

ГОСУДАРСТВЕННОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНСТВО УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ЮЖНОЕ» ИМ. М.К. ЯНГЕЛЯ»

На правах рукописи

Шевченко Сергей Андреевич



УДК 621.646.45

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПНЕВМОСИСТЕМЫ ЗАПУСКА РАКЕТНЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЁМ СТАБИЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА  
И УЛУЧШЕНИЯ ЕЁ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Специальность: 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
Степанов Михаил Сергеевич  
доктор технических наук, профессор

Днепр – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....                                                                                                | 7  |
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                  | 9  |
| Раздел 1. АНАЛИЗ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ, КОНСТРУКЦИИ И МЕТО-<br>ДОВ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПНЕВМОСИСТЕМЫ ЗАПУСКА ЖРД<br>МНОГОКРАТНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ..... | 15 |
| 1.1. Основные способы запуска ЖРД .....                                                                                                         | 15 |
| 1.2. Описание пневмосистемы запуска ракетного двигателя .....                                                                                   | 24 |
| 1.3. Основные элементы пневмосистемы запуска ЖРД .....                                                                                          | 27 |
| 1.4. Известные методы динамического расчета пневмосистемы .....                                                                                 | 41 |
| Выводы к разделу 1 .....                                                                                                                        | 56 |
| Раздел 2. УТОЧНЕНИЯ МОДЕЛИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА<br>ПНЕВМОСИСТЕМЫ .....                                                                     | 58 |
| 2.1. Расчёт газодинамических сил, действующих на клапаны и поршни ....                                                                          | 58 |
| 2.1.1. Уточнение формулы для силы, действующей на тарель клапана ...                                                                            | 58 |
| 2.1.2. Формула для определения силы, действующей на торец поршня ...                                                                            | 62 |
| 2.2. Моделирование нестационарного теплообмена газа и стенки .....                                                                              | 63 |
| 2.2.1. Конкретизация модели движения газа по трубопроводам .....                                                                                | 63 |
| 2.2.2. Расчётная оценка нагрева газа в тупиковых полостях .....                                                                                 | 64 |
| 2.2.3. Вентилирование полости за счёт колебаний поршня .....                                                                                    | 65 |
| 2.2.4. Определение коэффициентов теплоотдачи на переходном режиме                                                                               | 67 |
| 2.2.5. Коэффициенты теплоотдачи на установившемся режиме .....                                                                                  | 68 |
| 2.2.6. Расчет коэффициентов теплоотдачи для газа в шаробаллоне .....                                                                            | 70 |
| 2.2.7. Оценка изменения средней температуры стенки полости .....                                                                                | 72 |
| 2.2.8. Интегро-дифференциальное уравнение для температуры стенки ...                                                                            | 72 |
| 2.2.9. Расчёт температуры уплотнительных манжет .....                                                                                           | 75 |
| 2.2.10. Уточненный термодинамический расчёт шаробаллона .....                                                                                   | 77 |
| 2.2.11. Учет внешнего теплообмена при огневых испытаниях .....                                                                                  | 78 |
| 2.2.12. Влияние теплообмена на динамику пневмосистемы .....                                                                                     | 79 |

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                                                          | 3   |
| 2.3. Уточненная модель расчета шаробаллона .....                                                         | 83  |
| 2.3.1. Определение приведенной массы газа для шаробаллона .....                                          | 84  |
| 2.3.2. Расчет объема газа, приведенного к полости штуцера баллона .....                                  | 87  |
| 2.3.3. Влияние приведенной массы и объема на частоту колебаний .....                                     | 89  |
| 2.4. Учет фактора сжимаемости гелия .....                                                                | 92  |
| 2.4.1. Выбор уравнения состояния гелия .....                                                             | 93  |
| 2.4.2. Уточненное уравнение сжимаемости гелия и его следствия .....                                      | 95  |
| 2.4.3. Учет эффекта Джоуля-Томсона .....                                                                 | 97  |
| 2.4.4. Уточнение формул Сен-Венана .....                                                                 | 99  |
| 2.4.5. Уточнения расчетных уравнений .....                                                               | 101 |
| 2.4.6. Влияние фактора сжимаемости гелия на работу пневмосистемы ...                                     | 101 |
| 2.5. Расчетные уравнения уточненной модели пневмосистемы .....                                           | 103 |
| Выводы к разделу 2 .....                                                                                 | 108 |
| Раздел 3. НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СИЛЫ ТРЕНИЯ И УТЕЧЕК ГАЗА<br>ДЛЯ МАНЖЕТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ИЗ ФТОРОПЛАСТА ..... | 109 |
| 3.1. Расчетные уравнения НДС манжеты .....                                                               | 111 |
| 3.2. Краевая задача для уса манжеты и примеры ее решения .....                                           | 114 |
| 3.3. Влияние температуры фторопласта на параметры модели .....                                           | 118 |
| 3.4. Формула для расчета давления лепестковой пружины на манжету .....                                   | 122 |
| 3.5. Расчет уплотнения с учетом переменного коэффициента потерь .....                                    | 126 |
| 3.6. Лабораторные методы определения силы трения и утечек газа в ман-<br>жете .....                      | 130 |
| 3.7. Апробация математической модели манжетного уплотнения .....                                         | 135 |
| 3.8. Аналитический расчет силы контактного давления .....                                                | 137 |
| 3.9. Формула для зависимости коэффициента трения от давления .....                                       | 142 |
| 3.10. Учет зависимости коэффициента трения от скорости скольжения .....                                  | 143 |
| 3.11. Коэффициенты трения покоя и начала движения клапана или порш-<br>ня .....                          | 146 |
| Выводы к разделу 3 .....                                                                                 | 149 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Раздел 4. ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПНЕВМОСИСТЕМЫ И МЕТОДИКА ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ .....                                            | 150 |
| 4.1. Вибромеханический аналог уравнения движения клапана .....                                                                      | 153 |
| 4.2. Гармоническая линеаризация сухого трения в манжетах .....                                                                      | 155 |
| 4.3. Линеаризация расхода при критических перепадах давления .....                                                                  | 156 |
| 4.4. Импеданс при колебаниях поршня в полости с жиклером .....                                                                      | 157 |
| 4.5. Оптимизация квадратичного трения в управляющем жиклере .....                                                                   | 161 |
| 4.6. Импедансы газовой пружины и пневмоблока управления .....                                                                       | 162 |
| 4.7. Характеристическое уравнение пневмосистемы .....                                                                               | 170 |
| 4.8. Случай малых амплитуд колебаний. Статическая устойчивость .....                                                                | 171 |
| 4.9. Метод нахождения частот и амплитуд предельных циклов .....                                                                     | 173 |
| 4.10. Графоаналитический критерий устойчивости предельного цикла .....                                                              | 175 |
| 4.11 Графоаналитический метод решения характеристического уравнения<br>для затухающих или растущих колебаний .....                  | 177 |
| 4.12. Достаточное условие динамической устойчивости пневмосистемы ....                                                              | 179 |
| 4.13. Настройка пневмосистемы на автоколебания малой амплитуды .....                                                                | 181 |
| Выводы к разделу 4 .....                                                                                                            | 184 |
| Раздел 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМОСИСТЕМЫ ЗАПУСКА ЖРД НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ .....                                     | 188 |
| 5.1. Исследование динамических характеристик основного регулятора .....                                                             | 188 |
| 5.1.1. Устройство лабораторного стенда для исследования динамических характеристик .....                                            | 190 |
| 5.1.2. Метод исследования .....                                                                                                     | 195 |
| 5.1.3. Результаты исследования динамики регулятора .....                                                                            | 195 |
| 5.1.4. Сравнение результатов экспериментов на стенде и на двигателе ...                                                             | 205 |
| 5.1.5. Сопоставление результатов экспериментального и теоретического<br>исследования. Подобие процессов на гелии и на воздухе ..... | 209 |
| 5.2. Исследование газодинамических характеристик металлорукава .....                                                                | 210 |
| 5.2.1. Объект исследования и стенд для его испытаний .....                                                                          | 212 |
| 5.2.2. Особенности обработки показаний датчиков .....                                                                               | 214 |

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                                                            | 5   |
| 5.2.3. Определение потерь давления в металлорукаве .....                                                   | 217 |
| 5.2.4. Определение коэффициента расхода жиклера .....                                                      | 219 |
| 5.2.5. Определение коэффициента распределенных потерь давления в металлорукаве .....                       | 220 |
| 5.2.6. Определение скорости звука по максимальной скорости газа в металлорукаве .....                      | 225 |
| 5.2.7. Определение скорости звука по скорости распространения импульсов давления .....                     | 226 |
| 5.2.8. Проявление эффекта Джоуля-Томсона при дросселировании газа в регуляторе .....                       | 227 |
| Выводы к разделу 5 .....                                                                                   | 231 |
| ВЫВОДЫ .....                                                                                               | 233 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....                                                                     | 235 |
| Приложение А. АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ГАЗОМ И СТЕНКАМИ ПОЛОСТЕЙ И ТРУБОПРОВОДОВ | 247 |
| А.1. Модельные задачи теплообмена для трубопроводов .....                                                  | 247 |
| А.2. Модельные задачи конвективного теплообмена для полостей .....                                         | 251 |
| А.3. Модельные задачи диффузного теплообмена для полостей .....                                            | 254 |
| А.4. Модельные задачи для расчета температуры стенки .....                                                 | 258 |
| А.5. Метод решения интегро-дифференциального уравнения .....                                               | 264 |
| Приложение Б. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГАЗО И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ШАРОВАЛЛОНОВ .....                    | 268 |
| Б.1. Динамический анализ системы «шаробаллон – трубопровод» .....                                          | 268 |
| Б.2. Аналитический расчет приведенной массы .....                                                          | 272 |
| Б.3. Уточнение коэффициента теплоотдачи от газа к стенке баллона .....                                     | 273 |
| Приложение В. ВЫВОД РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕЛИЯ ИЗ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ РЕАЛЬНОГО ГАЗА АБЕЛЯ .....    | 274 |
| В.1. Вывод уточненного уравнения сжимаемости гелия в полости .....                                         | 274 |

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                                                                                    | 6   |
| В.2. Вывод характеристик адиабаты для гелия .....                                                                                  | 275 |
| В.3. Вывод корректировок для формул Сен-Венана .....                                                                               | 276 |
| В.4. Использование разработанных методов при пневмогидродинамическом расчете бортового источника мощности для рулевой машины ..... | 278 |
| Приложение Г. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ МАНЖЕТНОГО УПЛОТНЕНИЯ ИЗ ФТОРОПЛАСТА .....                                   | 281 |
| Г.1. Алгоритмы расчета НДС манжеты .....                                                                                           | 281 |
| Г.2. Алгоритм расчета параметров течения газа через зазор между манжетой и втулкой или штоком .....                                | 283 |
| Приложение Д. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПНЕВМОСИСТЕМЫ .....                             | 286 |
| Д.1. Метод расчета импеданса полости управления .....                                                                              | 286 |
| Д.2. Обоснования прямого метода вычисления импеданса .....                                                                         | 288 |
| Д.3. Методы расчета импедансов входного и выходного трубопроводов ...                                                              | 289 |
| Приложение Е. ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЯТЫХ КОРРЕКТИРОВОК РАЗМЕРОВ ПНЕВМОСИСТЕМЫ ПРИ ЗАМЕНЕ ГЕЛИЯ СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ ...                       | 293 |
| Приложение Ж. ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ .....                                                                  | 298 |