



Алиев Андрей Рафаилович

**Методики автоматизированного наполнения полостей
изделий ракетно-космической техники газом
при пневмовакуумных испытаниях**

2.5.10. Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника,
гидро- и пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ковров
2023

Работа выполнена в конструкторском бюро «Арматура» – филиале акционерного общества «Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева» (КБ «Арматура» – филиал АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, начальник расчетно-аналитического отдела конструкторского бюро «Арматура» – филиала акционерного общества «Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева»
Халатов Евгений Михайлович

Официальные оппоненты:

Щерба Виктор Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидромеханика и транспортные машины», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), г. Омск

Труханов Кирилл Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры Э10 «Гидромеханика, гидромашин и гидропневмоавтоматика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана), г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» (Самарский университет), г. Самара

Защита диссертации состоится «28» марта 2023 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.5.10.27 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru> Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « ____ » _____ 20 ____ г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.5.10.27,
кандидат технических наук Соловьёва Ольга Александровна



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Герметичность изделий ракетно-космической техники (РКТ) является одним из базовых параметров их надежности, влияющим на работоспособность той или иной конструкции, а в ряде случаев и на жизни людей, участвующих в их подготовке к пуску, и в процессе полета (для случая пилотируемых аппаратов).

Высокие требования к герметичности изделий РКТ, работающих под высоким избыточным давлением, обоснованы спецификой работы устройств, агрегатов и систем, входящих в состав ракетно-космических комплексов.

В настоящее время, степень негерметичности изделий РКТ определяется в процессе проведения испытаний 100 % изделий, как на заводе-изготовителе, так и при проведении пневмовакуумных испытаний (ПВИ) на технических позициях (ТП) космодрома. Объектами ПВИ выступают около половины сборочных единиц изделий РКТ, в том числе система жизнеобеспечения и пневмогидравлическая система.

ПВИ являются одним из наиболее ответственных и ресурсозатратных этапов предпусковой подготовки изделий РКТ. При этом одним из самых затратных процессов, проводимых при ПВИ, является наполнение проверяемых полостей контрольным газом. В силу конструктивных особенностей и специфики изделий РКТ на процесс наполнения накладывается ряд ограничений. Значение давления газа в испытываемой полости при наполнении не должна превышать заданного значения. Должно быть обеспечено требование по температуре газа, которая, возрастая при наполнении полости, не должна превышать допустимого значения. Время наполнения полости до заданного значения давления должно быть по возможности меньшим и не превышать рекомендованного значения. В настоящее время процесс наполнения полостей во время проведения ПВИ реализуют при помощи пневматических систем, у которых управление процессом испытаний и регистрация результатов испытаний возлагаются на человека. Такая технология работ приводит к большим потерям времени на проведение испытаний, увеличению количества используемой при этом рабочей среды. Высока вероятность ошибочных действий при ручном управлении. При значительном объеме работ по проверке герметичности полостей объектов РКТ на ТП существующая технология приводит к существенным экономическим потерям.

В связи с этим имеет место **актуальная научно-техническая задача**, которая заключается в разработке методики наполнения полостей изделий РКТ газом при испытаниях на герметичность, основанная на использовании автоматизированного режима функционирования системы наполнения и обеспечения при этом минимального времени процесса наполнения.

Степень разработанности темы исследования. Вопрос автоматизации процесса наполнения изделий ракетно-космической техники газом при проведении пневмовакуумных испытаний в процессе подготовки на технических позициях не достаточно разработан. Разрозненные прикладные исследования в основном посвящены: разработке информационно-измерительных систем, совершенствованию способов сбора и обработки данных испытаний (А. В. Блинов, А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, А. Н. Пылькин, Д. А. Ярославцева и др.); совершенствованию способов и методов контроля герметичности изделий в процессе ПВИ (А. А. Кишкин, Л. В. Липняк, В. А. Ольшанский, В. И. Тройников, Э. В. Щербаков и др.); формализации процессов проектирования и исследования пневматических систем и агрегатов (Ю. Л. Арзуманов, Е. М. Халатов, В. И. Чекмазов, А. В. Чернышов и др.). Изучению процесса заправки газом топливных баков мобильных объектов посвящены труды F. Ammouri, T. Bourgeois, R. Caponi, C. J. V. Dicken, T. Kuroki, M. Monde, P. Moretto, W. Mrida, J. Xiao и др. Фундаментальными работами в области термодинамики, теплообмена и расчета пневматических систем и агрегатов являются труды Е. В. Герц, Г. В. Крейнина, М. А. Мамонтова, Б. М. Подчуфарова. Исследованиями в области моделирования процесса быстрой заправки газом, в том числе и «старт-стоп» методом, газовых автобусных цилиндрических баллонов различных типов водородом занимались J. Guo, L. Zhao, J. Zheng и др. Различного рода интенсификацией процесса наполнения газом баллонов и баков транспортных средств занимались L. Allidieres, J. P. Cohen, D. J. Farese, H. Hiroaki, T. Kondo, Y. Miki и др.

Объектом исследования является система наполнения полостей газом при пневмовакуумных испытаниях изделий ракетно-космической техники.

Предметом исследования настоящей диссертационной работы является алгоритм, математическая модель и методика процесса наполнения полостей изделий РКТ газом при ПВИ.

Цель и задачи исследования. **Целью** диссертационной работы является разработка методик автоматизированного наполнения полостей изделий РКТ газом при ПВИ, использование которых позволит уменьшить время подготовки изделий РКТ к пуску за счет сокращения длительности и трудоёмкости процесса наполнения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1 Провести анализ существующих методик и способов наполнения газом полостей изделий РКТ при ПВИ, а также при использовании их в других областях техники.

2 Проанализировать процессы, протекающие во время наполнения полостей газом при ПВИ.

3 Предложить способ автоматизированного наполнения полостей изделий РКТ газом при проведении ПВИ.

4 Разработать методики приближенного расчета параметров автоматизированного процесса наполнения полостей изделий РКТ газом при ПВИ.

5 Сформировать методики автоматизированного наполнения полостей изделий РКТ газом при ПВИ.

6 Разработать математическую модель, описывающую автоматизированный процесс наполнения полостей изделий РКТ газом при проведении ПВИ.

7 Сформировать алгоритмы управления процессом автоматизированного наполнения полостей изделий РКТ газом при ПВИ для вариантов методики наполнения без дополнительного регулирования и с дополнительным регулированием расхода.

8 Провести исследование влияния начальных условий и ограничений по параметрам на продолжительность процесса наполнения полостей изделий РКТ газом при ПВИ.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в ходе исследований использовались **методы**, основывающиеся на теоретических положениях термодинамики и теплообмена, теории пневмомеханических систем и газовой динамики, теории автоматического регулирования, методах математического и цифрового моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1 Предложена и обоснована структурная схема системы наполнения полостей изделий РКТ газом при ПВИ в двух вариантах, обеспечивающая автоматизированный режим процесса наполнения.

2 Предложены методики приближенного расчета параметров процесса наполнения полости газом, позволяющие на раннем этапе проектирования системы наполнения оценить ее характеристики.

3 Разработаны математические модели систем наполнения полостей изделий РКТ газом, ориентированные на исследование рабочих процессов технологии испытаний на герметичность при ПВИ.

4 Разработаны алгоритмы и цифровые математические модели для компьютерного моделирования процессов наполнения, сравнительного анализа различных технических решений по критерию продолжительности процесса наполнения.

5 Предложена методика проектировочного расчёта процесса наполнения полостей изделий РКТ газом, которая позволяет назначать режим управления, обеспечивающий наименьшее время наполнения полости.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в научно-методическом обеспечении разработки систем наполнения полостей изделий РКТ газом при проведении ПВИ, позволяющим сократить время наполнения в 2,2 раза, способствуя: снижению трудоёмкости процесса наполнения, и процесса ПВИ в целом; сокращению затрат на энергетические ресурсы (экономия электроэнергии, тепловой энергии); сокращению времени подготовки изделий РКТ к пуску, обеспечивая предъявляемые к изделию требования, в том числе и по температурному режиму.

Разработанные методики расчета параметров процесса наполнения, способ и варианты методики наполнения могут быть использованы для проектирования новых систем газоснабжения, предназначенных для наполнения полостей изделий РКТ газом при проведении ПВИ, в частности систем на технических позициях космодромов при ПВИ изделий РКТ.

Предложенный способ наполнения полостей газом, лежащий в основе новой методики наполнения полостей изделий РКТ газом при ПВИ и система его реализующая, защищены патен-

том на изобретение РФ № 2703899 и приняты к использованию в работе КБ «Арматура» – филиале АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева».

Предложенные методики и способы наполнения газом могут быть использованы при испытаниях на герметичность изделий химического и нефтегазового машиностроения, холодильной, авиационной техники, а также в тех отраслях, где требуется наполнение емкостей сжатым газом до требуемого давления при ограничениях по температуре, например, при заполнении баков транспортных средств топливом в виде сжатого газа.

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистрантов по направлению «Технологические машины и оборудование».

Основные результаты, выносимые на защиту:

1 Новые схмотехнические решения системы наполнения полостей изделий ракетно-космической техники газом, позволяющие сократить продолжительность рабочего процесса, а, следовательно, и повысить эффективность технологии оценки герметичности изделий.

2 Математические модели систем наполнения полостей изделий ракетно-космической техники газом, основанные на их структурных представлениях и позволяющие вести исследование процессов наполнения.

3 Алгоритмы и цифровые модели для компьютерного моделирования процессов управления наполнением полости газом с возможностью формирования заданного режима испытаний.

4 Результаты вычислительного эксперимента по оценки влияния структуры и параметров схемы наполнения на выходные характеристики системы.

5 Методика расчёта параметров системы наполнения для обеспечения наименьшей продолжительности процесса наполнения полости газом.

Достоверность результатов исследования обеспечена: применением фундаментальных физических законов, основных положений теорий пневмогидросистем и автоматического регулирования, механики, термодинамики и теплообмена при построении математических моделей; цифровым моделированием и расчётами характеристик процесса наполнения полостей изделий РКТ газом при ПВИ в современном программном комплексе *SimInTech*.

Апробация результатов работы. Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и межотраслевых научно-технических конференциях и конкурсах: XX Международная молодежная научная конференция «Туполевские чтения» (Казань, «КГТУ им. А. Н. Туполева – КАИ», 2012 г.); Международная молодежная конференция «XXXIX Гагаринские чтения» (Москва, «МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского», 2013); XXIII-XXV Международные научно-технические конференции «Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» (Москва, «НИУ «МЭИ», 2019-2021 гг.); XXXVIII-XLV Академические чтения по космонавтике, посвященных памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства «Актуальные проблемы российской космонавтики» (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014-2021 гг.); Всероссийская молодежная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике» (Звездный городок, «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина», 2012); V, VI, VIII Общероссийские молодежные научно-технические конференции «Молодежь, техника, космос» (Санкт-Петербург, БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2013, 2014, 2016 гг.); V Общероссийская научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (Санкт-Петербург, БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2012); II, III, V Всероссийские молодежные научно-практические конференции «Орбита молодежи и перспективы развития российской космонавтики» (Самара, «СНИУ им. акад. С. П. Королева», 2016; Томск, «НИ ТПУ», 2017; Санкт-Петербург, БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2019); V международная научно-техническая конференция «Динамика и виброакустика машин» (Самара, СНИУ им. академика С. П. Королева, 2020).

Публикации. Материалы диссертационного исследования изложены в 9 публикациях: 8 статей, из них 5 статей в журналах из перечня ВАК РФ, 1 статья опубликована в издании, индексируемом Scopus, SA (pt), Springer, WoS (ESCI), 1 патент на изобретение РФ.

Содержание и структура работы. Структура диссертации представлена введением, четырь-

мя главами, заключением, списком литературы (83 наименования), списком сокращений и условных обозначений и 9 приложениями. Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста, из них 123 страницы – основной текст. В работе размещено 7 таблиц и 72 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены цель и задачи, предмет и объект исследования, теоретические и методологические основы исследования, сформулированы теоретическая и практическая значимость, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, указано на каких именно научных мероприятиях проходила апробация результатов диссертационной работы, представлена структура работы.

В первой главе представлен обзор методов контроля герметичности изделий, используемых при ПВИ, проведен анализ существующих технологий пневмовакуумных испытаний изделий РКТ и схем их реализации. На основе проведенного анализа выявлено, что основным методом контроля герметичности в ракетно-космической отрасли является вакуумный масс-спектрометрический метод,

реализуемый в вакуумной камере (пневмовакуумные испытания). Как правило, он используется при контроле негерметичности уникальных составных элементов и частей ракет-носителей: разгонных блоков, головных частей, космических аппаратов.

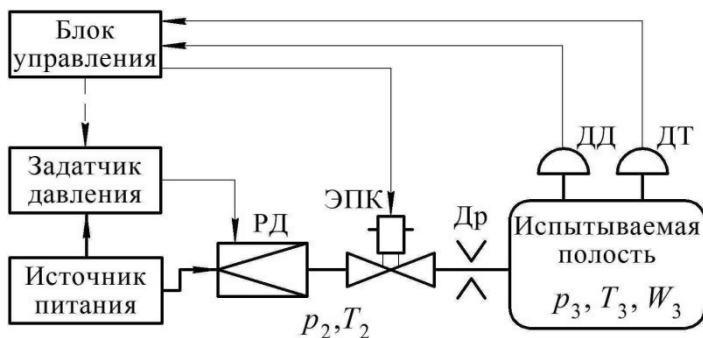
Наиболее важным и трудоёмким этапом ПВИ является этап наполнения изделия контрольным газом, что связано с необходимостью обеспечения требуемого температурного режима, и реализуется, в настоящее время, вручную, посредством временных выдержек («старт-стоп» режим). При этом контрольный газ охлаждается посредством теплообмена между газом и стенками конструкции объекта испытаний. С целью совершенствования процесса наполнения полостей изделий РКТ при ПВИ наиболее эффективным подходом является его автоматизация.

По результатам проведенного анализа существующих способов наполнения емкостей газом сформирована классификация технологий наполнения полостей и сформулированы требования к автоматизации процесса наполнения и определены задачи исследований. Логическая схема диссертационного исследования приведена на рисунке 1.

Во второй главе представлены два подхода по формированию методик автоматизированного наполнения: автоматизация существующей методики наполнения и разработка новой методики автоматизированного наполнения. В основе **первого подхода**, реализующего автоматизацию существующей методики наполнения, лежит способ автоматизированного наполнения полостей без дополнительного регулирования расхода газа



Рисунок 1 – Логическая схема исследования



РД – редуктор давления; Др – дроссель;

ЭПК – электропневмоклапан;

ДД – датчик давления; ДТ – датчик температуры

Рисунок 2 – Функциональная схема системы наполнения без дополнительного регулирования расхода газа

в полость изделия, который возможно реализовать при помощи системы наполнения, функциональ-

ная схема которой представленной на рисунке 2.

Процесс наполнения происходит с постоянным расходом в «старт-стоп» режиме, определяемым по сигналам датчиков давления и температуры в соответствии с алгоритмом (рисунок 3).

На рисунке 3: $P_{\text{доп}}$, $T_{\text{доп}}$ – максимально допустимые величины давления и температуры газа в полости; $[dT_3/dt]$ – скорость охлаждения газа в полости, при которой интенсивность теплообмена между газом и стенкой полости мала и процесс теплообмена можно считать оконченным; $[\Delta P]$ – допускаемая разность значений допускаемого и фактического давления газа в полости; $[\Delta T]$ – допускаемая разность значений допускаемой и фактической температуры газа в полости; T_3 , p_3 – текущие значения температуры и давления контрольного газа в наполняемой полости.

В процессе наполнения происходит постоянный мониторинг текущих значений давления и температуры газа внутри наполняемой полости изделия РКТ по соответствующим датчикам. Наполнение длится до тех пор, пока справедливы условия (1) и (2), в противном случае подается команда на закрытие ЭПК, с последующей временной выдержкой.

$$T_{\text{доп}} - T_3 \leq [\Delta T], \quad (1)$$

$$P_{\text{доп}} - p_3 \leq [\Delta P]. \quad (2)$$

Во время выдержки, контрольный газ охлаждается посредством теплообмена между газом и стенками конструкции объекта испытаний. Опрос датчиков давления ДД и температуры ДТ в это время не прекращается. Когда скорость изменения (понижения) температуры dT_3/dt , посредством теплообмена, становится меньше или равной заданной скорости охлаждения газа в полости $[dT_3/dt]$, процесс наполнения полости возобновляется. При достижении в полости наполнения требуемого значения давления, с учетом соблюдения условий (1), (2) процесс завершается, путем закрытия ЭПК. Начинаются проверки наполняемой полости на герметичность.

Как следует из вышесказанного, в данном подходе реализуется релейный закон работы ЭПК, что обеспечивает ступенчатый характер повышения давления в наполняемой полости до заданного максимального значения, при реализации ограничения по температуре.

Предложена методика приближенного расчёта параметров процесса наполнения полости газом. Методика реализуется в следующей последовательности:

– провести оценку возможного значения давления, при котором температура газа в полости не превышает допустимого значения, по формуле (3), и сравнить с величиной требуемого давления;

$$P_{\text{доп}} = R \cdot T_{\text{доп}} \cdot M_3 / W_3, \quad (3)$$

где R – газовая постоянная; M_3 – масса газа в полости; W_3 – объем полости;

– зная скорость изменения давления dp_3/dt , и задавшись величиной давления p_2 , исходя из условия, что на всех ступенях процесс наполнения протекает при критическом режиме течения газа через дроссель D_r , определяется требуемая площадь проходного сечения дросселя $f_{2,3}$, полученная из зависимости (4)

$$dp_3/dt = (\mu_{2,3} \cdot f_{2,3} \cdot k \cdot K_0 \cdot p_2 \cdot \sqrt{R \cdot T_2}) / W_3, \quad (4)$$

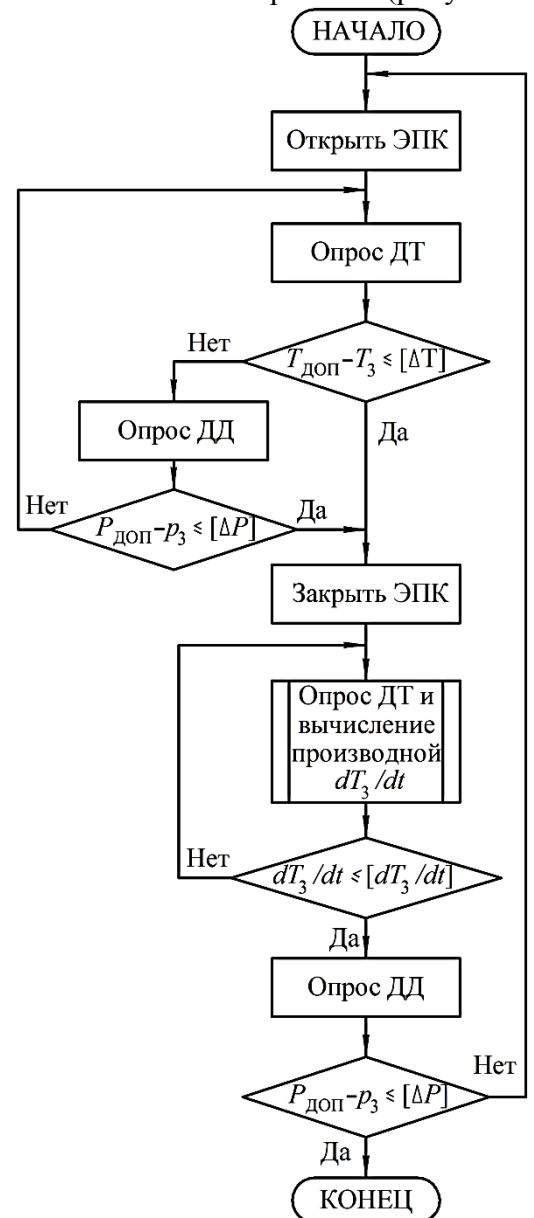


Рисунок 3 – Алгоритм функционирования блока управления системы наполнения

где $\mu_{2,3}$ – коэффициент расхода дросселя Др; $f_{2,3}$ – площадь проходного сечения дросселя Др; k – показатель адиабаты газа; $K_0 = \sqrt{k \cdot (2/k + 1)^{(k+1)/(k-1)}}$ – постоянная величина; p_2 – абсолютное давление газа на входе ЭПК; T_2 – температура газа на входе ЭПК;

– рассчитывается давление, до которого будет наполняться полость на i -й ступени, по зависимости (5)

$$p_{3iРАВ} = \left(T_{ДОП} \cdot p_{30} \cdot (k \cdot T_2 - T_{30}) \right) / \left(T_{30} \cdot (k \cdot T_2 - T_{ДОП}) \right), \quad (5)$$

где p_{30} , T_{30} – абсолютное давление и температура газа в полости в момент начала процесса наполнения на данной ступени;

– рассчитывается абсолютное давление газа в полости на i -й ступени процесса наполнения, при котором температура газа достигает величины $T_{ДОП}$, по зависимости (6)

$$p_{3i} = T_{ДОП} \cdot p_{30} \cdot (k \cdot T_2 - T_{30}) / T_{30} \cdot (k \cdot T_2 - T_{ДОП}); \quad (6)$$

– рассчитывается время наполнения полости газом на i -й ступени, по зависимости (7)

$$t_i = (p_{3i} - p_{30}) \cdot W_3 / (\mu_{2,3} \cdot f_{2,3} \cdot k \cdot K_0 \cdot p_2 \cdot \sqrt{R \cdot T_2}); \quad (7)$$

– рассчитывается масса газа, закачиваемая в полость на i -й ступени, по зависимости (8)

$$M_{3i} = (p_{3i} \cdot W_3) / (R \cdot T_{ДОП}); \quad (8)$$

– рассчитывается время выдержки, в течение которого происходит выравнивание температур стенки и газа, по формуле (9)

$$t = - \frac{\ln(\Delta T / (T_{СТ30} - T_{30}))}{((\alpha_T \cdot F / c_w \cdot M_{3i}) + (\alpha_T \cdot F / c_{СТ3} \cdot m_{СТ3}))}; \quad (9)$$

где ΔT – разница температур газа и стенки полости; $T_{СТ30}$ – температура стенки полости в начальный момент времени; α_T – коэффициент теплоотдачи от газа к стенке полости; F – площадь поверхности теплоотдачи; c_w , $c_{СТ3}$ – теплоемкости газа и материала стенки полости; $m_{СТ3}$ – масса стенки полости;

– рассчитываются температура и давление, при которых на i -й ступени возобновляется этап наполнения полости газом после этапа выдержки, по формулам (10) и (11)

$$T_{РАВi} = T_{СТ30} - \frac{(T_{СТ30} - T_{30})}{((c_{СТ3} \cdot m_{СТ3} / c_w \cdot M_{3i}) + 1)}, \quad (10)$$

$$p_{3iРАВ} = M_{3i} \cdot R \cdot T_{РАВi} / W_3; \quad (11)$$

– рассчитывается общее время наполнения полости до требуемого давления, путем складывания времен этапов наполнения и выдержки всех ступеней.

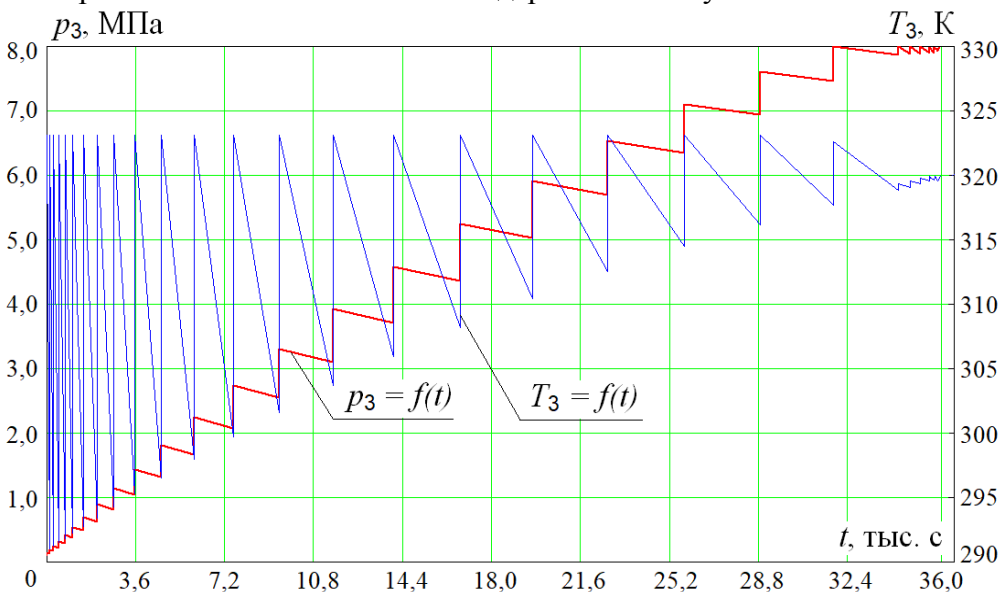


Рисунок 4 – Графики изменения давления и температуры газа в процессе наполнения полости объекта испытаний

переходные процессы по давлению и температуре на входе дросселя при открытии и закрытии ЭПК не учитываются; редуктор давления

На рисунке 4 приведен пример реализации методики приближенного расчета параметров процесса наполнения полостей при ПВИ, при следующих допущениях: рабочее тело – идеальный газ; теплообмен между конструкцией объекта испытаний и окружающей средой не учитывается (вакуум); запаздываниями в ЭПК пренебрегаем; потерями давления на ЭПК пренебрегаем; переходные процессы по давлению и

РД обеспечивает постоянные значения давления и температуры газа (p_2 и T_2) на входе ЭПК. Исходные данные для расчёта: рабочая среда – газовая смесь гелия ($g_{\text{Г}} = 0,1$) и воздуха ($g_{\text{В}} = 0,9$); $k = 1,485$; $R = 465,887$ Дж/(кг·К); $\alpha_{\text{T}} = 4,992$ Дж/(м²·с·К); $c_{\text{ш}} = 960,011$ Дж/(кг·К); $f_{2,3} = 1,256 \cdot 10^{-5}$ м²; $\mu_{2,3} = 0,8$; $p_{30} = 0,1$ МПа; $T_{30} = 290,15$ К; $T_{\text{доп}} = 323,15$ К; $P_{\text{доп}} = 8$ МПа; $W_3 = 0,524$ м³; $F = 3,14$ м²; $c_{\text{СТЗ}} = 922$ Дж/(кг·К); $m_{\text{СТЗ}} = 171,92$ кг; $p_2 = 40$ МПа; объект испытаний имеет сферическую форму.

Полученные результаты носят приближенный характер, но позволяют оценить реализуемость предлагаемого варианта системы наполнения. Из графика видно, что время наполнения полости объекта испытаний составило 36240 секунд при конечном давлении 7,95 МПа (скорость наполнения – 0,26 МПа/с при диаметре дросселя 4 мм), из которых большую часть время затрачено на «выдержку» (порядка 99,97 %).

Достоинством подхода является простота реализации процесса наполнения полости изделия при ПВИ и сокращение времени наполнения полости, по сравнению с существующей методикой, реализующей ручной режим функционирования. **Недостатки подхода:** необходимость проведения предварительных расчетов для подбора диаметра дросселя; недостаточно интенсивный отвод тепла от газа, как следствие – большую часть времени процесса наполнения полости составляют периоды выдержки.

На основе анализа недостатков вышеприведенного подхода, а также работ отечественных и зарубежных ученых в смежных отраслях был предложен **второй подход**. В рамках подхода разработан **новый способ наполнения**, отличающийся тем, что в процессе наполнения регулирование расхода газа осуществляется по величине рассогласования между максимально допустимым и текущим значением температуры газа в полости. В результате обеспечивается стабилизация температуры газа в полости в процессе наполнения на уровне, не превышающем максимально допустимое значение. Способ обеспечивает уменьшение времени наполнения полости изделия при ПВИ за счет интенсификации теплообмена газа с материалом стенок наполняемой полости (патент на изобретение РФ № 2703899). Данный способ лег в основу **новой методики автоматизированного наполнения** полостей изделий РКТ при ПВИ с дополнительным регулированием расхода газа. На рисунке 5 приведена функциональная схема системы наполнения, реализующая предлагаемый способ наполнения, где РД – редуктор давления; ЭПК – электропневмоклапан; ДрР – дроссель регулируемый; УРР – устройство регулирования расхода; ДД – датчик давления; ДТ – датчик температуры.

Предложенная система отличается от известных аналогов тем, что при подаче газа в полость блок управления формирует управляющий сигнал для устройства регулирования расхода газа по

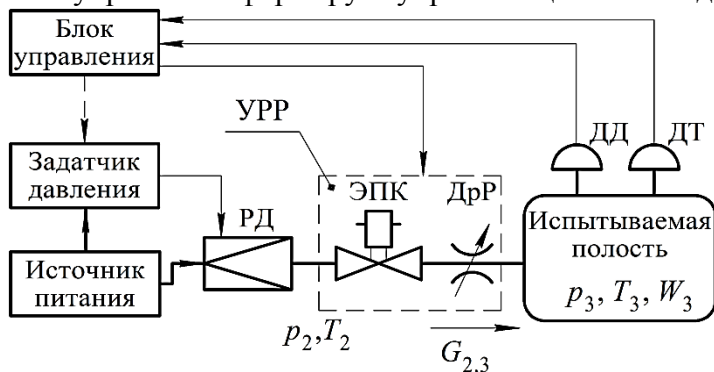


Рисунок 5 – Функциональная схема системы наполнения с дополнительным регулированием расхода газа

наполняемую полость, обеспечивает стабилизацию температуры газа в емкости в процессе наполнения на уровне, не превышающем максимально допустимое значение.

Алгоритм процесса наполнения, реализующий предложенную методику автоматизированного наполнения полостей с дополнительным регулированием расхода газа, представлен на рисунке 6, где $[T] = T_{\text{доп}} - [\Delta T]$. Данный алгоритм можно рассматривать как развитие предыдущего (рисунок 3), и отличающийся от него добавлением блока, реализующего регулирование открытия дросселя пропорционально величине рассогласования между максимально допустимым и текущим значе-

нию величины рассогласования между максимально допустимым и текущим значением температуры газа в емкости. Устройство регулирования расхода состоит из двух запорно-регулирующих элементов: ЭПК, прекращающего подачу газа при достижении предельно допустимого значения давления газа в полости, и ДрР, регулирующего расход газа по величине рассогласования между максимально допустимым и текущим значением температуры газа в полости. Формирование управляющего сигнала для устройства регулирования расхода газа, поступающего в

нием температуры газа в наполняемой полости.

Отличием второго подхода в управлении процессом наполнения полости является то, что кроме релейного закона работы ЭПК здесь реализуется пропорциональный закон регулирования величины расхода поступающего газа в полость, с целью обеспечения постоянного уровня температуры в полости и, следовательно, максимальной величины теплоотдачи, что обеспечивает, в итоге, сокращение суммарного времени операции наполнения.

Предложена методика приближенного расчёта параметров процесса наполнения полости газом. Методика реализуется в следующей последовательности:

– провести оценку возможного значения давления, при котором температура газа в полости не превышает допустимого значения, по формуле (3), и сравнить с величиной требуемого давления;

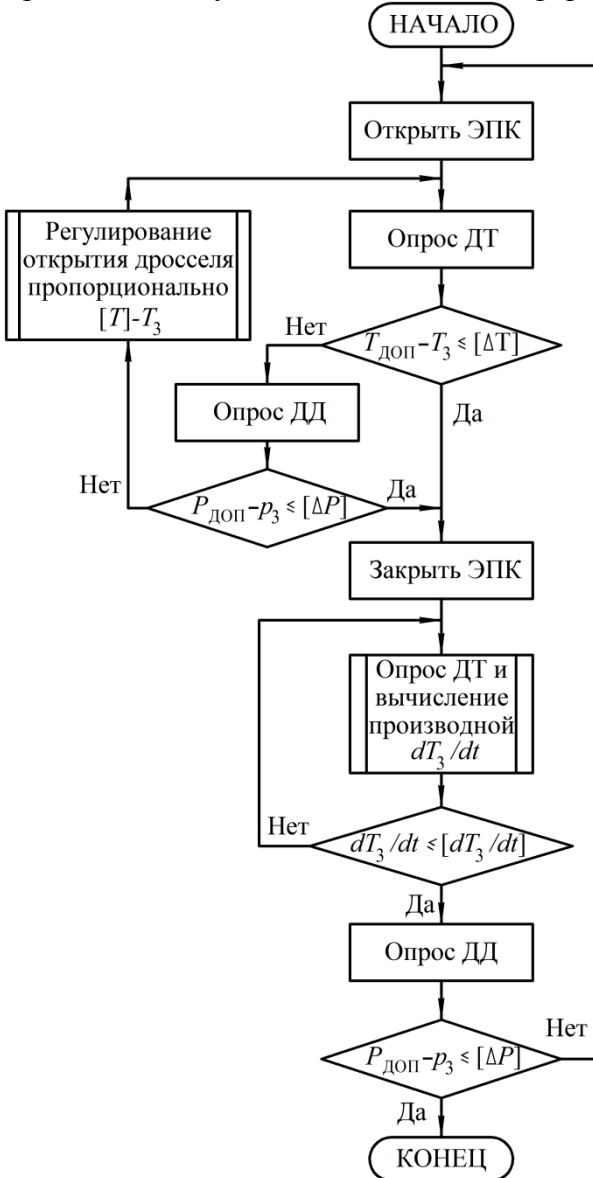


Рисунок 6 – Алгоритм функционирования блока управления системы наполнения с дополнительным регулированием расхода значения давления газа в наполняемой полости, обычно достаточно двух-трех этапов наполнения;

– рассчитывается общее время наполнения полости до требуемого давления, путем складывания времен этапов наполнения и выдержки всех ступеней.

На рисунке 7 приведен пример реализации методики приближенного расчета параметров процесса наполнения полости газом с дополнительным регулированием расхода при допущениях и исходных данных, принятых для примера с методикой наполнения без дополнительного регулирования расхода, представленного ранее. Время наполнения полости газом уменьшилось в 1,6 раза

– зная скорость изменения давления dp_3/dt , и задавшись величиной давления p_2 , исходя из условия, что процесс наполнения протекает при критическом режиме течения газа через дроссель УРР, определяется требуемая площадь проходного сечения дросселя $f_{2,3}$ по выражению (12)

$$f_{2,3} = \frac{dp_3/dt \cdot W_3}{\mu_{2,3} \cdot k \cdot K_0 \cdot p_2 \cdot \sqrt{R \cdot T_2}}; \quad (12)$$

– рассчитывается давление, до которого будет наполняться полость на i -й ступени, по зависимости (5);

– рассчитывается время наполнения полости газом до достижения максимально допустимого значения температуры газа в полости, по зависимости (7);

– рассчитывается масса газа, закачиваемая в полость на i -й ступени, по зависимости (8);

– рассчитывается расход, при котором интенсивность отвода тепла от газа к стенке будет максимальной, по формуле (13)

$$G_{2,3} = \frac{\alpha_T \cdot F \cdot (k - 1) \cdot (T_{\text{доп}} - T_{\text{ст3}})}{R \cdot (k \cdot T_2 - T_{\text{доп}})}; \quad (13)$$

– рассчитывается время наполнения полости газом до достижения в полости максимально допустимого давления, при поддержании максимально допустимого значения температуры газа, по формуле (14)

$$t_{\text{Hj}} = (M_{3i} - M_{3(i-1)})/G_{2,3}; \quad (14)$$

– рассчитывается время выдержки, в течение которого происходит выравнивание температур стенки и газа, по формуле (9);

– рассчитываются значения температуры и давления, при которых возобновляется этап наполнения полости газом после этапа выдержки, по формулам (10) и (11). Количество этапов наполнения определяется необходимой точностью достижения требуемого

(22828 секунд против 36240 секунд при использовании методики наполнения без дополнительного регулирования расхода газа).

Достоинством нового предложенного подхода является существенное ускорение процесса наполнения, исключение значительных колебаний температуры газа в полости и напряжений внутри материала.

Методики приближенного расчета параметров процесса наполнения полостей, позволяют на начальном этапе создания автоматической системы наполнения убедиться в работоспособности предложенной схемы, отработать методики автоматизированного наполнения полостей (с дополнительным регулированием и без дополнительного регулирования расхода газа), обеспечивая требования технологии испытаний.

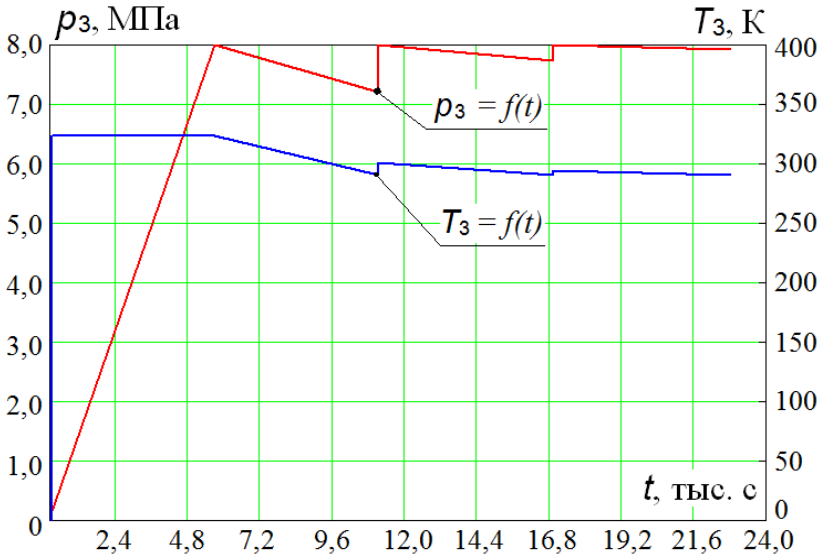


Рисунок 7 – Графики изменения давления и температуры газа в процессе наполнения полости объекта испытаний

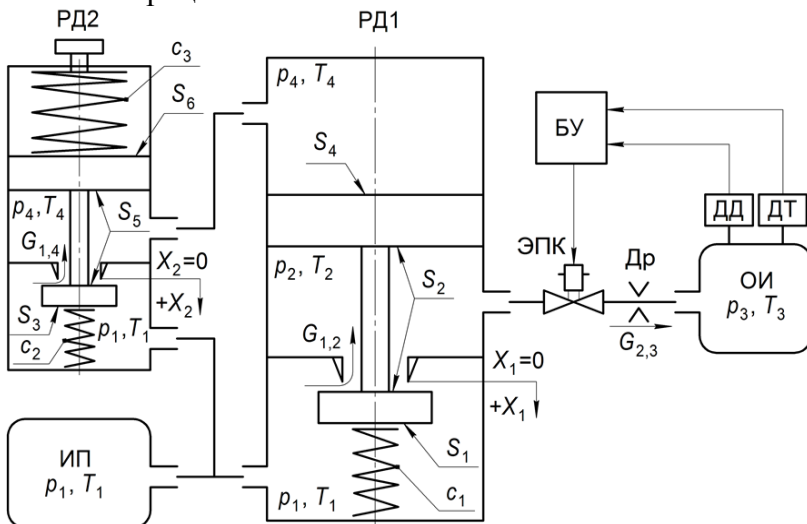


Рисунок 8 – Расчетная схема системы наполнения без дополнительного регулирования расхода газа

Основу математического описания процессов в рабочем теле каждой полости составляют уравнения законов сохранения энергии и массы газа. В качестве основных переменных процесса в рабочем теле выберем величины давления p и плотности ρ . В качестве определяющих зависимостей используются термическое и калорическое уравнения состояния. Используя формулы для удельных прихода и расхода энергии и секундных массовых прихода и расхода идеального газа, получим систему уравнений, отражающую термодинамические процессы для каждой полости исследуемой системы.

Для выходной полости основного редуктора РД1

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{k}{(W_2 - S_2 \cdot X_1)} \cdot [\mu_{1,2} f_{1,2} K_0 p_1^{3/2} \rho_1^{-1/2} Y_{1,2} - \mu_{2,3} f_{2,3} K_0 p_2^{3/2} \rho_2^{-1/2} Y_{2,3} - p_2 S_2 V_{\text{пл}}], \quad (15)$$

Третья глава посвящена построению математического описания функционирования системы наполнения полостей изделий РКТ при ПВИ и отработке алгоритмов управления процессом автоматизированного наполнения: для случая наполнения без дополнительного регулирования расхода и случая с дополнительным регулированием расхода газа.

На рисунке 8 представлена расчетная схема системы наполнения без дополнительного регулирования расхода газа, где ИП – источник питания газовой смеси; ОИ – объект испытаний; РД1 – основной редуктор давления; РД2 – управляющий редуктор давления; БУ – блок управления; ЭПК – электропневмоклапан; ДД – датчик давления; ДТ – датчик температуры. Приняты допущения: рабочее тело – идеальный газ; давление и температура газа в источнике питания постоянны; теплообмен между газом и стенками полости учитывается только в объекте испытаний; течение газа через дроссельные элементы считается одномерным и устанавливающимся мгновенно, потери на трение и влияние теплообмена не учитываются ввиду незначительности, для описания используется уравнение Сен-Венана-Ванцеля.

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{1}{(W_2 - S_2 \cdot X_1)} \cdot [\mu_{1,2} f_{1,2} K_0 p_1^{1/2} \rho_1^{1/2} Y_{1,2} - \mu_{2,3} f_{2,3} K_0 p_2^{1/2} \rho_2^{1/2} Y_{2,3} - \rho_2 S_2 V_{\text{П1}}], \quad (16)$$

$$f_{1,2} = \begin{cases} \pi \cdot d_{C1} \cdot X_1 & \text{при } 0 < X_1 < X_{\text{КР1}}, \\ 0 & \text{при } X_1 \leq 0, \\ \pi \cdot d_{C1} \cdot X_{\text{КР1}} & \text{при } X_1 \geq X_{\text{КР1}}, \end{cases} \quad (17)$$

где k – показатель адиабаты; $f_{1,2}$ – площадь дросселирующего сечения клапанной пары основного редуктора давления; $f_{2,3}$ – площадь проходного сечения канала между выходной полостью редуктора РД1 и наполняемой полостью; W_2 – объем выходной полости основного редуктора при $X_1 = 0$; S_2 – площадь подвижных частей, на которую действует давление p_2 ; d_{C1} – диаметр седла основного редуктора; X_1 – перемещение подвижных частей основного редуктора; $X_{\text{КР1}}$ – перемещение подвижных частей основного редуктора давления, при котором площадь дросселирующего сечения затвора равна площади кольцевого сечения между поверхностями штока и седла; $V_{\text{П1}}$ – скорость подвижных частей основного редуктора давления; $\mu_{1,2}$, $\mu_{2,3}$ – коэффициенты расхода.

Для выходной полости управляющего редуктора РД2

$$\frac{dp_4}{dt} = \frac{k}{(W_4 - S_5 X_2 + S_4 X_1)} \cdot [\mu_{1,4} f_{1,4} K_0 p_1^{3/2} \rho_1^{-1/2} Y_{1,4} + p_4 S_5 V_{\text{П2}} - p_4 S_4 V_{\text{П1}}], \quad (18)$$

$$\frac{d\rho_4}{dt} = \frac{1}{(W_4 - S_5 X_2 + S_4 X_1)} \cdot [\mu_{1,4} f_{1,4} K_0 p_1^{1/2} \rho_1^{1/2} Y_{1,4} + \rho_4 S_5 V_{\text{П2}} - \rho_4 S_4 V_{\text{П1}}], \quad (19)$$

$$f_{1,4} = \begin{cases} \pi \cdot d_{C2} \cdot X_2 & \text{при } 0 < X_2 < X_{\text{КР2}}, \\ 0 & \text{при } X_2 < 0, \\ \pi \cdot d_{C2} \cdot X_{\text{КР2}} & \text{при } X_2 \geq X_{\text{КР2}}, \end{cases} \quad (20)$$

где $f_{1,4}$ – площадь дросселирующего сечения клапанной пары управляющего редуктора; W_4 – суммарный объем выходной полости управляющего редуктора и управляющей полости основного редуктора; S_5 – площадь подвижных частей управляющего редуктора, на которую действует давление p_3 ; S_4 – площадь подвижных частей основного редуктора, на которую действует давление p_3 ; d_{C2} – диаметр седла управляющего редуктора; X_2 – перемещение подвижных частей управляющего редуктора; $X_{\text{КР2}}$ – перемещение подвижных частей управляющего редуктора давления, при котором площадь дросселирующего сечения затвора равна площади кольцевого сечения между поверхностями штока и седла; $\mu_{1,4}$ – коэффициент расхода затвора; $V_{\text{П2}}$ – скорость подвижных частей управляющего редуктора давления.

Для полости объекта испытаний

$$\frac{dp_3}{dt} = \frac{1}{W_3} \cdot \left[\mu_{2,3} f_{2,3} k K_0 p_2^{3/2} \rho_2^{-1/2} Y_{2,3} - \alpha_T F \cdot (k-1) \cdot \left(\frac{p_3}{R\rho_3} - T_{\text{СТ3}} \right) \right], \quad (21)$$

$$\frac{d\rho_3}{dt} = \frac{1}{W_3} \cdot [\mu_{2,3} f_{2,3} K_0 p_2^{1/2} \rho_2^{1/2} Y_{2,3}], \quad (22)$$

$$\frac{dT_{\text{СТ3}}}{dt} = \frac{1}{c_{\text{СТ3}} \cdot m_{\text{СТ3}}} \cdot \left(\alpha_T F \cdot \left(\frac{p_3}{R\rho_3} - T_{\text{СТ3}} \right) \right), \quad (23)$$

где W_3 – объем полости объекта испытаний; α_T – коэффициент теплоотдачи; $m_{\text{СТ3}}$ – масса материала стенки полости объекта испытаний; $c_{\text{СТ3}}$ – удельная теплоемкость материала стенки полости объекта испытаний; F – площадь поверхности теплообмена.

Уравнения, описывающие движение подвижных частей редукторов давления имеют вид:

– для подвижных частей основного редуктора РД1

$$dV_{\text{П1}}/dt = (-p_1 S_1 - p_2 S_2 + p_4 S_4 - F_{\text{КП1}} - c_{\text{КЛ1}} X_1 - F_{\text{ТР1}}) / m_{\text{П1}}, \quad (24)$$

$$dX_1/dt = V_{\text{П1}}, \quad (25)$$

где $m_{\text{П1}}$ – масса подвижных частей основного редуктора; S_1 – площадь подвижных частей основного редуктора, на которую действует давление p_1 ; $F_{\text{КЛ1}}$ – сила предварительного поджатия кла-

панной пружины основного редуктора; $c_{кЛ1}$ – жесткость клапанной пружины основного редуктора; $F_{ТР1}$ – сила трения, включающая составляющие вязкого и сухого трения.

$$F_{ТР1} = h_1 V_{П1} + F_{СТ1}, \quad (26)$$

где h_1 – коэффициент «вязкого» трения; $F_{СТ1}$ – сила «сухого» трения.

Если $V_{П1} \neq 0$, то $F_{СТ1} = F_{СТ1}^* \text{sign } V_{П1}$,

где $F_{СТ1}^*$ – модуль силы сухого трения основного редуктора давления;

если $V_{П1} = 0$ и $|-p_1 S_1 - p_2 S_2 + p_4 S_4 - F_{кЛ1} - c_{кЛ1} X_1| < F_{СТ1}^*$, то

$$F_{СТ1} = -p_1 S_1 - p_2 S_2 + p_4 S_4 - F_{кЛ1} - c_{кЛ1} X_1;$$

если $V_{П1} = 0$ и $|-p_1 S_1 - p_2 S_2 + p_4 S_4 - F_{кЛ1} - c_{кЛ1} X_1| > F_{СТ1}^*$, то

$$F_{СТ1} = F_{СТ1}^* \text{sign} [-p_1 S_1 - p_2 S_2 + p_4 S_4 - F_{кЛ1} - c_{кЛ1} X_1].$$

– Для подвижных частей управляющего редуктора РД2

$$dV_{П2}/dt = (-p_1 S_7 - p_4 S_5 - F_{кЛ2} - c_{кЛ2} X_2 - F_{ТР2})/m_{П2}, \quad (27)$$

$$dX_2/dt = V_{П2}, \quad (28)$$

где $m_{П2}$ – масса подвижных частей управляющего редуктора; S_7 – площадь подвижных частей управляющего редуктора, на которую действует давление p_1 ; $F_{кЛ2}$ – сила предварительного поджатия эквивалентной пружины управляющего редуктора; $c_{кЛ2}$ – жесткость эквивалентной пружины управляющего редуктора; $F_{ТР2}$ – сила трения, включающая составляющие вязкого и сухого трения.

$$F_{ТР2} = h_2 V_{П2} + F_{СТ2}, \quad (29)$$

где h_2 – коэффициент «вязкого» трения; $F_{СТ2}$ – сила «сухого» трения.

Если $V_{П2} \neq 0$, то $F_{СТ2} = F_{СТ2}^* \text{sign } V_{П2}$,

где $F_{СТ2}^*$ – модуль силы сухого трения управляющего редуктора давления;

если $V_{П2} = 0$ и $|-p_1 S_7 - p_4 S_5 - F_{кЛ2} - c_{кЛ2} X_2| < F_{СТ2}^*$, то $F_{СТ2} = -p_1 S_7 - p_4 S_5 - F_{кЛ2} - c_{кЛ2} X_2$;

если $V_{П2} = 0$ и $|-p_1 S_7 - p_4 S_5 - F_{кЛ2} - c_{кЛ2} X_2| > F_{СТ2}^*$, то $F_{СТ2} = F_{СТ2}^* \text{sign} [-p_1 S_7 - p_4 S_5 - F_{кЛ2} - c_{кЛ2} X_2]$.

На динамику процесса в системе может оказывать влияние запаздывание в срабатывании ЭПК. Модель ЭПК, построенная по зависимостям электромеханики, достаточно сложна. Учитывая малое значение времени срабатывания, а также близость времен открытия и закрытия ЭПК, будем учитывать влияние динамики ЭПК введением звена, имитирующего работу запорного элемента клапана по закону, представленному на рисунке 9, где $\tau_{ОТКР}$, $\tau_{ЗАКР}$ – время срабатывания ЭПК при открытии и закрытии; $f_{ДР}$ – величина проходного сечения дросселя Др; $f_{2,3}$ – площадь проходного сечения канала между выходной полостью редуктора РД1 и наполняемой полостью; Z – выходная величина блока управления. Работа этого звена описывается формулой (30), где t_0 – время начала переключения ЭПК; k_1 – коэффициент пропорциональности.

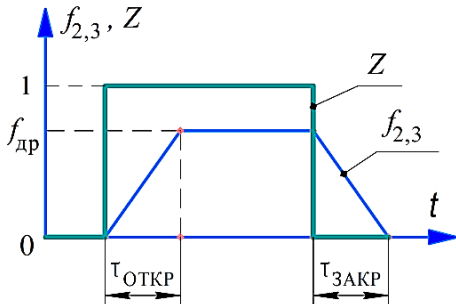


Рисунок 9 – Закон работы запорного элемента ЭПК

$$f_{2,3} = \begin{cases} k_1(t - t_0) & \text{если } (t - t_0) < \tau_{ОТКР} \text{ и } Z = 1, \\ f_{ДР} & \text{если } (t - t_0) > \tau_{ОТКР} \text{ и } Z = 1, \\ f_{ДР} - k_1(t - t_0) & \text{если } (t - t_0) > \tau_{ЗАКР} \text{ и } Z = 0, \\ 0 & \text{если } (t - t_0) < \tau_{ЗАКР} \text{ и } Z = 0, \end{cases} \quad (30)$$

Алгоритм, заложенный в блоке управления БУ системы наполнения, был представлен ранее на рисунке 3. Данный алгоритм реализует методику наполнения без дополнительного регулирования расхода газа.

Для реализации методики автоматизированного наполнения полости газом с дополнительным регулированием его расхода используется алгоритм, представленный ранее на рисунке 6, а расчетная схема имеет вид, представленный на рисунке 10, где ИП – источник питания газовой смеси; ОИ – объект испытаний; РД1 – основной редуктор давления; РД2 – управляющий редуктор давления; БУ – блок управления; ЭПК – электропневмоклапан; ДД – датчик давления; ДТ – датчик температуры; ДрР – дроссель регулируемый; УРР – устройство регулирования расхода.

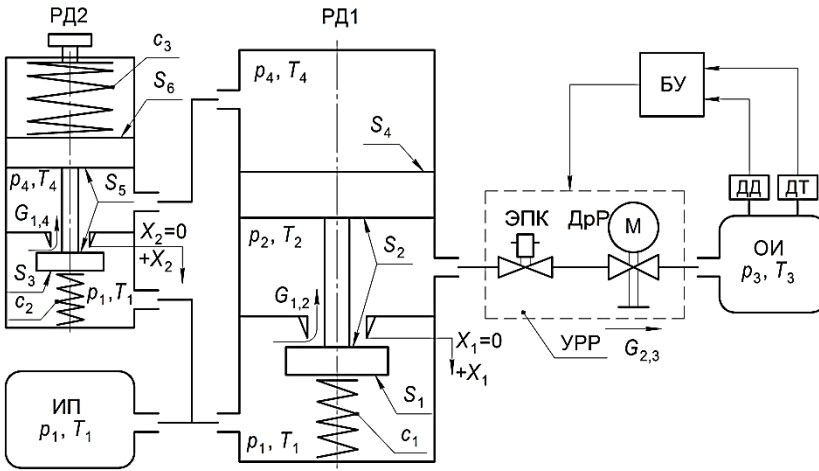


Рисунок 10 – Расчетная схема системы наполнения с дополнительным регулированием расхода газа

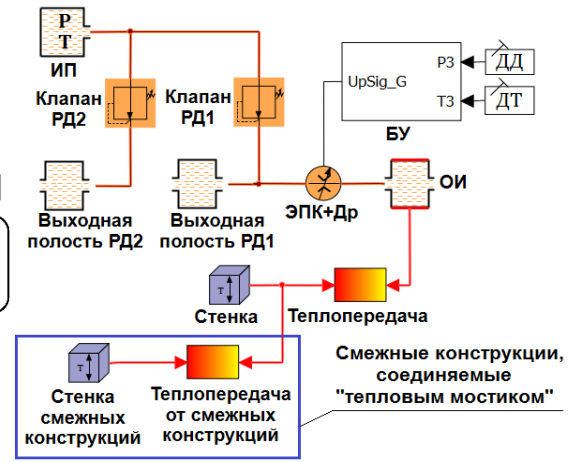
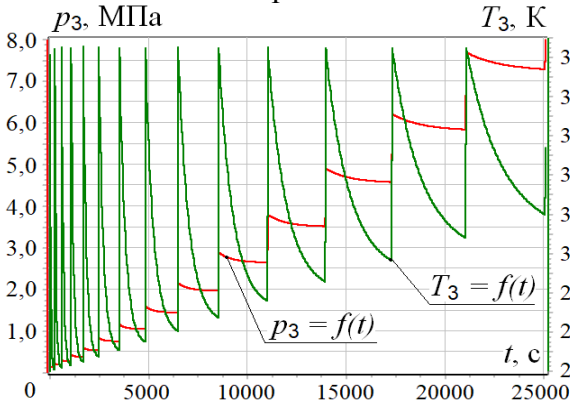
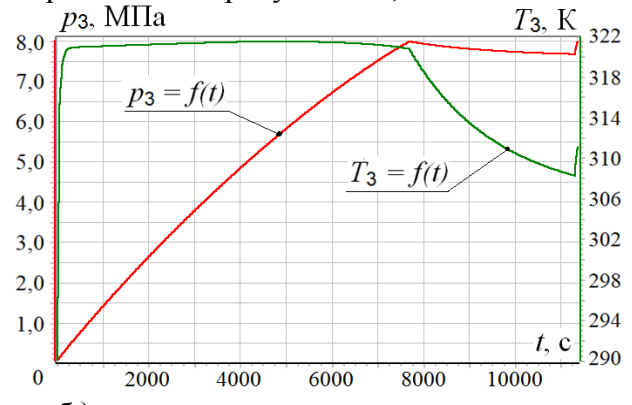


Рисунок 11 – Математическая цифровая модель системы наполнения

Для анализа динамических характеристик объекта исследования была разработана цифровая математическая модель (рисунок 11). Результаты численного моделирования для каждой из методик автоматизированного наполнения полости приведены на рисунках 12, 13.

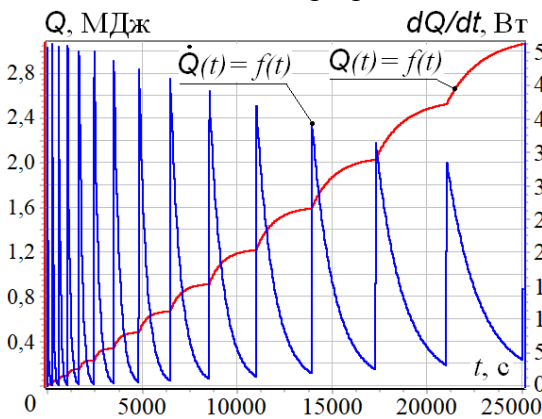


а) без дополнительного регулирования расхода газа

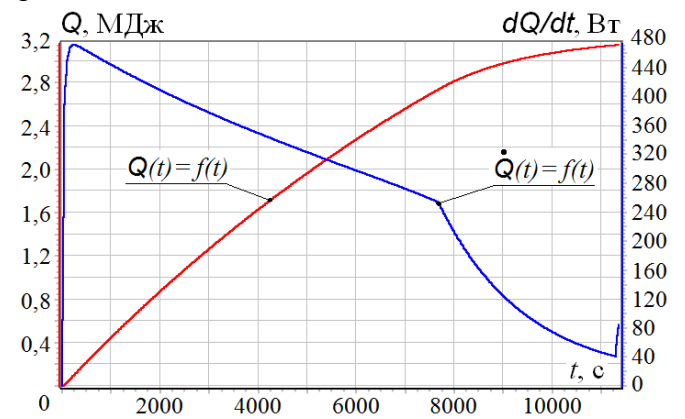


б) с дополнительным регулированием расхода газа

Рисунок 12 – Графики изменения давления и температуры контрольного газа в процессе наполнения полости при реализации автоматизированной методики наполнения



а) без дополнительного регулирования расхода газа



б) с дополнительным регулированием расхода газа

Рисунок 13 – Графики зависимостей от времени: отведенной от газа теплоты $Q(t)$ и интенсивности отвода теплоты dQ/dt при реализации автоматизированной методики наполнения

Время наполнения полости при реализации автоматизированной методики наполнения с дополнительным регулированием расхода газа в 2,2 раза меньше. Данный эффект получен за счет интенсификации теплообмена контрольного газа с материалом стенок наполняемой полости. Данные выводы сделаны для примера наполнения полостей газом с фиксированными начальными па-

раметрами процесса наполнения ($T_{СТЗ}$, $T_{СК}$, T_1) и фиксированными ограничениями по параметрам процесса наполнения ($T_{доп}$, $P_{доп}$), варьирование которыми может внести изменения в результаты. В виду этого, актуализируется вопрос исследования, нацеленного на проверку применимости предложенной методики наполнения в рабочих диапазонах начальных и граничных условий процесса наполнения, а также ограничений по параметрам процесса наполнения, что даст более точную и объективную картину степени их влияния на время процесса наполнения.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния начальных условий (температуры объекта наполнения, температуры смежных конструкций, температуры газа в источнике питания) и ограничений по параметрам процесса наполнения (допустимого значения температуры и давления газа в полости) на продолжительность наполнения полостей при наполнении с дополнительным регулированием расхода газа.

Анализ результатов исследования влияния начальных условий процесса наполнения на продолжительность наполнения полости газом позволил выявить некоторые закономерности.

Время наполнения полости газом прямо пропорционально значению температуры газа в источнике питания (рисунок 14). При увеличении значения температуры газа в источнике питания увеличивается и время наполнения полости.

Увеличение значения начальной температуры смежных конструкций приводит к уменьшению времени наполнения полости (рисунок 15). Интенсивность понижения времени наполнения с увеличением температуры уменьшается. В начале диапазона изменение времени наполнения составляет минус 16,80 с/К, в конце – минус 5,75 с/К.

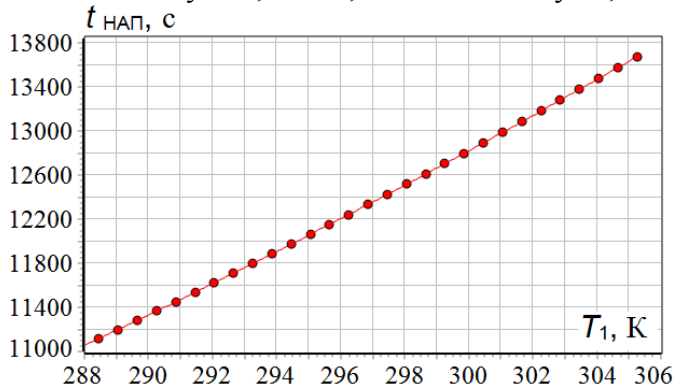


Рисунок 14 – График зависимости времени наполнения полости газом от температуры газа в источнике питания

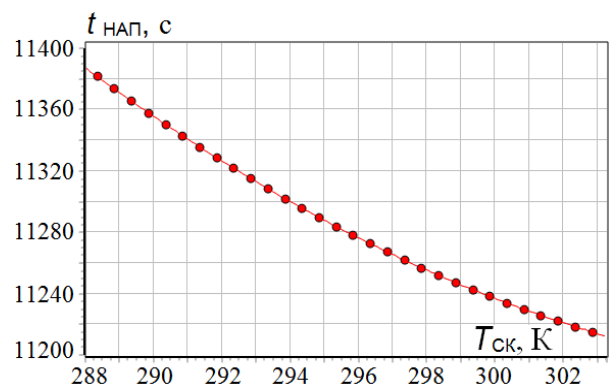


Рисунок 15 – График зависимости времени наполнения полости газом от температуры смежных конструкций

Это объясняется тем, что при меньшем значении температуры смежной конструкции этап «выдержки» начинается раньше и длится дольше (рисунки 16, 17), что в свою очередь является следствием меньшей интенсивности отвода теплоты от газа к стенке наполняемой полости (рисунок 18) и от стенки наполняемой полости к смежным конструкциям (рисунок 19).

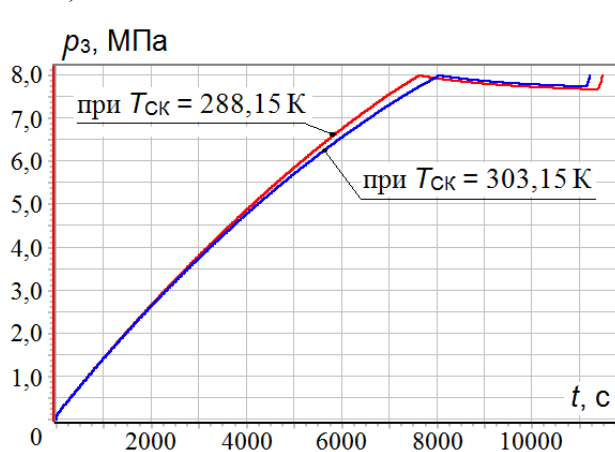


Рисунок 16 – Графики изменения давления газа в процессе наполнения полости при $T_{\text{СК}} = 288,15 \text{ К}$ и $T_{\text{СК}} = 303,15 \text{ К}$

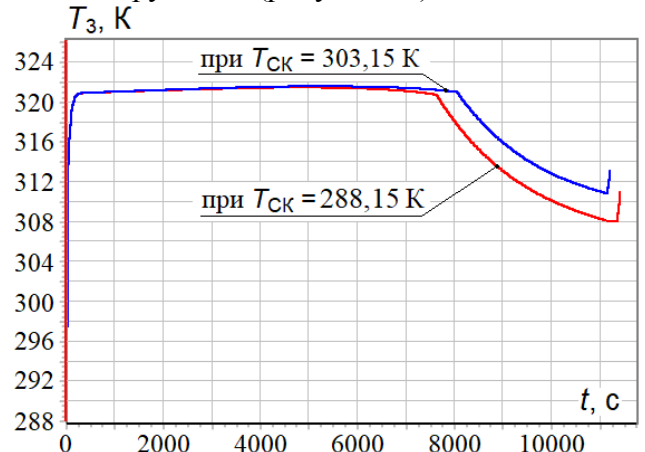


Рисунок 17 – Графики изменения температуры газа в процессе наполнения полости при $T_{\text{СК}} = 288,15 \text{ К}$ и $T_{\text{СК}} = 303,15 \text{ К}$

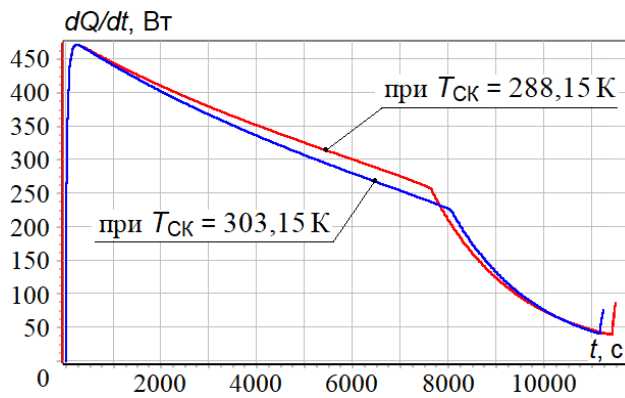


Рисунок 18 – Графики интенсивности отвода теплоты от газа к стенке полости в процессе наполнения при $T_{СК} = 288,15$ К и $T_{СК} = 303,15$ К

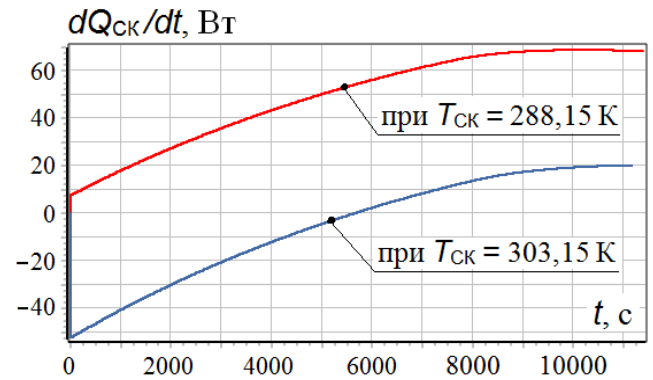


Рисунок 19 – Графики интенсивности отвода теплоты от стенки полости к смежным конструкциям в процессе наполнения при $T_{СК} = 288,15$ К и $T_{СК} = 303,15$ К

Зависимость времени наполнения полости газом от начальной температуры объекта наполнения имеет монотонно-возрастающий характер (см. рисунок 20). Повышение значения начальной температуры объекта наполнения сопровождается увеличением продолжительности процесса наполнения полости газом. Чем выше её значение, тем более интенсивно увеличивается продолжительность процесса наполнения полости газом (от 209,99 с/К в начале диапазона, до 457,91 с/К – в конце).

Анализ результатов исследования влияния ограничений по параметрам процесса наполнения на продолжительность наполнения полости газом (рисунки 21, 22) позволил выявить некоторые закономерности.

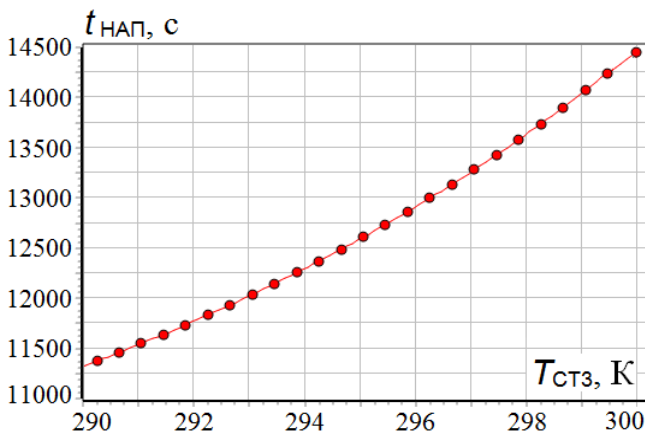


Рисунок 20 – График зависимости времени наполнения полости газом от температуры объекта наполнения

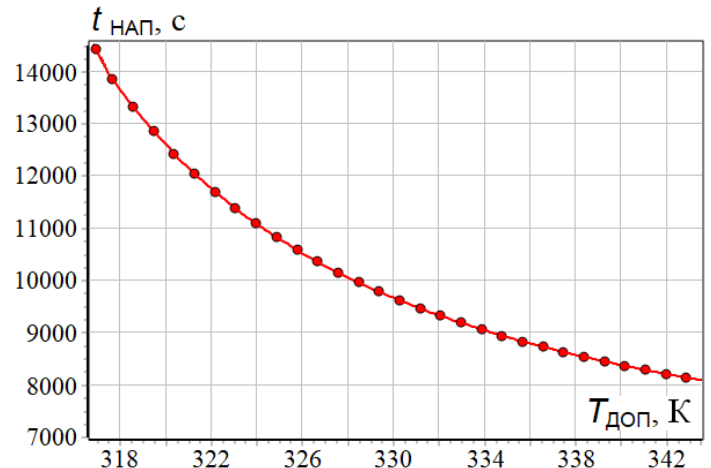


Рисунок 21 – График зависимости времени наполнения полости газом от допустимого значения температуры газа

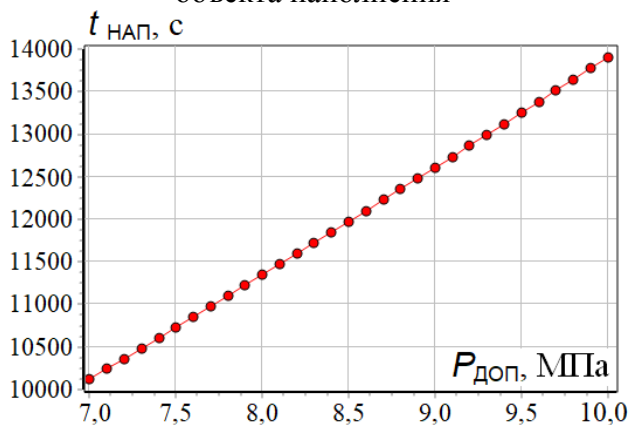


Рисунок 22 – График зависимости времени наполнения полости газом от допустимого значения давления газа

Зависимость времени наполнения полости газом от допустимого значения температуры газа представляет монотонно-убывающую функцию (см. рисунок 21). Повышение допустимого значения температуры газа в наполняемой полости приводит к уменьшению времени наполнения. Чем выше её значение, тем менее интенсивно сокращается время наполнения полости газом (от 665,73 с/К в начале диапазона, до 75,26 с/К – в конце).

Время наполнения полости газом прямо пропорционально допустимому значению давления газа в полости (рисунки 22).

При увеличении допустимого значения

давления газа на 0,1 МПа время наполнения увеличивается в среднем на 126 с (1,065 %), чем выше её значение, тем более интенсивно прирастает время (от 123 с в начале диапазона, до 131 с – в конце).

По полученным результатам исследования можно судить, что основными источниками интенсификации процесса наполнения являются: допустимое значение температуры газа в полости, начальная температура объекта испытаний и температура рабочей среды в источнике питания газа, поскольку к ним параметр времени наполнения наиболее чувствителен.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Разработаны новый способ (патент на изобретение РФ № 2703899) и методики наполнения полостей изделий РКТ при проведении ПВИ, позволяющие значительно сократить длительность и трудоёмкость процесса наполнения в 2,2 раза, сократить время подготовки изделий РКТ к пуску.

2 Разработаны схемные решения построения системы наполнения для реализации предложенных способов и методик наполнения газом полостей изделий РКТ при проведении ПВИ.

3 Разработана математическая модель системы наполнения полостей изделий РКТ при ПВИ, отражающая процессы в элементах системы и её функционирование в целом, а так же сформированы алгоритмы управления процессом наполнения.

4 Разработана математическая цифровая модель системы наполнения полостей изделий РКТ при ПВИ, ориентированная на решение задач расчета параметров системы и анализа её выходных характеристик.

5 Разработаны и отработаны алгоритмы управления автоматизированным процессом наполнения полостей изделий РКТ газом при ПВИ по типовому и предлагаемому способам.

6 Исследовано влияние начальных параметров и ограничений по параметрам процесса на продолжительность процесса наполнения полостей изделий РКТ при ПВИ, даны рекомендации по интенсификации процесса наполнения.

7 Полученные методики и рекомендации по реализации процесса наполнения полостей газом при проведении ПВИ приняты к использованию в КБ «Арматура» – филиале АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева», а также внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «КГТА им. В. А. Дегтярева» при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Технологические машины и оборудование».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях из перечня ВАК

1 Алиев, А. Р. Автоматизация технологического процесса наполнения полостей при пневмовакуумных испытаниях / А. Р. Алиев. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2021. – Том 5, № 4. – С. 24-32. – DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-24-32.

2 Алиев, А. Р. Разработка методики наполнения полостей устройств пневмоавтоматики газом при пневмовакуумных испытаниях / А. Р. Алиев. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 3(744)/2022. – С. 102-111. – DOI: 10.18698/0536-1044-2022-3-102-111.

3 Алиев, А. Р. Методика упрощенного расчета параметров процесса наполнения полостей изделий ракетно-космической техники при пневмовакуумных испытаниях / А. Р. Алиев, Ю. М. Тимофеев, Е. М. Халатов. – Текст : непосредственный // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 6. – С. 28-33. – DOI: 10.14489/td.2018.06.pp.028-033.

4 Алиев, А. Р. Построение математической модели системы наполнения полостей при пневмовакуумных испытаниях образцов ракетно-космической техники / А. Р. Алиев, Ю. М. Тимофеев, Е. М. Халатов. – Текст : непосредственный // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2018. – № 5 (май). – С. 41-47.

5 Алиев, А. Р. Синтез алгоритма наполнения полостей контрольным газом при испытаниях изделий на герметичность / А. Р. Алиев, А. В. Медведев, Е. М. Халатов. – Текст : непосредственный // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 12. – С. 28-32.

В изданиях, индексируемых Scopus, CA(pt), Springer, WoS(ESCI):

6 Aliev A. R., Medvedev A. V., Khalatov E. M. Synthesis of Algorithm for Filling Cavities with a Control Gas in Leakage Testing of Articles. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, Vol. 54, Nos. 11-12, 910-918. <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00571-3>.

Публикации в других изданиях

7 Алиев, А. Р. Совершенствование методики наполнения полостей изделий ракетно-космической техники при проведении испытаний на герметичность / А. Р. Алиев, Е. М. Халатов // XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» (Москва, 4 декабря 2019 г.). Материалы конференции. [Электронный ресурс]. – Москва: Мир науки, 2019. – 1 электрон, опт. диск (CD-ROM); 12 см. – (Электронная книга). – систем. требования: операционная система Windows XP или новее, macOS 10.12 или новее, Linux. Программное обеспечение для чтения файлов PDF. Привод DVD-ROM. – Загл. с экрана. – С.50-54. – ISBN 978-5-6043306-6-1.

8 Алиев, А. Р. Анализ конструкций тонкостенных изделий ракетно-космической техники, подвергаемых пневмовакуумным испытаниям / А. Р. Алиев // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. XXIV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. НИУ МЭИ (Москва, 9 декабря 2020 г.) : Сборник материалов и докладов. – Москва : Мир науки, 2020. – 1 электрон, опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. – (Электронная книга). – систем. требования: операционная система Windows XP или новее, macOS 10.12 или новее, Linux. Программное обеспечение для чтения файлов PDF. Привод DVD-ROM. – Загл. с экрана. – С. 33-44. – Текст : электронный.

Патенты Российской Федерации

9 Патент № 2 703 899 С1 Российская Федерация, МПК F 17 С 5/00 (2006.01). Способ наполнения емкостей сжатым газом до требуемого давления и устройство для его реализации : № 2018 129 533 : заявл. 13.08.2018 : опубл. 22.10.2019 / А. Р. Алиев, А. В. Медведев, Е. М. Халатов [и др.] ; заявитель и патентообладатель АО «ГКНПЦ имени М. В. Хруничева». – 12 с. : ил. – Текст : непосредственный.