

На правах рукописи

САЗАНОВ ВЯЧЕСЛАВ ПЕТРОВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КРИОГЕННЫХ ПНЕВМОКЛАПАНОВ
СВЕРХТЯЖЕЛОГО РАКЕТОНОСИТЕЛЯ**

Специальность:

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Самара – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» на кафедре прочности летательных аппаратов при поддержке Федерального агентства по образованию (проект РНП 2.1.1.3397 и проект РНП 2.1.1.889).

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор

Петренко Станислав Александрович

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
профессор

Самсонов Владимир Николаевич

доктор технических наук,
профессор

Ткаченко Сергей Иванович

Ведущая организация: ОАО «КУЗНЕЦОВ» (г. Самара)

Защита состоится 28.12.2010 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.02 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного аэрокосмического университета.

Автореферат разослан «25» _____ ноября _____ 2010г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.215.02
доктор технических наук, доцент

----- Головин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Агрегаты гидравлических систем ракетоносителей тяжелого и сверхтяжелого класса с двигательными установками на криогенных видах топлива наряду с крупными габаритами, большими подвижными массами обладают повышенной силовой характеристикой пневмоприводов, связанной с криогенным упрочнением материалов уплотнительных устройств затворов и жесткими требованиями по герметичности. Вполне закономерно, что следствием этого является высокий уровень динамического нагружения при их срабатывании. Именно данный динамический процесс, как показывает практика, является одним из определяющих факторов с точки зрения сохранения параметров работоспособности, обеспечения требуемого ресурса и соответственно надежности функционирования агрегата.

Несомненным является и то обстоятельство, что решение задачи математического моделирования динамического процесса нагружения при срабатывании топливных пневмоклапанов является наиболее ценным на ранних этапах проектирования, так как это позволяет в последующем сократить сроки и затраты на проведение отработки и выдачи заключения для штатной эксплуатации в составе ракетоносителя. Получение точных аналитических решений динамического нагружения от срабатывания – это крайне сложная и в подавляющем числе случаев неразрешимая задача в силу физической нелинейности уравнений состояния процесса и большого числа параметров системы, влияющих на него. Предпочтительным способом решения данной задачи при проектировании является использование метода конечных элементов динамики механизмов и приводов, который реализован в специализированных расчетных комплексах с использованием современной вычислительной техники. Однако их использование требует специальных теоретических исследований, направленных на обоснование согласованного выбора параметров пневматической, гидравлической и механической систем агрегата, обеспечивающих допустимый уровень нагружения элементов конструкции.

Изложенные обстоятельства и определяют актуальность темы диссертационной работы, заключающейся в разработке новых методов выбора параметров при проектировании для создания высоконадежных топливных пневмоклапанов ракетоносителя сверхтяжелого класса.

Цель работы. Исследование динамических процессов нагружения, возникающих при срабатывании криогенного топливного пневмоклапана, и разработка методов выбора параметров из условия обеспечения допустимого уровня нагружения.

Задачи исследования:

- 1) провести анализ проблем обеспечения технических характеристик при проектировании криогенных топливных пневмоклапанов ракетоносителей;
- 2) провести исследование динамического нагружения при срабатывании пневмоклапанов методами математического моделирования;

- 3) определить порядок разработки и построения математических и конечно-элементных моделей в расчетах динамического нагружения при срабатывании пневмоклапанов;
- 4) разработать критерии и условия, обеспечивающие допустимый уровень нагружения при срабатывании пневмоклапанов;
- 5) провести сравнительный анализ результатов расчетов при проектировании и испытаниях пневмоклапанов окислительной системы центрального блока ракетносителя “Энергия”.

Объект исследования. Объектом исследования является механическая система (конструкция) топливного пневмоклапана ракетносителя, нагруженная силами от воздействия на нее пневматической и гидравлической систем.

Предмет исследования. Предметом исследования является динамический переходный процесс нагружения конструкции при срабатывании топливного пневмоклапана.

Методы исследования. Методической базой теоретических исследований динамического процесса нагружения при срабатывании пневмоклапанов является использование расчетных моделей теории механического удара и колебаний и моделирования методом конечных элементов.

Научная новизна: теоретически обоснованы и предложены новые методы выбора параметров проектирования криогенных топливных пневмоклапанов ракетносителей, которые обеспечивают допустимый уровень динамического нагружения при срабатывании.

Практическая ценность заключается в разработке методов проектирования топливных пневмоклапанов, позволяющих значительно улучшить показатели ресурса, прочности конструкции и надежности функционирования агрегатов в целом, что позволило применить их при создании агрегатов окислительной системы центрального блока ракетносителя «Энергия».

Достоверность основных научных результатов обеспечивается обоснованностью исходных представлений о физической природе процессов, строгостью математического аппарата, принятых допущений и упрощений, сравнением данных расчетов по предложенным моделям с экспериментальными значениями, полученными при проведении наземных испытаний агрегатов топливной окислительной системы центрального блока ракетносителя «Энергия».

Апробация работы проводилась на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». Самара, СамГТУ, 2010 г.;

2. Заседаниях научно-технического совета ЗАО ВКБ РКК «Энергия», Самара, 2003- 2010 г.г.;
3. Заседаниях кафедры прочности летательных аппаратов государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)», 2003- 2010 г.г..

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, списка использованных источников из 79 наименований и 3 приложений. Общий объем диссертации 184 страницы, 57 рисунков и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа посвящена исследованию динамических процессов нагружения и обеспечения прочности конструкции, надежности функционирования при срабатывании криогенных топливных пневмоклапанов сверхтяжелого ракетносителя. При проведении исследования использованы проектная и конструкторская документация, расчеты при проектировании, отчеты по программам автономной отработки и обобщен практический опыт работы конструкторских подразделений на Волжском Филиале НПО «Энергия» имени С.П. Королева (в настоящее время ЗАО ВКБ РКК «Энергия») по созданию топливных пневмоклапанов для центрального блока ракетно-космической системы «Энергия». Под руководством Главного конструктора Пензина Б.Г., а затем Петренко С.А. коллектив конструкторского бюро разработал конструкторскую документацию, обеспечил производство, наземную отработку, транспортировку, сборку на испытательном полигоне центрального (Ц) и стартово-стыковочного (Я) блоков ракетносителя.

Автор принимал непосредственное участие в разработке конструкций, проведении испытаний около 100 наименований агрегатов автоматики пневмогидравлических систем, различных устройств силовых связей, защитных устройств и ряда специальных механизмов для блоков Ц и Я ракетносителя «Энергия». В практику проектирования были внедрены новые методики и программные комплексы по расчетам на прочность, нагружения и расчетов динамических процессов срабатывания агрегатов, механизмов и устройств ракетно-космической техники.

В исследуемую группу пневмоклапанов окислительной системы центрального блока ракетносителя «Энергия» в данной диссертационной работе входят: пневмоклапан отсечной, пневмоклапан циркуляции, пневмоклапан закольцовки циркуляции, пневмоклапан слива, пневмоклапан заправки и термостатирования, пневмоклапан отсечки магистрали циркуляции. При этом общая масса агрегата составляет от 18 до 93 кг, масса подвижной части - от 2 до 28 кг. Диаметр условного проходного сечения корпуса составляет от 0,080 до 0,300 м.

Во введении обоснована актуальность темы и выбранного направления исследований, дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор научно-технической литературы, посвящённой проблемам проектирования пневмоклапанов ракетносителей по следующим направлениям:

- общие вопросы проектирования агрегатов пневмогидравлических систем (ПГС) ракетносителей;
- теоретические основы и методики расчета основных характеристик и параметров клапанов;
- конструктивное исполнение узлов и агрегатов в целом;
- автономная (наземная) отработка;
- технология производства;
- эксплуатация и ремонт;
- надежность.

Актуальные вопросы проектирования агрегатов ракетно-космических и авиационных систем рассматриваются в работах Бугаенко В.Ф., Ратманского О.И., Эдельмана Л.И., Дмитриева В.Н., Кондратьевой Т.Ф., Киселева П.И., Гуревича Д.Ф., Квасова В.М., Чегодаева Д.Е., Мулюкина О.П., Долотова А.М., Огара П.М. и ряда других авторов.

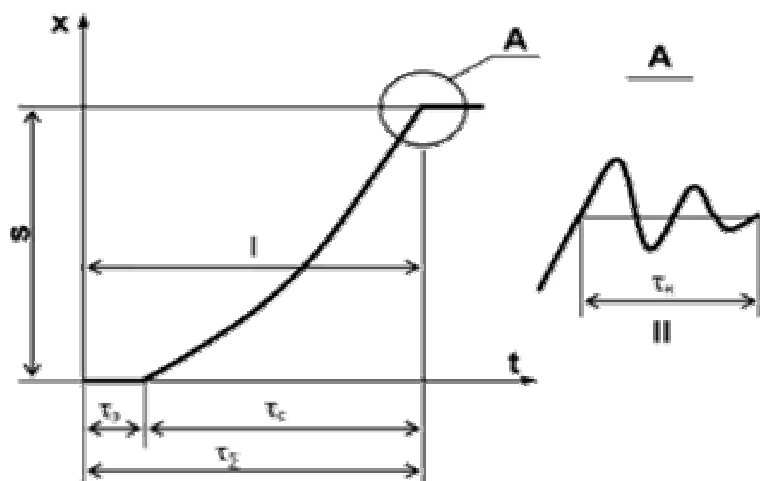
Проектированию криогенной арматуры посвящены работы Романенко Н.Т., Филина Н.В., Куликова Ю.Ф., Макушкина А.Н. и других авторов.

Отмечено, что процесс динамического нагружения при срабатывании пневмоклапанов является весьма специфическим, и малоизученным. В научно-технической литературе приводятся лишь отдельные сведения, имеющие отношение к исследованию частных вопросов, например, обеспечению плавности хода пневмопривода и снижению скорости его движения при срабатывании.

Автором установлено, что наиболее оптимальным вариантом решения задачи динамики срабатывания пневмоклапана является разбиение его на два этапа исходя из циклограммы этого процесса (рис.1).

Этап I представляет собой время τ_{Σ} перемещения поршня от момента подачи управляющего газа до момента начала контактирования подвижной части с корпусом клапана. Время τ_{Σ} складывается из времени задержки τ_z и времени срабатывания τ_c . Этап II – это режим динамического нагружения до затухания процесса (время τ_k) из-за воздействия диссипативных сил на механическую систему.

Теоретическому расчёту динамики срабатывания клапана на этапе I и его практическому применению посвящено большинство работ, связанных с проектированием агрегатов пневмогидравлических систем ракетносителей. Этап II является весьма сложным и специфическим вопросом и в открытой научно-технической литературе не рассматривается.



τ_z – время задержки; τ_c – время срабатывания; τ_z – суммарное время срабатывания;
 τ_k – время динамического нагружения.

Рисунок 1 – Циклограмма срабатывания пневмоклапана

Поскольку проблема динамического нагружения при срабатывании не является изолированной от других в общем плане обеспечения надежности функционирования, то в данной главе рассматриваются и вопросы, связанные с проектированием криогенных топливных пневмоклапанов ракетополетителей и факторов, влияющих на особенности моделирования исследуемых процессов:

- условия эксплуатации;
- критерии эффективности разработок;
- применяемые конструкционные материалы;
- применяемые варианты клапанных уплотнений;
- расчеты на прочность при разработке конструкции агрегатов;
- проблема динамического нагружения при срабатываниях;
- программа обеспечения надежности.

Данные факторы определяют специфику моделирования динамического нагружения при срабатывании и методические основы разработки критериев и условий выбора параметров при проектировании топливных пневмоклапанов.

На основании рассмотренных литературных источников сделан вывод, что конструкция пневмоклапанов, подобная агрегатам окислительной системы центрального блока (бл.Ц) ракетополетителя «Энергия», выполненная по принципиальной схеме с концентрической тарелью, является наиболее оптимальной по своему исполнению с точки зрения обеспечения высокой надежности и минимальной массы.

Вместе с тем такие конструкции имеют мощные пневмоприводные устройства управления для обеспечения жестких требований по герметичности рабочей полости, что приводит к высокому уровню динамического нагружения при срабатывании. Вследствие этого данная проблема требует сво-

его решения на этапе проектирования агрегатов и является предметом рассмотрения в диссертационной работе.

Во второй главе проведено исследование динамического нагружения при срабатывании методами математического моделирования теории механического удара и колебаний. Также рассмотрены особенности использования метода конечных элементов динамики механизмов и приводов при решении подобных практических задач. Исследуемая цепочка элементов конструкции пневмопривод-тарель-седло корпуса с действующими на них силами является сложной системой и для проведения расчетов требуется приведение ее к эквивалентной с точки зрения массовых, жесткостных и диссипативных характеристик. Методы приведения к эквивалентной системе являются одинаковыми при использовании любого способа расчета. Критерием правильности приведения является равенство собственных частот учитываемых степеней свободы системы.

Применительно к теории механического удара и колебаний математическая модель для расчета динамического нагружения при срабатывании в общем виде представлена на рис. 2.

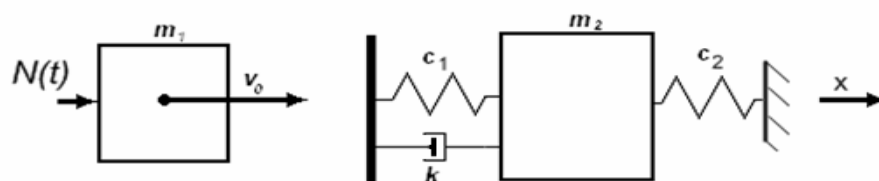


Рисунок 2 – Расчетная модель динамического нагружения при срабатывании

На рис. 2 m_1, m_2 – массы соударяющихся тел; c_1, c_2 – коэффициенты жесткости буфера; v_0 – скорость тела перед ударом; x – текущая координата; k – коэффициент пропорциональности силы неупругого сопротивления; $N(t)$ – равнодействующая от активных сил на подвижную часть.

Для анализа влияния составляющих параметров модели на процесс нагружения при соударении рассмотрены частные случаи одномассовых моделей, которые имеют решение дифференциальных уравнений в замкнутой форме:

- 1) модель с безынерционным элементом и постоянно действующей силой;
- 2) упругопластическая модель с параллельным соединением упругого элемента «сухого» трения;
- 3) модель с безынерционным упругим и вязким элементом.

Отмечено, что для системы с демпфером турбулентного истечения жидкости или газа, когда сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости движения, решения в замкнутой форме в литературе не приводится. Приближенное решение такого уравнения для случая низкого уровня демпфирования приводится в работах Пановко Я.Г..

Рассмотренные примеры на простых расчетных моделях теории механического удара и колебаний строго и определенно устанавливают зависимости между параметрами механической системы, начальными условиями,

действующими силами, что дает разработчику направление поиска в выборе оптимальных решений при проектировании в случае использования расчетных комплексов, реализующих метод конечных элементов динамики механизмов и приводов.

Важными особенностями расчетов динамического нагружения при срабатывании пневмоклапанов являются:

- сложность конструкции и ее приведение к эквивалентной дискретной модели;
- сложные зависимости по времени сил от давления газа и рабочей жидкости;
- необходимость получения начальных кинематических условий;
- нелинейные упругие характеристики элементов конструкции;
- нелинейный характер действия диссипативных сил;
- возможные изменения в расчетной модели, связанные с потерей контакта сопрягаемых частей.

Все эти факторы, которые непременно должны быть учтены при моделировании процесса, делают затруднительным использование в расчетах обычных методов теории механического удара и колебаний.

Поэтому в практических расчетах при проектировании агрегатов предпочтение отдается специализированным расчетным комплексам, реализующих метод конечных элементов динамики механизмов и приводов. Теоретические основы использования метода конечных элементов в динамическом анализе механизмов и приводов подробно приведены в работе Куркова С.В.. Основной особенностью указанного метода является то обстоятельство, что рассматриваются динамические процессы с учетом больших перемещений механических систем и с учетом таких факторов, как упругость звеньев, переменность структуры моделируемого объекта в процессе работы, трения в кинематических парах, предполагается возможность анализа в рамках одной модели элементов, различающихся физическими принципами действия.

Общий вид уравнения движения системы:

$$|M|\{\ddot{Q}\} + |C|\{\dot{Q}\} + |K|\{Q\} = \{F_e\} + \{F_0\} + \{G\} + \{I\}, \quad (1)$$

где $|M|$ – глобальная матрица масс системы; $|C|$ – глобальная матрица демпфирования системы; $|K|$ – глобальная матрица жесткости системы; $\{F_e\}$ – глобальный вектор внешних сил системы; $\{F_0\}$ – глобальный вектор узловых усилий начальных деформаций элемента; $\{I\}$ – глобальный вектор связанных узловых сил инерции; $\{G\}$ – глобальный вектор дополнительных узловых усилий.

В численных методах интегрирования уравнений движения обычно используются методы Вильсона, нецентральных разностей третьего порядка, прямоугольников со сглаживанием и некоторые другие.

Для упрощения практических вычислений процесса динамического нагружения методами конечных элементов дано обоснование следующих допущений и условий:

- перемещения подвижной части при динамическом нагружении стыка малы по сравнению с ходом привода;
- силы от давления газа на подвижную часть зависят только от времени;
- упругие характеристики элементов конструкции пневмоклапана являются линейными.

В третьей главе рассматриваются вопросы практического построения конечно-элементных моделей для расчета динамического нагружения при срабатывании пневмоклапанов применительно к расчетному комплексу «Зенит», использованного для исследований в данной работе.

Общая схема конечно-элементной модели, предназначенной для расчета динамического нагружения при срабатывании, приведена на рис. 3.

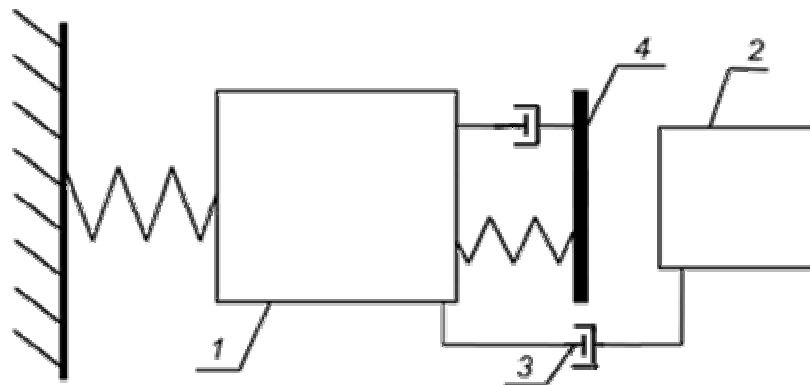


Рисунок 3 – Общая схема конечно-элементной модели для расчета динамического нагружения

На рис. 3 элементы 1, 2 представляют собой подконструкции (супер-элементы), моделирующие соответственно неподвижную и подвижные части пневмоклапана. Элемент 3 предназначен для моделирования диссипативных сил; элемент 4 моделирует место контакта. Рассмотрены вопросы, которые представляют собой некоторые особенности при построении расчетных моделей динамического нагружения при срабатывании пневмоклапанов. Этими особенностями являются теоретические основы определения:

- начальных условий для расчета (кинематических и динамических);
- зависимостей по времени сил от давления газов в выхлопной и управляющей полостях;
- зависимости по времени силы от гидравлической среды на тарель клапана.

При разработке конечно-элементной модели и проведении расчетов динамического нагружения требуются в качестве исходных данных значения параметров механической, пневматической и гидравлической системы в момент времени $t = 0$, которые являются начальными условиями. Определение указанных параметров относится к задаче движения пневмопривода до момента начала контактирования подвижной и неподвижной частей пневмоклапана.

Принципиальная схема топливного пневмоклапана приведена на рис. 4.

При решении задачи динамики срабатывания пневмоклапана на этапе I механическая система (пневмопривод с тарелью) рассматривается как абсо-

$$\varphi\left(\frac{p_{\Gamma}^{(+)}}{p_M^{(+)}}\right) = \left[\left(\frac{p_{\Gamma}^{(+)}}{p_M^{(+)}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_{\Gamma}^{(+)}}{p_M^{(+)}}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]^{0,5} \quad \text{при} \quad \frac{p_{\Gamma}^{(+)}}{p_M^{(+)}} > 0,528;$$

$$\varphi\left(\frac{p_{\Gamma}^{(+)}}{p_M^{(+)}}\right) = 0,258 \quad \text{при} \quad \frac{p_{\Gamma}^{(+)}}{p_M^{(+)}} \leq 0,528;$$

$p_M^{(+)}, p_M^{(-)}, p_{\Gamma}^{(+)}, p_{\Gamma}^{(-)}, p^{(+)}, p^{(-)}$ – давление в подводящих линиях управляющего газа и жидкости в расходной магистрали; $f_{\Xi}^{(+)}, f_{\Xi}^{(-)}, F_{\Pi}^{(+)}, F_{\Pi}^{(-)}, F_T^{(+)}, F_T^{(-)}$ – эффективные площади проходного сечения подводящих линий управляющего газа, поршня и тарели клапана; x, x_0 – текущее и начальное положения поршня; M – масса подвижных частей; N_0 – постоянная составляющая нагрузки; H – коэффициент жесткости упругих элементов; P_{mp} – суммарная сила трения.

Совокупность приведенных уравнений составляет математическую модель пневмоклапана при его работе на этапе I. Совместное решение уравнений выполняется численными методами (Рунге-Кутта, Адамса, Эйлера и т.д.)

Закономерности изменения действующих сил по времени при расчете динамического нагружения следующие:

- зависимость по времени силы управляющего давления на пневмопривод при расчете динамического нагружения определяется процессом наполнения газом ограниченного объема (управляющей полости);
- зависимость по времени силы от давления газа в выхлопной полости на пневмопривод определяется временем процесса истечения газа из ограниченного объема;
- зависимость силы гидравлической среды на тарель определяется законом изменения по времени давления гидроудара в топливной магистрали при закрытии или законом обтекания тела жидкостью при открытии.

Четвертая глава посвящена вопросу обеспечения допускаемого уровня нагружения при срабатывании на этапе проектирования криогенных пневмоклапанов. Введено определение допускаемой нагрузки при динамическом нагружении. Под допускаемой нагрузкой понимается максимальное по амплитуде значение динамической силы, при котором должны выполняться следующие условия:

- обеспечение нормативных запасов по прочности;
- обеспечение требуемого ресурса срабатываний;
- в уплотнениях затворов удельное давление не должно превышать допускаемых значений;
- пластические деформации допускаются только в поверхностных слоях контактируемых деталей, а в остальных местах они отсутствуют.

Одним из определяющих вопросов допускаемого уровня динамического нагружения при проектировании является получение прогнозируемых начальных параметров – скорости подвижной части в конце хода и действующей на нее силы. Это связано с получением установившегося (близкого к равномерному) движению пневмопривода перед началом контактирования.

С достаточной для расчетов точностью условие получения режима движения пневмопривода, близкого к установившемуся, записывается в виде:

$$\delta \leq \delta_y, \text{ где } \delta = v_{cp} \sqrt{\frac{m}{Ps}}. \quad (7)$$

Входящая в выражение (7) величина v_{cp} представляет среднюю скорость поршня; m – масса подвижных частей; P – сила сопротивления, приложенная к поршню; s – его ход.

Как показал анализ срабатывания крупногабаритных пневмоклапанов с большими перемещаемыми массами, условие установившегося движения может быть получено только введением искусственного сопротивления, создаваемого установкой дроссельных шайб или демпферов.

Разработка критериев и условий обеспечения допустимого уровня динамического нагружения выполнена в данной работе для случаев применения в конструкциях топливных пневмоклапанов встроенных демпферов гидравлического и пневматического действия. Такие устройства представляют собой жестко связанный с корпусом цилиндр с поршнем, который в свою очередь жестко связан с подвижной частью, и малым отверстием в дроссельной шайбе на выходе из демпфера. В качестве рабочего тела в демпфере используется рабочая жидкость на штатных режимах эксплуатации или газ при контрольных испытаниях технологического характера. В работе приведены формулы для определения коэффициентов сопротивления этих устройств. Аналитические зависимости по определению критериев и условий выбора параметров получены на математических моделях при одновременном решении поставленной задачи двумя методами:

- методами теории механического удара и колебаний;
- конечно-элементного моделирования динамического нагружения для реальных конструкций исследуемой группы пневмоклапанов окислительной системы центрального блока РН «Энергия» (пневмоклапанов отсечного и циркуляции).

В работе установлено, что условием обеспечения допустимого уровня нагружения конструкции с гидравлическим демпфером является выполнение неравенства, при котором коэффициент сопротивления должен быть больше значения, определяемого параметрами системы:

$$k \geq 2\pi \frac{\sqrt{cm}}{v_0} \text{ или } k \geq \frac{4\pi^2 cm}{N_0}. \quad (8)$$

В формулах (8) c – приведенная жесткость; m – масса подвижной части; v_0 – начальная скорость перед ударом; N_0 – равнодействующая активных сил на подвижную часть.

Условием обеспечения допустимого уровня нагружения конструкции с пневматическим демпфером при срабатывании является выполнение двух неравенств: первое неравенство определяет характерное время нарастания результирующей силы от давления газов на подвижную часть $\tau > 12T$, где T – период низшей собственной частоты колебаний механической системы;

второе – начальную скорость подвижной части перед ударом $v_0 < \frac{[N]}{\sqrt{cm}}$, где $[N]$ – допускаемая нагрузка в контакте частей пневмоклапана.

По результатам расчётов для конструкции с гидравлическим демпфером определена область допускаемых начальных параметров механической системы перед ударом, в которой обеспечивается условие допускаемого нагружения. Эта область в графическом виде приведена на рис. 5.

На рис. 5 кривая 1 – область допускаемых параметров N_0, v_0 для системы без демпфера, кривая 2 – с демпфером. Точка A соответствует значению коэффициента сопротивления $k = \infty$, точка B – значению $k = k_{\min}$; v_0^1 – максимальная скорость пневмопривода, при которой обеспечивается допускаемый уровень динамического нагружения при $N_0 \approx [N]$. При уменьшении значения коэффициента сопротивления гидравлического демпфера до $k = 0$ зависимости 1 и 2 сходятся в точке C.

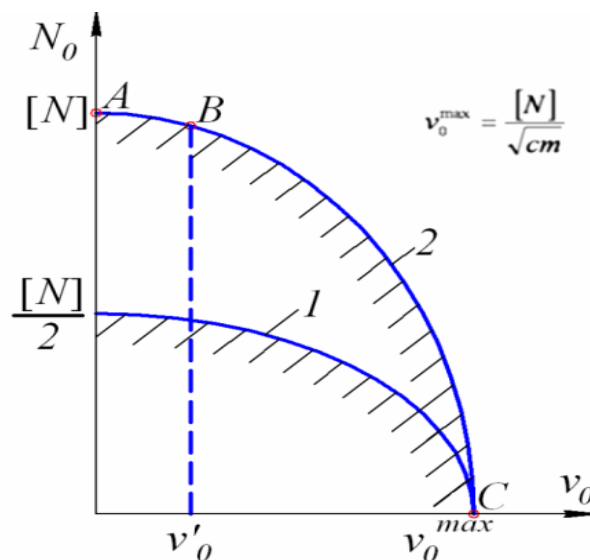


Рисунок 5 – Область допускаемых начальных параметров системы с гидравлическим демпфером

В пятой главе проведен анализ и сравнение расчетных и экспериментальных значений параметров пневмоклапанов окислительной системы центрального блока ракетносителя «Энергия». При проектировании указанных агрегатов были выполнены газодинамические расчеты по определению времени срабатывания, а также расчеты на прочность. Техническим заданием на разработку была назначена вероятность безотказной работы $P_\gamma = 0,999$ при доверительной вероятности $\gamma = 0,9$. Пневмоклапаны исследуемой группы прошли полный цикл наземных автономных испытаний по программам конструкторско-доводочных испытаний (КДИ), чистовых испытаний (ЧИ), испытаний на надежность (ИН). В диссертации проведен сравнительный анализ результатов расчёта параметров при проектировании с их эксперименталь-

ными значениями, полученными при наземных испытаниях по следующим свойствам и характеристикам:

- прочности конструкции;
- времени срабатывания;
- динамическому нагружению;
- ресурсу и надежности функционирования.

Проверочные расчеты на прочность были выполнены на этапе разработки конструкторской документации и оформлены в виде научно-технических отчетов, в которых приведены запасы прочности конструкций пневмоклапанов. В отчетах использовались стандартные методики расчета на прочность деталей машин и механизмов, строительной механики оболочек, расчетные комплексы, реализующие метод конечных элементов, проблемно-ориентированные комплексы программ.

Расчеты статической прочности конструкции пневмоклапанов были подтверждены испытаниями до разрушения на завершающей стадии программ наземной отработки в разделах специальных испытаний. Испытания проведены на нескольких образцах от партии каждого агрегата гидравлическим методом до разрушения.

Минимальное значение разрушающего давления определяется нормами прочности на разработку ракетносителя и агрегатов ПГС. Результаты испытаний до разрушения приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний пневмоклапанов до разрушения

Наименование агрегата	Рабочая полость		Управляющая полость	
	Максимальное эксплуатационное давление $P_{э}$, МПа	Разрушающее давление P_p , МПа	Максимальное эксплуатационное давление $P_{э}$, МПа	Разрушающее давление P_p , МПа
Пневмоклапан отсечной	4,41	>6,62	22,56	>50,72
Пневмоклапан циркуляции	4,41	>6,62	22,56	>50,72
Пневмоклапан закольцовки циркуляции	3,92	>5,89	22,56	>50,72
Пневмоклапан слива	3,92	>5,89	22,56	>50,72
Пневмоклапан заправки и термостатирования	4,41	>6,62	22,56	>50,72
Пневмоклапан отсечки магистрали циркуляции	0,78	>1,19	22,56	>50,72

Расчеты динамики срабатывания пневмоклапанов были проведены на этапе проектирования и разработки конструкторской документации на основе принципиальных схем этих устройств. Их главной целью является проверка выбранных параметров для обеспечения требуемого времени срабатывания. Расчеты срабатывания выполнены с использованием специально разработанных программ, в основе которых лежат численные методы интегрирования уравнения движения твердого тела.

Замеры времени срабатывания пневмоклапанов при проведении испытаний выполнялись для двух случаев: при наличии компонента в рабочей полости и без него («сухое срабатывание»).

Результаты расчетов и замеров времени срабатывания для исследуемой группы топливных пневмоклапанов приведены в табл. 2 и 3.

Из данных табл. 2 можно видеть, что при бескомпонентном срабатывании наблюдается достаточно большая погрешность между расчетными и экспериментальными значениями. Как показали исследования записей циклограмм, эта погрешность связана в первую очередь с большим расхождением по времени задержки срабатывания, которое в итоге и повлияло на суммарное время срабатывания. Погрешность времени собственно движения пневмопривода не превысила 30%. При срабатывании на компоненте (табл. 3) расхождение расчетного и полученного в результате испытаний времени срабатывания значительно меньше, в связи с малыми скоростями движения пневмопривода.

Таблица 2 – Время срабатывания пневмоклапанов без компонента в гидравлической системе

№ п/п	Наименование агрегата	Вариант срабатывания	Время срабатывания по расчету, с	Время срабатывания по испытаниям, с
1	Пневмоклапан отсечной	закрытие	0,045	0,07÷0,11
2	Пневмоклапан циркуляции	закрытие	0,032	0,09÷0,16
3	Пневмоклапан закольцовки циркуляции	открытие	0,06	0,03÷0,05
		закрытие	0,57	0,22÷0,26
4	Пневмоклапан слива	открытие	0,73	0,23÷0,31
		закрытие	0,07	0,02÷0,08
5	Пневмоклапан заправки и термостатирования	открытие	0,09	0,06÷0,14
		закрытие	0,98	0,92÷1,22
6	Пневмоклапан отсечки магистрали циркуляции	открытие	0,13	0,10÷0,16
		закрытие	0,06	0,03÷0,05

Таблица 3 – Время срабатывания пневмоклапанов с компонентом в гидравлической системе

№ п/п	Наименование агрегата	Вариант срабатывания	Время срабатывания по расчету, с	Время срабатывания по испытаниям, с
1	Пневмоклапан отсечной	закрытие	0,60	0,79÷0,94
2	Пневмоклапан циркуляции	закрытие	0,72	0,60÷0,86

Исходя из анализа расчетных и экспериментальных значений скорости движения пневмопривода на конечном участке, результаты расчета динамики срабатывания (этап I) при проектировании рекомендуется использовать в качестве начальных условий в расчетах динамического нагружения:

- 1) для систем с гидравлическим демпфером выбранные параметры должны обеспечивать увеличенное в 1,3÷1,5 раза значение коэффициента сопротивления по сравнению с его минимальным значением (k_{min});

- 2) для систем с пневматическим демпфированием выбранные параметры должны обеспечивать уменьшенное в $1,3 \div 1,5$ раза значение начальной скорости перед ударом по сравнению с максимально допустимой.

В данном разделе приведены также расчеты динамического нагружения отсечного пневмоклапана и пневмоклапана циркуляции, в конструкции которых используются встроенные демпферы. Расчеты выполнены для режимов работы демпфера на жидком и газообразном продукте в его полости. Их результаты приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4 – Коэффициенты сопротивления демпфера и результаты расчета динамического нагружения

Наименование пневмоклапана	k_{\min} , кг/м	k , кг/м		Сила в контакте		Коэффициент динамичности
		По расчету	По испытаниям	N_{\max} , кН	N_{cm} , кН	
Отсечной пневмоклапан	$3,5 \cdot 10^6$	$5,5 \cdot 10^6$	$(6,7 \div 9,6) \cdot 10^6$	75,80	74,80	1,01

Таблица 5 – Коэффициенты сопротивления демпфера и результаты расчета динамического нагружения

Наименование пневмоклапана	k_{\min} , кг/м	k , кг/м		Сила в контакте		Коэффициент динамичности k_d
		По расчету	По испытаниям	N_{\max} , кН	N_{cm} , кН	
Пневмоклапан циркуляции	$1,1 \cdot 10^7$	$4,8 \cdot 10^7$	$(3,3 \div 6,8) \cdot 10^7$	35,87	35,85	1,001

Анализ результатов динамического нагружения отсечного пневмоклапана и пневмоклапана циркуляции подтверждают правильный выбор метода расчета динамики срабатывания, статической прочности, динамического нагружения. Результаты испытаний пневмоклапанов по определению ресурса безотказной работы в ряде случаев на порядок превышают требуемый по техническому заданию ресурс.

Оценка надежности срабатывания пневмоклапанов при проведении автономной отработки была выполнена по специально разработанной методике, в основе которой положен закон нормального распределения ресурса безотказной работы. Данное распределение применяется для описания отказов, вызванных износом деталей.

Для оценки надежности в соответствии с отраслевой методикой расчета была использована параметрическая модель, в которой в качестве параметров работоспособности использованы показатели прочности, герметичности рабочей и управляющей полостей, времени срабатывания агрегатов.

Показатели надежности для пневмоклапанов исследуемой группы приведены в табл. 6.

Количественная оценка надежности и ее показатели как вероятность безотказной работы, удовлетворяющие требованиям технического задания, подтверждают правильный выбор методов расчета при проектировании, раз-

работке конструкторской документации и объемов программ проведения автономных испытаний.

Таблица 6 – Количественные показатели надежности для пневмоклапанов окислительной системы блока «Ц» РН «Энергия»

Наименование агрегата	Количество образцов на испытаниях			Гарантированный ресурс на этапной эксплуатации*			Вероятность безотказной работы P_{γ} ($\gamma = 0,9$)
	КДИ	ЧИ	ИН	А	Б	В	
Пневмоклапан отсечной	5	3	5	30	100	3	0,999610
Пневмоклапан циркуляции	5	3	4	30	100	5	0,999891
Пневмоклапан закольцовки циркуляции	5	6	5	30	100	3	0,999123
Пневмоклапан слива	5	3	5	30	50	5	0,999080
Пневмоклапан заправки и термостатирования	5	7	5	30	150	100	0,999941
Пневмоклапан отсечки магистрали циркуляции	4	3	5	30	50	50	0,999310

*Этап А – сборка РН;

Этап Б – технологическая подготовка на стартовой позиции;

Этап В – штатная эксплуатация РН.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенного комплекса теоретических исследований и сравнения расчетных параметров проектируемых криогенных топливных пневмоклапанов с их значениями при испытаниях по программам автономной наземной отработки разработаны новые научно обоснованные методы проектирования, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в области создания высоконадежных агрегатов автоматики ПГС ракетносителей.

В порядке подведения итогов исследования сформулированы следующие основные результаты и выводы:

1. Предложен и реализован единый подход к исследованию процесса динамического нагружения при срабатывании криогенного топливного пневмоклапана. Исходя из необходимости разбивки процесса динамики срабатывания на два этапа, позволяющего значительно упростить решение задачи нагружения, в качестве методов исследования определено совместное использование метода теории механического удара и колебаний и метода конечных элементов динамики механизмов и приводов.

2. Разработан общий порядок построения расчетных моделей теории механического удара и колебания, основанный на приведении исследуемой механической системы к эквивалентной. Обоснованы и введены основные допущения которые позволяют значительно упростить решение задачи расчета процесса динамического нагружения при срабатывании.

3. Проведен анализ особенностей использования расчетного комплекса «Зенит», реализующего метод конечных элементов динамики механизмов и приводов в расчетах динамического нагружения. При этом установлена достаточность объема библиотеки конечных элементов для моделирования воздействия активных и диссипативных сил, граничных и других условий. Для моделирования подвижной и неподвижной частей конструкции рекомендовано применение метода подконструкций (суперэлементов).

4. Разработаны и предложены для практического применения критерии и условия допускаемого нагружения при выборе параметров проектируемого криогенного топливного пневмоклапана сверхтяжелого ракетносителя, в котором применяются встроенные демпферы комбинированного действия. Данные условия в виде аналитических выражений связывают параметры механической, пневматической и гидравлической систем пневмоклапана.

5. Проведен сравнительный анализ значений расчетных параметров при проектировании с их значениями при испытаниях для группы исследуемых пневмоклапанов окислительной системы блока Ц ракетносителя «Энергия». Тем самым подтвержден правильный выбор следующих методик расчета при проектировании пневмоклапанов:

- газодинамического расчета;
- расчета статической прочности;
- расчета динамического нагружения при срабатывании.

6. Сформулированные в работе принципы проектирования и их использование при создании криогенных топливных пневмоклапанов исследуемой группы окислительной системы блока Ц ракетносителя «Энергия», позволили создать высоконадежные агрегаты с ресурсом, значительно превышающим требуемый и на испытании небольшой партии агрегатов (не более 17 единиц) подтвердить требуемую надежность по техническому заданию на разработку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО:

в рецензируемых журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. **Сазанов, В.П.** Расчеты динамического нагружения в задачах обеспечения прочности и надежности функционирования топливных пневмоклапанов сверхтяжелого ракетносителя. / В.П. Сазанов // Вестник СамГТУ. Технические науки. – №2 (26) – Самара, 2010. – С. 131-139.

2. **Сазанов, В.П.** Диагностика и контроль деформационного состояния лопаток турбоагрегатов. Контроль. Диагностика. / А.И. Данилин, В.П. Сазанов, А.Ж. Чернявский // – №1. – М.: Машиностроение, 2003 г. – С. 23-28.

в других изданиях:

3. **Сазанов, В.П.** Особенности использования метода конечных элементов в расчетах на прочность при проектировании конструкций элементов автоматических устройств ракетно-космической техники – РК техника. / В.П. Сазанов // Научно-технический сборник. – Серия XII. Выпуск 1 – Самара, ВКБ РКК «Энергия», 2002 г. – С. 73-78.

4. **Сазанов, В.П.** Анализ прочностных характеристик при проектировании раскрытия центрального радиационного теплообменника – РК техника./ В.П. Сазанов, А.В. Пекарш // Научно-технический сборник. – Серия XII. Выпуск 1 – Самара: ВКБ РКК «Энергия», 2002 г. – С. 79-93.

5. **Сазанов, В.П.** Прочность при проектировании и наземной отработке пневмоагрегатов топливной арматуры тяжелого ракетносителя. – РК техника. / В.П. Сазанов // Научно-технический сборник. – Серия XII. Выпуск 1 – Самара: ВКБ РКК «Энергия», 2003 г. – С. 69-77.

6. **Сазанов, В.П.** Расчет на прочность при проектировании головных обтекателей для ракеты космического назначения типа «Воздушный старт» – РК техника. / В.П. Сазанов, А.В. Пекарш // Научно-технический сборник. – Серия XII. Выпуск 1 – Самара: ВКБ РКК «Энергия», 2001 г. – С. 78-87.

7. **Сазанов, В.П.** Расчет на прочность пускового устройства авиационно-ракетного комплекса космического назначения – РК техника. / В.П. Сазанов, А.В. Пекарш // Научно-технический сборник. – Серия XII. Выпуск 1 – Самара: ВКБ РКК «Энергия», 2001 г. – С. 70-77.

8. **Сазанов, В.П.** Математическое моделирование нагружения при срабатывании пневмоклапанов ракетносителей. / В.П. Сазанов // Математическое моделирование и краевые задачи МЗЗ. Труды седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. – Ч.1: Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций – Самара: СамГТУ, 2010. – С. 305-308.