оптимизации процесса измерения тяги РДМТ при конструкторской сборке и проектировании циклограммы испытаний с учетом возможных колебаний при запуске двигателя.

В данной научной работе было принято решение использовать измерительный мост – мост Уитстона, предназначенного для определения электрического сопротивления (рис. 3). Наш случай подразумевает использование тензометрических датчиков (тензорезисторы). Такое решение обосновано выбором конструктивной схемы ТИУ и целью исследования.

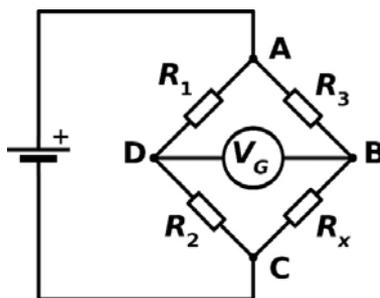


Рис. 3. Схема моста Уитстона:
 R_1, R_2, R_3, R_x – «плечи» моста; AC – диагональ питания;
 BD – измерительная диагональ;

R_x – элемент, фиксирующий изменения напряжений; R_1, R_2 и R_3 – элементы, сопротивления (Ом) которые известны; V – вольтметр (В).

При определении деформированного состояния профиля пластины были выполнены тензометрические измерения. На рис. 4 изображена испытываемая Г-образная пластина с тензодатчиками.

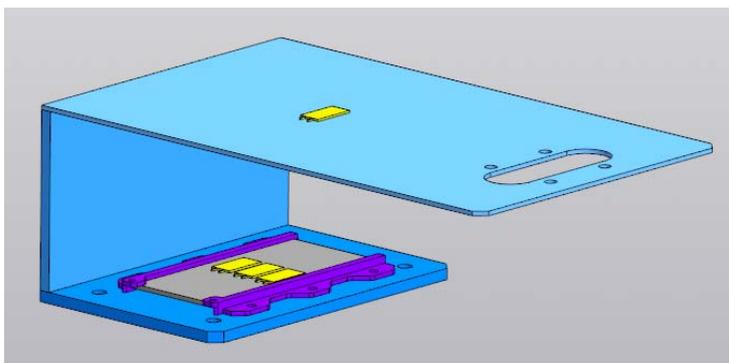


Рис. 4. Г-образная пластина

На оболочке пластины были закреплены тензорезисторы в количестве 4 штук, для определения величины напряжения. Группа из 3-х тензорезисторов была расположена на нижней поверхности пластины, а на исследуемом участке, деформируемого элемента, был закреплен отдельный тензорезистор.

При исследовании напряженно-деформированного состояния пластины были применены тензодатчики типа КФ 5П1-10-800-Б-23. Для наклейки рекомендуется использовать клей ВС-350 или циакрин Э0.

Сопротивление тензорезисторов составляет $199,6 \pm 0,2$. Тензорезисторы, использованные при изучении работы пластины, предназначены для нержавеющей стали.

Выбор материала пластины обоснован длительным сроком службы, высокой устойчивостью к образованию коррозии, стойкостью к механическим повреждениям, а также простотой обработки.

Поверхность пластины перед установкой тензорезисторов прошла обработку по зачистке поверхности и обработке шероховатости. Питание тензодатчиков производилось силой тока равной $0,02$ А.

Схема подключения тензодатчиков, базирующаяся на теории моста Уитстона, представляет собой схему с одним активным тензодатчиком, при котором измеряется деформация при растяжении или сжатии. Тензодатчик в данном случае фиксируется на деформируемую пластину вдоль оси растяжения-сжатия, при этом деформация изгиба не должна быть значительной.

Выбор данной схемы подключения обусловлен тем, что элемент под действием тяги деформируется, и крюк с гирями, имитирующий двигатель, перемещается в вертикальном направлении, при этом нижняя часть пластины остается зафиксированной болтовым соединением.

Таким образом, на основании описываемых в статье данных, была использована следующая методика расчета:

Геометрические исходные данные исследуемой пластины были выбраны исходя из экспериментального значения тяги – 20 Н.

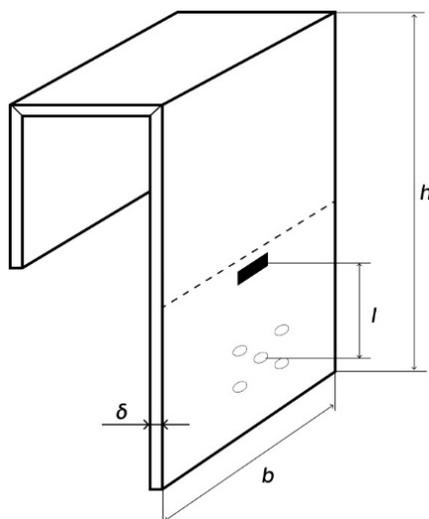


Рис. 5. Схема Г-образной пластины

$b = 150$ мм, $l = 80$ мм, $\delta = 2$ мм, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\Delta R = 0,2$ Ом, $I = 0,02$ А, $k = 2,19$.

Толщина пластин: 5 мм (выбрана из условий жесткости).

Толщина рабочей области: 2 мм.

Максимальные характеристики двигателя: от 200 до 50 Н.

Давление максимальное: $1 \pm 0,4$ МПа.

Расчет:

Допустимые напряжения:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{M_{\text{изг}}}{W_x}, \quad (1)$$

где W_x – момент сопротивления; $M_{\text{изг}}$ – изгибающий момент.

Изгибающий момент:

$$M = P \cdot l. \quad (2)$$

Момент сопротивления поперечного сечения пластины:

$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}. \quad (3)$$

Из закона Гука

$$\sigma = \varepsilon E. \quad (4)$$

Так как деформации в данном случае зависят от измеряемого напряжения в электрической цепи, то

$$U = IR, \quad \Delta U = I \Delta R, \quad (U + \Delta U) = I(R + \Delta R), \quad (\Delta U = I \Delta R) \approx \Delta \varepsilon.$$

Тогда значение деформаций:

$$\varepsilon = I \Delta R \cdot k = 0,02 \cdot 0,2 \cdot 2,19 = 0,00876.$$

Из формул (1), (2), (3) и (4) выражаем тягу, измерение которой может обеспечить электрическая составляющая тягоизмерительного устройства:

$$P = \varepsilon E \cdot \frac{bh^2}{6} \cdot \frac{1}{l} = 0,00876 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot \frac{0,15 \cdot 0,002^2}{6 \cdot 0,08} = 2190 \text{ Н}.$$

Из формул (1), (2), (3) выражаем тягу, измерение которой могут обеспечить механическая составляющая тягоизмерительного устройства:

$$P = \sigma_{0,2} \cdot \frac{bh^2}{6} \cdot \frac{1}{l} = 250 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,15 \cdot 0,002^2}{6 \cdot 0,08} = 312,5 \text{ Н}.$$

Таким образом, и электрическая составляющая тягоизмерительного устройства и механическая обеспечивают измерение планируемой величины тяги двигателя 200 Н.

Следующим этапом стало проектирование оснастки для градуировки тензодатчиков и последующая сборка конструкции ТИУ (рис. 6). К элементам оснастки относятся такие элементы как крюк, штырь с отверстием и основой, стол для установки г-образной пластины.

Пластина 5 представляет собой деталь г-образной формы и устанавливается на стол 1, являющийся частью оснастки. Ее неподвижность обеспечивается путем присоединения пластины к столу болтами. В верхней части имеется отверстие, предусмотренное для установки крюка 3, где крюк, опускаемый в отверстие, устанавливается в нужном месте. Дальнейшему опусканию крюка мешает пластина, позиционирующая штырь с крюком на оси двигателя. Эта пластина крепится болтами и приваривается к верхней части пластины 5, нижняя часть пластины закрепляется болтовым соединением к столу оснастки для создания необходимой жесткости. На крюк за отверстие вешается специальный штырь 6 с основой, на которую в дальнейшем помещаются ранее спроектированные и оттарированные для градуировки гири 2. Градуировка происходит гирями массой 1, 2, 5 кг общей массой до 25 кг. Тензодатчики 7 установлены на верхней и нижней частях г-образной пластины. Тензорезистор градуируется, измеряя ток в мостике Уитстона по соответствующим напряжениям.

Так как ТИУ разрабатывалась для двигателей с характеристиками в определенном диапазоне, то количеством гирь можно варьировать величину тяги двигателя.

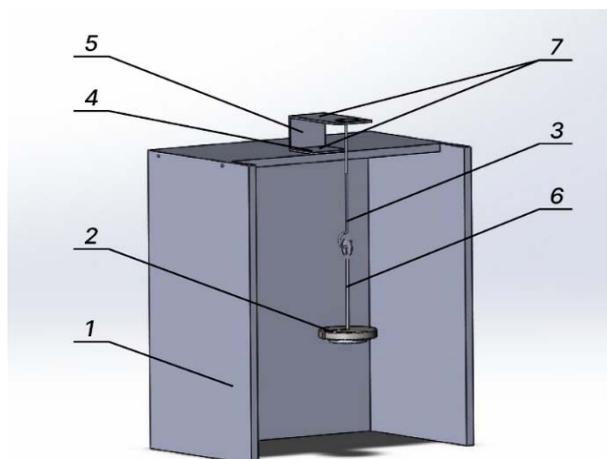


Рис. 6. 3D-модель тягоизмерительного устройства[^]
1 – стол; 2 – гири; 3 – крюк; 4 – болты; 5 – г-образная пластина;
6 – штырь; 7 – тензодатчики

В качестве материала для элемента 1 используется дерево/двп, что целесообразно с точки зрения дешевизны материала и его доступности. Для элементов 2, 3, 4, 5, 6 материалом выбрана нержавеющая сталь.

Установленный вольтмер фиксирует изменение показателей напряжения. По полученным результатам вычисляется тяга.

Таким образом, спроектировано устройство для градуировки тягоизмерительной системы. Произведен расчет Г-образной пластины и значение тяги. Созданная система удовлетворяет поставленной цели и соответствует предъявленным требованиям: конструкция проста, компактна и транспортируема.

Библиографические ссылки

1. Преимущества использования SLM-печати в ракетостроении [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-ispolzovaniya-slm-pechati-v-raketostroenii> (дата обращения: 16.02.2023).

2. Разработка технологического процесса изготовления экспериментальной камеры ракетного двигателя методом селективного лазерного сплавления на 3D-принтере [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49723789> (дата обращения: 16.02.2023).

3. Методика технологических испытаний камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленного по технологии SLM-печати [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49723796> (дата обращения: 16.02.2023).

4. Металлографический анализ камеры, изготовленной методом 3D-печати [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49922618> (дата обращения: 16.02.2023).

5. Разработка технологического процесса испытаний камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги на прочность и герметичность [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49922630> (дата обращения: 16.02.2023).

6. Постобработка камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленного по технологии SLM-печати [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49922629> (дата обращения: 16.02.2023).

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН НА БОРТОВУЮ АППАРАТУРУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

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

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 представлены результаты расчета напряженности электрического поля от передающих антенн космических аппаратов в местах расположения бортовой аппаратуры. Рассмотрен аналитический метод расчета среднеквадратического значения напряженности электрического поля, который проводился при заданных параметрах: расстояние от передающей антенны до бортовой аппаратуры; мощность подводимая к передающей антенне. Обозначены условия применимости данного метода и приведены результаты его верификации, как сравнительный анализ теоретически полученных данных и измеренных значений напряженности электрического поля на различном расстоянии от испытательных антенн, который показал удовлетворительное соответствие результатов расчета и эксперимента.

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

Возрастающие мощности и функционал космического аппарата (КА) ведет к увеличению плотности компоновки приборов и передающих антенн на внешней поверхности приборного отсека КА. На современных КА расстояние от передающих антенн до приборов, расположенных на внешней поверхности, может составлять от нескольких метров до нескольких десятков сантиметров. В рамках проведения анализа электромагнитной совместимости необходимо проведение расчета напряженности электрического поля от передающих антенн КА в местах расположения бортовой аппаратуры (БА).

Для проведения данного расчета необходимо формирование перечня исходных данных и условий проведения расчета. Первым параметром, используемым при проведении расчета, является расстояние от передающей антенны до БА. Если с точки зрения выбора точки наблюдения напряженности поля особых проблем нет – геометрические размеры БА обычно невелики и точку наблюдения можно выбрать в геометрическом центре БА, то с точки зрения выбора точки источника излучения все зависит от рассматриваемой антенны или антенной системы. Наиболее часто используемыми антеннами в составе КА являются:

- рупорные антенны – глобальные антенны связной подсистемы или антенны КИС в S-, C-, X-, Ku-, K-, Ka-диапазонах частот;
- спиральные антенны – цилиндрические и конические глобальные антенны связных подсистем, навигационных систем, оперативных каналов управления в VHF-, UHF-, L-диапазонах частот;
- зеркальные антенные системы – региональные антенны связных подсистем от VHF-диапазона до Ka-диапазона частот, межспутниковые линии связи.

Антенны различаются по компоновке системы – офсетные или осесимметричные; по количеству рефлекторов – обычно от одного до двух; по размерам – от рефлекторов диаметром несколько десятков сантиметров до группногабаритных антенн диаметром несколько десятков метров.

В случае рупорных антенн, точка источника излучения принимается в центре апертуры антенны. Для спиральных антенн точка источника излучения принимается в центре спирали. Точка источника для зеркальных антенных систем определяется исходя из расположения антенной системы на КА.

Расстояние между точкой излучения и точкой наблюдения определяется либо на основании теоретического чертежа КА, либо с использованием 3D-модели КА. Однако не всегда источник излучения и точка наблюдения находятся в прямой видимости. В данном случае может потребоваться учет особенностей распространения излучения вокруг конструкции КА.

Следующим параметром, используемым при проведении расчета, является мощность, подводимая к передающей антенне. Эта мощность определяется как мощностью непосредственно передатчика, так и потерями в тракте между передатчиком и входом в антенну. Для различных трактов потери могут иметь величину от 0,5 до 3 и более дБ. Эти потери могут сыграть существенную роль в конечной величине напряженности электрического поля, поэтому, данная величина должна быть определена как можно точнее.

В составе КА помимо антенн, на которые нагружены передатчики, работающие постоянно на одной частоте, имеются антенны, через которые происходит излучение на нескольких частотах, в соответствии с частотным планом КА.

Предположим, что в однородной изотропной среде без поглощения из некоторой точки происходит электромагнитное излучение [1]. Если бы плотность потока мощности излучения была во всех направлениях одинакова, то, взяв сферическую поверхность $S = 4\pi r^2$ с центром в точке излучения, можно выразить среднюю мощность излучения P следующим образом:

$$P = 4\pi r^2 \bar{\Pi}^0, \quad (1)$$

где r – расстояние от точки излучения до точки наблюдения, м; $\bar{\Pi}^0$ – плотность потока мощности излучения, Вт/м².

Гипотетическую равномерно излучающую антенну называют изотропным излучателем. В действительности, антенны излучают в различных направлениях по-разному, т. е. неравномерно. Если мощность некоторой антенны есть по-прежнему P , и в некоторой точке $M(r, \theta, \alpha)$ она создает поток мощности с плотностью, которая превышает величину $\bar{\Pi}^0$ в точке $D(\theta, \alpha)$ в несколько раз, то на основании (1) можем записать

$$\bar{\Pi}(r, \theta, \alpha) = \frac{D(\theta, \alpha)P}{4\pi r^2}. \quad (2)$$

Это выражение плотности потока мощности антенны на расстоянии r в направлении (θ, α) . Множитель $D(\theta, \alpha)$, который показывает, во сколько раз изменился поток мощности в данном направлении по сравнению со случаем изотропного излучения (при той же мощности излучателя), называется коэффициентом направленного действия антенны (КНД). Обычно, на практике вместо КНД используют коэффициент усиления антенны $G(\theta, \alpha)$, характеризующий направленность реальной антенны с потерями. Коэффициент усиления определяется по формуле [2]

$$G = D\eta, \quad (3)$$

где η – КПД антенны.

Обычно величина η весьма близка к единице, поэтому с достаточной для практических целей точностью можно считать $G = D$, т. е. что коэффициент усиления и коэффициент направленного действия антенны совпадают [2].

Поскольку локально поле излучения можно рассматривать как плоскую однородную волну, можно записать

$$\bar{P}(r, \theta, \alpha) = \frac{1}{2Z} E^2(r, \theta, \alpha), \quad (4)$$

где Z – волновое сопротивление, Ом; E – амплитудное значение напряженности электрического поля, В/м.

Приравняв выражения (2) и (4) можно получить формулу для амплитудного значения напряженности электрического поля

$$E(r, \theta, \alpha) = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{G(\theta, \alpha) \cdot P \cdot Z}{2\pi}}. \quad (5)$$

Это достаточно часто встречающаяся зависимость для расчета напряженности поля [3; 4]. Учитывая, что волновое сопротивление плоской электромагнитной волны (свободного пространства) равняется 120π и добавив множитель $1/\sqrt{2}$ можно получить наиболее часто используемое выражение для расчета среднеквадратического значения напряженности электрического поля

$$E(r, \theta, \alpha) = \frac{\sqrt{30 \cdot G(\theta, \alpha) \cdot P}}{r}. \quad (6)$$

Значение коэффициента усиления антенны в направлении на БА определяется по расчетным или экспериментальным данным. Данные могут быть представлены в виде коэффициента усиления антенны (рис. 1), либо в виде нормированной диаграммы направленности (рис. 2). Для перехода от нормированной диаграммы направленности антенны к коэффициенту усиления в нужном направлении, необходимо скорректировать значение, найденное из диаграммы направленности, на коэффициент усиления антенны в основном направлении. Например, рассматриваемая БА находится в направлении 70° относительно основного направления излучения облучателя, что соответствует значению диаграммы направленности минус 40 дБ (рис. 2). Учитывая, что коэффициент усиления облучателя в основном направлении составляет 25 дБ, коэффициент усиления в направлении БА составит минус 15 дБ.

Волновое сопротивление – ключевой параметр любой электромагнитной волны и представляет собой отношение напряженности электрического поля к напряженности магнитного поля (E/H) [5–9]. Применительно к излучению антенн, разделяют ближнюю, переходную и дальнюю зоны излучения. В дальней области, которая имеет место для $R > \lambda/2\pi$, напряженность электрического и магнитного поля уменьшается с расстоянием прямо пропорционально. Волновое сопротивление постоянно и равно сопротивлению свободного пространства.

В ближней зоне $R < \lambda/2\pi$, волновое сопротивление определяется в соответствии с характеристиками источника. Низкий ток и высокий потенциал излучателя (например, штыревой антенны) будут создавать главным образом электрическое поле с высоким волновым сопротивлением, в то время как большой ток и низкий потенциал излучателя (например, рамочная антенна) будут создавать главным образом магнитное поле низкого волнового сопротивления. Если, в особом случае излучающая структура имеет волновое сопротивление около 377 Ом (120π), то в зависимости от геометрии плоская волна может быть фактически создана в ближней зоне.

Зона в окрестности $\lambda/2\pi$ (приблизительно шестая часть длины волны) является переходной между ближней и дальней зонами. Это не точный критерий, скорее это определяет зону, в пределах которой структура поля изменяется от сложной к простой.

Определение характеристик антенн в ближней зоне значительно сложнее, чем в дальней. Диаграммы направленности антенны в ближней зоне могут мало соответствовать диаграммам направленности в дальней зоне. Соответственно, найденное по формуле (6) значение напряженности поля с использованием коэффициента усиления и волнового сопротивления для дальней зоны может привести к погрешности в определении поля. Однако, с точки зрения прикладной задачи расчета напряженности электрического поля на борту КА, важным является не само наличие погрешности в расчете, а величина этой погрешности и ее знак.

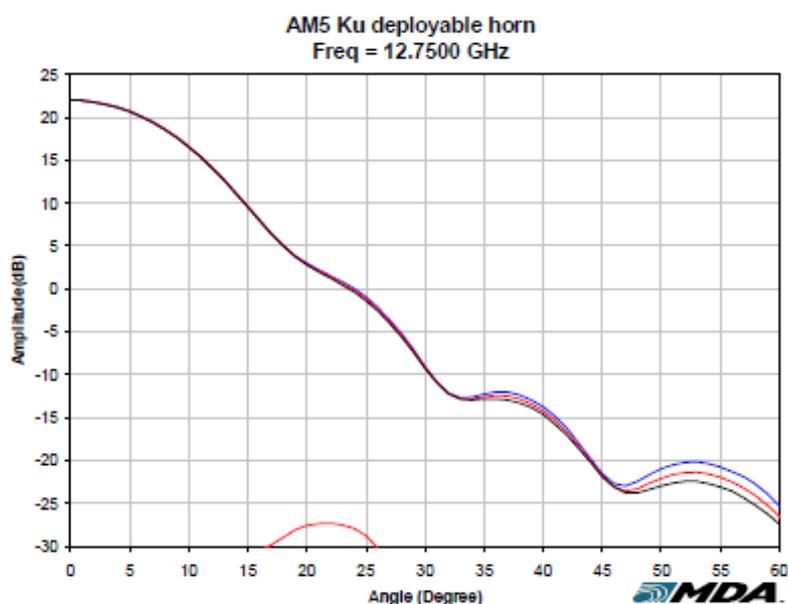


Рис. 1. Коэффициент усиления облучателя Ku-диапазона полезной нагрузки КА

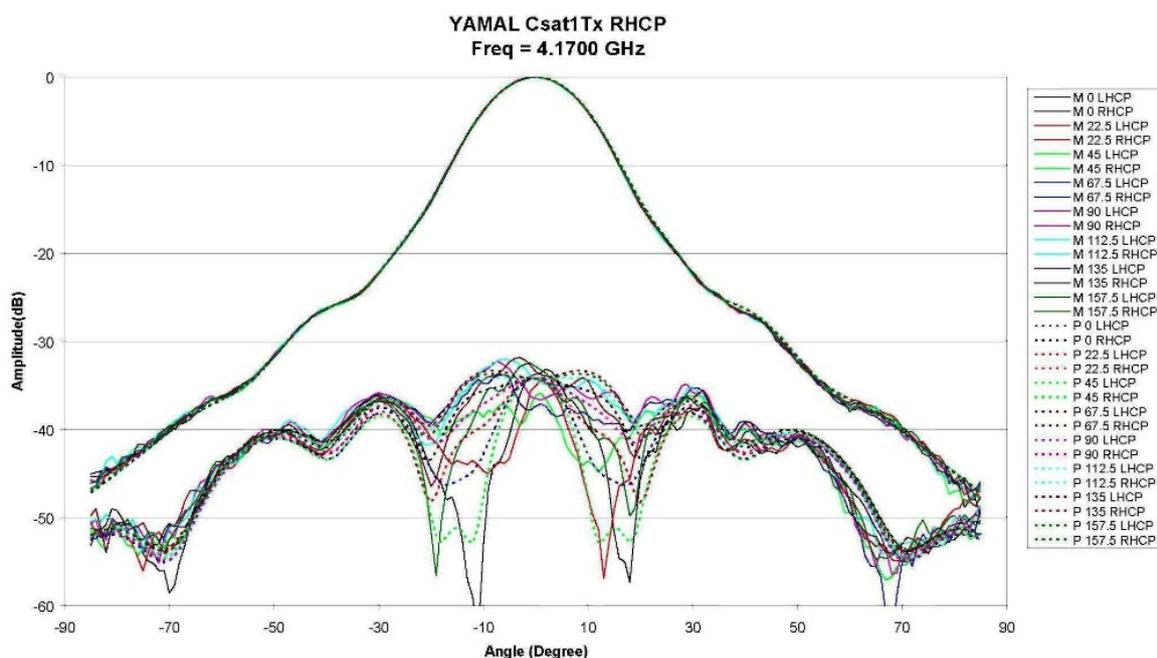


Рис. 2. Нормированная диаграмма направленности облучателя С-диапазона

Для определения возможной величины этой погрешности были проведены экспериментальные работы по измерению напряженности электрического поля на различном расстоянии от испытательных антенн и проведено сравнение результатов измерений с расчетом по формуле (6). В эксперименте использовалась логопериодическая антенна диапазона 200–1000 МГц и рупорные антенны в диапазоне 1000–18000 МГц. Напряженность поля измерялась датчиком электрического поля. Для проведения расчета напряженности использовались данные по коэффициенту усиления антенн из технической документации на антенны и величина мощности сигнала, измеренная при проведении испытаний на входе в антенны. Измерения и расчеты проводились для расстояний между точкой излучения и точкой наблюдения равных 1, 1,5, 2,5 и 3,9 м (ограничено размером испытательной площадки) при горизонтальной (H) и вертикальной (V) ориентациях испытательных антенн.

Результаты измерений и расчетов для диапазона 200–1000 МГц на расстоянии 1,5 м представлены на рис. 3. Анализ результатов показал, что наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных. Определить из этих данных величину и знак погрешности формулы (6) не представляется возможным так как, с одной стороны, у логопериодической антенны точка излучения зависит от частоты и учитывая ее продольный размер, порядка 1 м, соизмеримый с рассматриваемым расстоянием, точное значение расстояния от точки излучения до точки наблюдения неизвестно. С другой стороны, широкополосных вибраторных антенн, аналогичных испытательной логопериодической, в составе КА не применяется и результаты сравнения для диапазона частот 200–1000 МГц носят только качественный характер адекватности формулы (6).

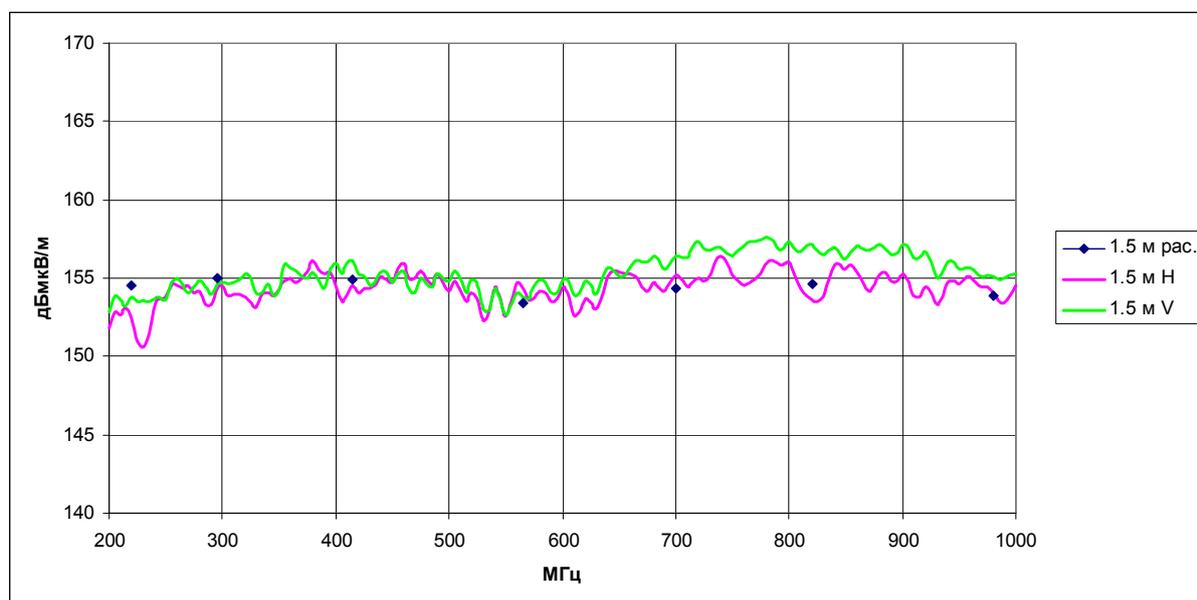


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные данные в диапазоне частот 200–1000 МГц на расстоянии 1,5 м

Результаты измерений и расчетов для диапазона 1000–18000 МГц на расстоянии 1 м представлены на рис. 4. Точки на графиках соответствуют расчетным значениям, сплошные кривые соответствуют измерениям для горизонтальной (H) и вертикальной (V) поляризации.

Таким образом, определены основные параметры для проведения расчета напряженности поля от передающих антенн КА в местах расположения БА и сформулированы рекомендации по их использованию в расчетах.

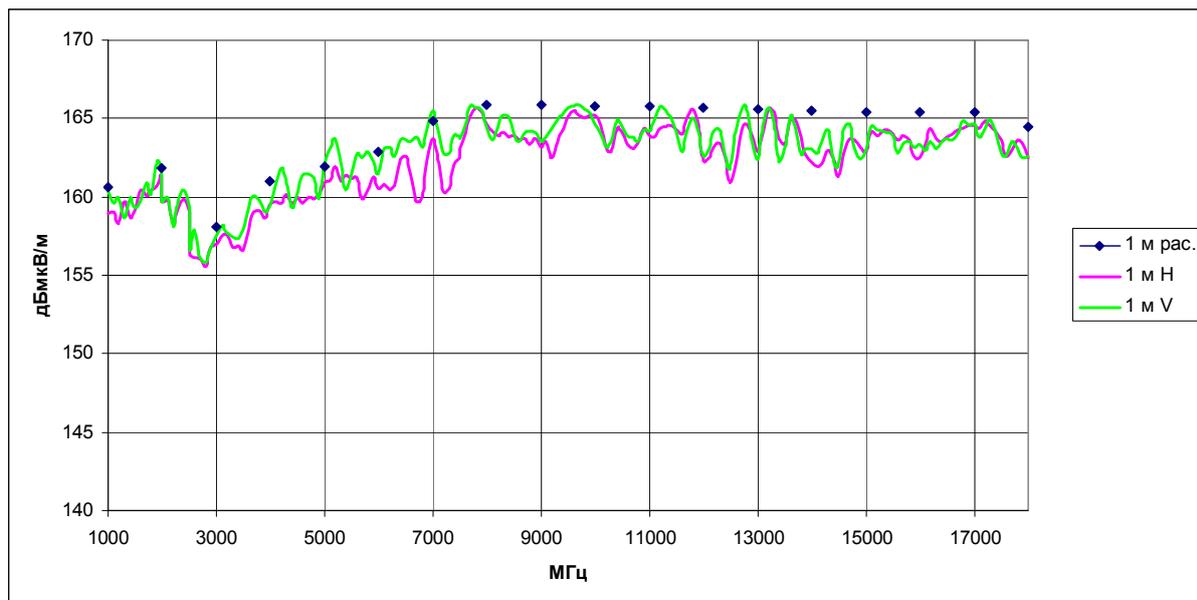


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные данные в диапазоне частот 1000–18000 МГц на расстоянии 1 м

Рассмотрен аналитический метод расчета напряженности поля, обозначены условия применимости данного метода и приведены результаты его верификации.

Библиографические ссылки

1. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие для вузов. 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., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. 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. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. М. : Изд. дом «Технологии», 2003. 540 с.
6. Газизов Т. Р. Основы электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2012. 245 с.
7. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / 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.

© Кузовников А. В., Кочура С. Г., Максимов И. А., Сомов В. Г., Дианова О. В., 2023

АНАЛИЗ ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И. А. Максимов^{1,2}, С. Г. Кочура^{1,2}, В. Г. Сомов²,
Н. А. Шепета², Д. О. Малышев² (аспирант)

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 радиопомех, определяющих электромагнитную обстановку на борту космического аппарата, выделено три класса помех, посредством которых происходит электромагнитное взаимодействие бортовой аппаратуры. По анализу взаимодействия оборудования космического аппарата посредством излучаемых помех определена номенклатура расчетных оценок, которые необходимо провести для подтверждения внутрисистемной электромагнитной совместимости. Представлено обоснование создания методологии проведения анализа электромагнитной совместимости космического аппарата по излучаемым помехам с учетом его особенностей функционального, конструктивного и радиотехнического построения.

Ключевые слова: космический аппарат, электромагнитная совместимость, радиопомехи.

В состав современного космического аппарата (КА) входят десятки радиопередающих устройств, сотни радиоэлектронных блоков бортовой аппаратуры, оптических устройств и рабочих поверхностей, тысячи элементов конструкции и кабельных сборок. Весь этот технический комплекс должен функционировать в течение длительного времени в условиях сложной электромагнитной обстановки на борту КА.

Требования по расширению функциональных возможностей современных КА приводят к необходимости увеличения мощности радиопередающих бортовых систем, увеличению энергоёмкости системы энергоснабжения, а также к значительному усложнению бортовой аппаратуры (БА) за счёт применения в её составе слаботочных электронных схем и компонентов высокой степени интеграции и быстродействия. В результате в настоящее время весьма актуальными становится задача обеспечения требуемых электрических характеристик БА в условиях создаваемой электромагнитной обстановки на борту КА.

Радиопомехи, определяющие электромагнитную обстановку на борту КА, разделяются по способу их возникновения, способу передачи от одной БА к другой и механизмам воздействия. Классификация помех представлена на рис. 1.

Проведенный анализ позволяет выделить три класса помех, посредством которых происходит электромагнитное взаимодействие БА в составе КА. К ним относятся: кондуктивные, излучаемые помимо антенн, излучаемые через антенны. Для каждого класса помех устанавливается своя номенклатура требований, задаваемых на уровне БА, соответствие которым позволит обеспечить электромагнитную совместимость КА в целом.

Один из обозначенных выше классов помех в последнее время приобрел особую актуальность – это воздействие на БА излучаемых помех и эмиссия излучаемых помех от БА. Причины этого обусловлены следующими моментами:

– увеличение мощности КА приводят к расширению количественного состава передающих радиоэлектронных средств (РЭС) КА. Растет количество стволов передающей аппаратуры, их мощность, многодиапазонность, и, как следствие, значительно увеличивается количество передающих антенн в составе КА. На современных КА количество антенн может составлять несколько десятков. Поскольку габаритные размеры корпуса КА ограничены существующими средствами выведения, рост количества антенн ведет к уплотнению компоновки антенн и приборов на астроплате – панели, обращенной к Земле. В результате уплотнения компоновки уменьшаются расстояния от БА до передающих антенн, что в свою очередь приводит к возрастанию напряженности электрического поля, воздействующего на БА и необходимости подтверждения работоспособности БА в создаваемых условиях. В некоторых случаях критичным является и воздействие БА на приемные антенны РЭС;



Рис. 1. Классификация помех

– эволюция БА, направленная на оптимизацию ее массогабаритных и функциональных характеристик и связанная с применением слаботочных чувствительных электронных компонентов высокой степени интеграции, уменьшения толщины корпуса БА, использование облегченных плетенок бортовой кабельной сети и применение маломощных сигналов может привести к увеличению ее восприимчивости к воздействию внешних полей;

– повышение функциональной нагрузки и быстродействия БА приводит к возрастанию уровня излучаемых помех, что может оказать воздействие на приемники РЭС и другую БА;

– переход от герметичной конструкции приборного отсека к негерметичной, выполненной на основе сотовых панелей, неизбежно приводит к возрастанию уровней напряженности электрического поля, создаваемого передающими антеннами КА внутри приборного отсека вследствие наличия зазоров и технологических отверстий. Кроме того, в случае телекоммуникационных КА, антенные системы располагаются по бокам приборного отсека на антенных панелях, подвергая часть БА интенсивному воздействию излучения передней полусферы антенн. Все это также требует подтверждения работоспособности БА в условиях электромагнитных излучений, уровень которых внутри негерметичного приборного отсека в априори выше, чем внутри ранее используемой герметичной конструкции.

На этапе разработки КА, помимо задания требований по эмиссии и восприимчивости к переменному электрическому полю на уровне БА, с помощью аналитических методов необходимо подтвердить, что уровни электрического поля в местах установки БА не превышают заданных уровней восприимчивости, а эмиссия от БА не оказывает влияние на другое оборудование КА. Взаимодействие оборудования КА посредством излучаемых помех представлено на рис. 2.

Анализ взаимодействия оборудования КА посредством излучаемых помех (рис. 2) определяет номенклатуру расчетных оценок, которые необходимо провести для подтверждения внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) КА по излучаемым помехам (номера соответствуют стрелкам на рис. 2):

- 1) воздействие излучения передающих антенн КА на БА на внешней поверхности приборного отсека;
- 2) воздействие излучения передающих антенн КА на БА внутри приборного отсека КА;
- 3) воздействие излучения БА на другую БА внутри приборного отсека;
- 4) воздействие излучения БА на другую БА на внешней поверхности приборного отсека;
- 5) воздействие излучения БА на приемники через приемные антенны.

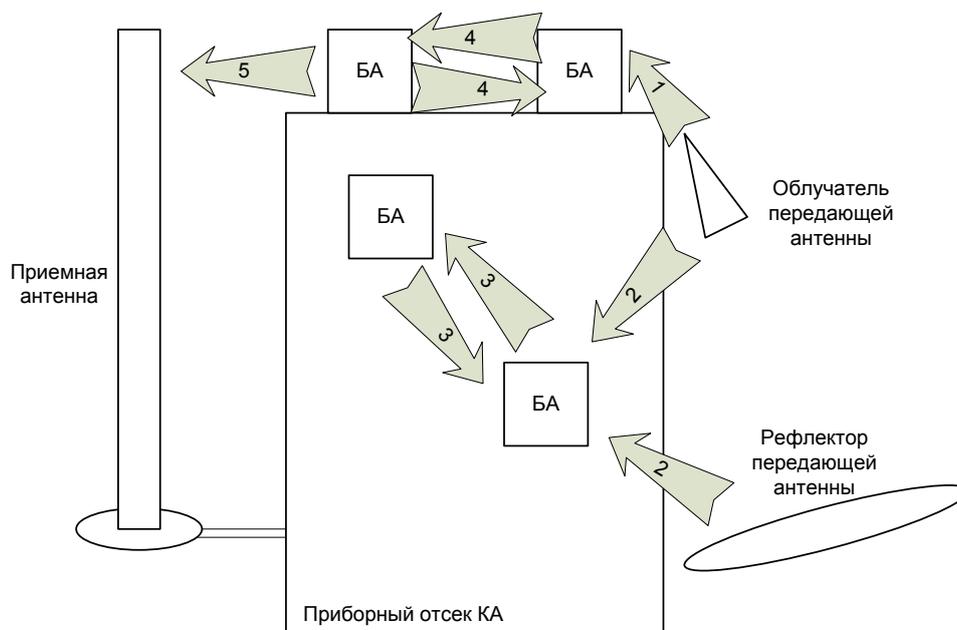


Рис. 2. Взаимодействие оборудования КА посредством излучаемых помех

Каждой обозначенной выше позиции должна соответствовать своя методика оценки.

Несмотря на большое количество публикаций и литературы по тематике ЭМС технических средств, обеспечения помехозащищенности радиоэлектронной аппаратуры и РЭС, методические рекомендации и методы оценки ЭМС такого объекта как КА, охватывающие всю номенклатуру взаимодействия оборудования в составе КА (рис. 2), в настоящее время отсутствуют.

Таким образом, необходимо создание методологии проведения анализа ЭМС КА по излучаемым помехам, включающую полную номенклатуру расчетных оценок с учетом особенностей функционального, конструктивного и радиотехнического построения КА.

Библиографические ссылки

1. Калашников Н. И. Системы связи через искусственные спутники земли. М. : Связь, 1969. 382 с.
2. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. М. : Сов. радио, 1971. 664 с.
3. Уилльямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. М. : Изд. дом «Технологии», 2003. 540 с.
4. Газизов Т. Р. Основы электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2012. 245 с.
5. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М. : Радио и связь, 1989. 224 с.
6. 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.
7. 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.

© Максимов И. А., Кочура С. Г., Сомов В. Г., Шепета Н. А., Малышев Д. О., 2023

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРО-КОНТАКТНО-ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В ЩЕЛОЧНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ

И. Я. Шестаков, В. И. Шестаков

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

В любом аппарате ракетно-космической техники имеются электронные приборы, при изготовлении которых используется полупроводниковый кремний в виде подложки (пластины). При изготовлении пластины применяется механическая резка, которая требует больших затрат. Рассматриваются особенности электро-контактно-химического способа обработки для получения пластины монокристаллического кремния.

Ключевые слова: монокристаллический кремний, установка электро-обработки, вибрирующий электрод, водный раствор щёлочи, амплитуда вибрации, качество поверхности, пассивация.

В настоящее время наибольшее применение для изготовления электронных приборов получил кремний [1].

На данном этапе развития технологии полупроводниковых материалов конечной продукцией является шлифованная и полированная пластина – подложка [2].

Технология получения кремниевых пластин включает операцию резки монокристаллического кремния. Операция резки монокристалла на пластины осуществляется механическим путем, что требует довольно больших затрат (энергетических, материальных). Поэтому поиск нового метода резки, не имеющего указанный недостаток, является актуальной проблемой.

В работе [3] установлено, что при комнатной температуре кристаллы при механической обработке разрушаются хрупко. При этом обрабатываемость оценивается критерием хрупкости, кремний входит в группу материалов, относительно легко обрабатываемых методами, основанных на механической эрозии [4]. Оценка обрабатываемости кремния электроэрозионным методом производилась по критерию Палатника. Эта величина меньше, чем для меди, нержавеющей стали, вольфрама, однако из-за науглероживания поверхности полупроводника электроэрозионная обработка не нашла широкого применения [5]. Более ранними исследованиями установлено, что толщина нарушенного слоя кремния значительно меньше, чем при механической резке [6].

Обрабатываемость электрохимическим способом характеризуется константой процесса [7]:

$$A = C * \alpha * \mu * (U - U_p), \quad (1)$$

где C – электрохимический эквивалент; α – анодный выход по току; μ – удельная электропроводность электролита; U – напряжение на электродах, U_p – суммарное напряжение поляризации на электродах.

Характеристика процесса определяет скорость линейного растворения обрабатываемого материала

$$V = A / S, \quad (2)$$

где S – зазор между электродом-инструментом и обрабатываемой поверхностью.

Предварительная оценка скорости линейного растворения кремния показала, что эта скорость соизмерима со скоростью анодного растворения металлов при электрополировании.

Поведение кремниевого электрода показано в работе [8], где указано, что в щелочных водных растворах полупроводник растворяется с выходом по току 5–15 %, при плотности тока 0,5–1 А/см² и температуре 20 °С отмечено повышение выхода по току с увеличением температуры раствора и наличие белой плёнки SiO₂ на поверхности электрода. Электрохимический процесс широко используется для электрополирования пластин кремния, как последняя отделочная операция перед промывкой пластин в деионизованной воде. Электрополирование проводят в водных растворах плавиковой кислоты или гидроксида натрия(калия) при их концентрации 1–30 %, при этом скорость травления равна 0,2–1 мкм/мин [1].

Предлагается объединить достоинства электроэрозионного и электрохимического методов путём воздействия вибрирующего электрода-инструмента до контакта с обрабатываемой поверхностью в каждом периоде колебаний в водном растворе щёлочи. Процесс происходит при постоянном напряжении на электродах.

Для оценки возможности использования электро-контактно-химической обработки вибрирующим электродом-инструментом монокристаллического кремния были проведены исследования на установке электро-обработки [10]. Установка обеспечивает частоту вибрации электрода-инструмента 50 Гц при амплитудах 0,5; 1,0; 1,5 мм. В качестве образца использовали слиток монокристаллического кремния диаметром 62 мм, высотой 82 мм. Образец устанавливался вертикально в приспособление в виде металлической втулки и подключался к плюсу источника постоянного тока, минус – к электроду-инструменту. Электрод-инструмент фиксировался в штоке электродинамического двигателя. В качестве электролита использовали водный раствор щёлочи (KOH) разной концентрацией. Образец вместе с втулкой устанавливается в ёмкость из диэлектрического материала. Электролит заливается в ёмкость так, чтобы образец покрывался слоем электролита не менее 5 мм. В качестве электрода-инструмента использовался вольфрамовый стержень диаметром 2,90 мм. В результате опытов установлено, что для локализации процесса анодного растворения кремния в месте контакта образца и электрода-инструмента необходимо произвести предварительную пассивацию всей поверхности полупроводника. Пассивацию нужно проводить в течении 6–10 минут в водном растворе гидроксида калия (4–6 % по массе). При этом электрод-инструмент находится на расстоянии 3–5 мм от обрабатываемой поверхности и не вибрирует. Плотность тока на поверхности образца должна быть в пределах 5–7 А/см².

В результате проведения экспериментов установлено, что максимальная производительность резки монокристаллического кремния 0,81–0,85 мм/мин наблюдается при электро-контактно-химической обработке в водном растворе гидроксида калия концентрацией 4–5 % (по массе) и средней плотности тока по обрабатываемой поверхности 5–7 А/см² (рис. 1).

Форма и размеры глухого отверстия в монокристаллическом кремнии показаны на рис. 2. Отверстие получается цилиндрической формы диаметром 3,00 мм, боковой зазор составляет 0,05 мм, что свидетельствует о высокой локализации процесса электро-контактно-химической обработки кремния.

На поверхности 1 (рис. 2) видны лунки, что можно объяснить эрозионным механизмом удаления материала из зоны обработки. На поверхности 2 трещины не обнаружены, это связано с тем, что формирование этой поверхности происходит за счёт электрохимического анодного растворения. Увеличение амплитуды вибрации электрода-инструмента более 1,0 мм приводит к ухудшению качества обработанной поверхности 3 кремния (сколы и трещины), в связи с усилением механической эрозии материала.

Для пластин кремния важно качество поверхностей 2 и 3. Качество обработанной поверхности оценивалось с помощью микроскопа МПБ-2.

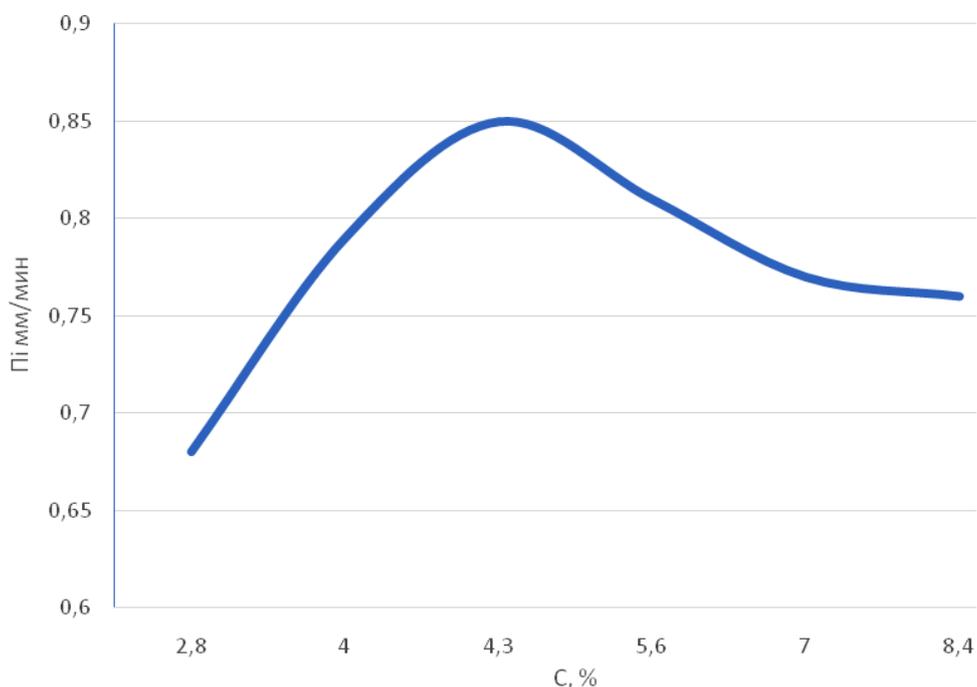


Рис. 1. Зависимость производительности обработки от концентрации электролита

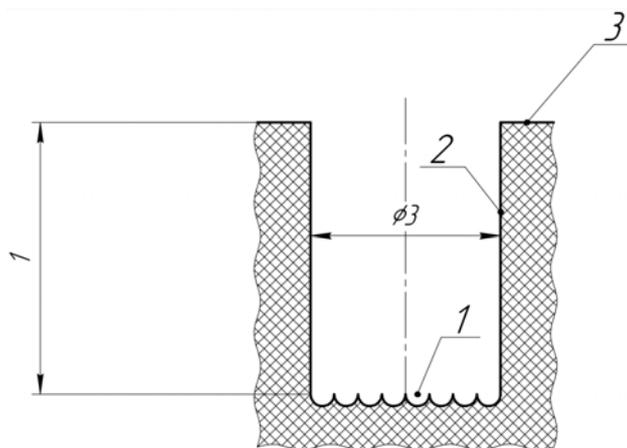


Рис. 2. Форма и размеры глухого отверстия в монокристаллическом кремнии

Комбинированный метод электро-контактно-химической обработки позволяет увеличить производительность процесса в 3–5 раз по сравнению с электрохимическим способом резки монокристаллического кремния.

Данный способ электро-контактно-химической резки можно реализовать, придав вращение слитку монокристаллического кремния относительно его продольной оси с линейной скоростью 0,1–0,2 м/с при вибрации электрода-инструмента частотой 50 Гц и амплитудой не более 1,0 мм. В качестве электролита предлагается водный раствор гидроксида калия концентрацией 4–5 % (по массе). При этом электрод-инструмент должен быть в виде тонкой пластины толщина которой будет зависеть от диаметра слитка, материала электрода-инструмента.

Библиографические ссылки

1. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники : учебник. СПб. : Лань, 2004. 368 с.
2. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств : справочник. М. : Радио и связь, 1991. 528 с.
3. Судзуки Т., Койима Х. Хрупкое разрушение и пластическое течение неметаллических монокристаллов // Разрушение твердых тел. М. : Металлургия, 1967. С. 302–317.
4. Захарова А. А., Юзова В. А. Физико-химические основы размерной обработки полупроводников. Механическая обработка. Красноярск : КГТУ, 1995. 176 с.
5. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников / Б. Д. Луфт, В. А. Перевошиков, Л. Н. Возмилова и др. ; под ред. Б. Д. Луфт. М. : Радио и связь, 1982. 136 с.
6. Гитлевич А. Е., Ленге Т. И. Особенности электрической эрозии некоторых полупроводниковых кристаллов // Электронная обработка материалов. 1967, № 4. С. 15–19.
7. Любимов В. В., Иванов Н. И. Теоретические основы синтеза новых механо-электро-физико-химических методов размерной обработки // Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов : сб. науч. тр. Тула : ТПИ, 1990. С. 5–13.
8. Ефимов Е. А., Ерусалишен И. Г. Электрохимия германия и кремния. М. : ГХИ, 1963. 179 с.
9. Пичугин И. Г., Таиров Ю. М. Технология полупроводниковых приборов. М. : Высшая школа, 1984. 288 с.
10. Шестаков И. Я., Стрюк А. И., Безъязыков С. А. Установка электро-обработки с линейным электродинамическим двигателем // Материалы, технологии, конструкции : сб. науч. трудов ; Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1995. С. 158–161.

© Шестаков И. Я., Шестаков В. И., 2023