

Сейфетдинов Руслан Бафаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО
ПРОЦЕССА ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО
ДВИГАТЕЛЯ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ КЛАПАНОМ**

**Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» на кафедре автоматических систем энергетических установок

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Шахматов Евгений Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Глебов Геннадий Александрович

доктор технических наук, профессор Лукачев Сергей Викторович

Ведущая организация:

ОАО "Самарский научно-технический комплекс им. Н.Д. Кузнецова"

Защита состоится 19 декабря 2008 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.02, созданном при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ

Автореферат разослан 17 ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., профессор

Скуратов Д.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Расширение областей применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) приводит к необходимости разработки силовых установок различного типа, позволяющих успешно решать большой круг специфических задач. Основными типами двигателей, применяемых в составе силовых установок БЛА, являются поршневые, турбореактивные и пульсирующие воздушно-реактивные двигатели (ПуВРД). Из перечисленных типов двигателей менее изученными до сих пор остаются ПуВРД. Практически исчерпанные возможности снижения удельного расхода топлива современных газотурбинных двигателей (ГТД), привели к тому, что проблема разработки современных ПуВРД стала актуальной. Более того интерес к созданию ПуВРД для БЛА вызывает ожидаемая простота конструкции, дешевизна и надежность двигателя.

Известно, что циклы с подводом теплоты при постоянном объеме являются термодинамически более выгодными. Это объясняется большей теплонапряженностью процесса горения, большей степенью расширения и большим значением термического КПД, чем при $p = \text{const}$.

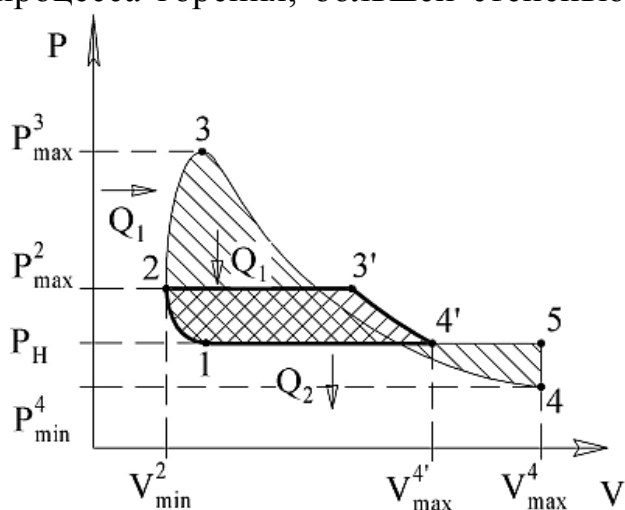


Рисунок 1 – Термодинамические циклы в PV – координатах

- цикл Брайтона ($p = \text{const}$);
- цикл ПуВРД (модифицированный цикл Гемфри)

Однако процесс подвода теплоты в цикле ПуВРД является квазиизохорным, поскольку одновременно с процессом теплоподвода начинается процесс расширения (рисунок 1). Проведенные к настоящему времени экспериментальные и теоретические исследования рабочих процессов в ПуВРД представляют большую научную ценность, однако носят разрозненный характер, что сдерживает внедрение ПуВРД, затрудняет разработку критериев оценки эффективности ПуВРД. Это связано с тем, что в настоящее время не существует единого мнения о механизмах рабочего процесса ПуВРД. Значение максимального и минимального давления в цикле ПуВРД определяется параметрами заряда в камере сгорания, которые в свою очередь определяются геометрией проточной части. В связи с этим необходимо разрабатывать методики расчета, позволяющие более детально моделировать рабочий процесс ПуВРД с учетом всей геометрии проточной части ПуВРД.

Цель исследования. Повышение эффективности процессов проектирования и доводки ПуВРД за счет разработки методов моделирования рабочего процесса на основе результатов экспериментально-теоретических исследований.

Задачи исследования.

1. Анализ существующих подходов к математическому моделированию рабочего процесса ПуВРД, выявление преимуществ и недостатков, определение условий их применимости. Анализ методов математического моделирования волновых процессов и процессов горения с целью определения подходов к математическому описанию рабочего процесса ПуВРД.

2. Теоретическое исследование формирования и эволюции контактного разрыва в резонансной трубе.
3. Теоретическое исследование влияния U-образной формы резонансной трубы на форму и амплитуду волн давления.
4. Теоретическое исследование влияния скорости заряда на входе в камеру сгорания на процесс наполнения, воспламенения и горения.
5. Разработка методики моделирования нестационарных течений в проточной части ПуВРД, позволяющей в зависимости от геометрии проточной части двигателя определять волновую картину течения и динамику изменения термогазодинамических параметров.
6. Разработка методики расчета параметров теплоподвода в камере сгорания ПуВРД, позволяющей учесть влияние состава смеси и температуры заряда на динамику выгорания топлива в камере сгорания.
7. Экспериментальное исследование рабочего процесса ПуВРД с целью подтверждения справедливости разработанной методики.
8. Экспериментальное и теоретическое исследование процесса запуска ПуВРД.

Методы исследования. В теоретических исследованиях применялось одномерное численное моделирование волновых процессов на основе метода характеристик и модифицированного метода Эйлера, а также численное моделирование нестационарных пространственных течений и горения методом контрольных объемов в программе Star-CD.

Экспериментальные исследования проводились на разработанной установке. При этом для регистрации пульсаций давления, переменного усилия, акустического излучения и расхода топлива применялся многоканальный автоматизированный комплекс измерений LMS.

Научная новизна.

1. Разработан алгоритм моделирования рабочего процесса аэродинамического клапана и резонансной трубы ПуВРД методом характеристик, позволяющий учесть формирование и эволюцию контактного разрыва, а также учесть взаимодействие возмущений с контактным разрывом.
2. Разработан алгоритм пространственно-временной дискретизации проточной части ПуВРД и численного решения уравнений характеристик и совместности модифицированным методом Эйлера.
3. Разработана нестационарная математическая модель квазиизохорного процесса теплоподвода в камере сгорания ПуВРД, учитывающая влияние процесса наполнения камеры сгорания, состава и температуры заряда.
4. Разработана методика одномерного численного моделирования рабочего процесса ПуВРД, позволяющая в зависимости от геометрии проточной части двигателя определять волновую картину течения, динамику выгорания топлива и учесть влияние геометрии проточной части на процессы наполнения камеры сгорания и воспламенения заряда.
5. Разработана конструктивная схема малошумного эжекторного ПуВРД.

Практическая ценность. Разработанная методика одномерного численного моделирования рабочего процесса ПуВРД может быть применена при проектировании ПуВРД с механическим и аэродинамическим клапаном, а также при проектирова-

нии впускных и выпускных систем ДВС. На основе данной методики разработана программа моделирования рабочего процесса ПуВРД с аэродинамическим клапаном.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на 1 международной и 3 всероссийских конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ. Из них в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК России - 2, патента на полезную модель - 3, тезисов докладов - 3.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных источников из 58 наименований, 2 приложения. Общий объем диссертации 132 страницы, 70 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен анализ работ по теоретическим и экспериментальным исследованиям рабочих процессов ПуВРД, а также работ по исследованию вибрационного горения. Выявлены подходы к математическому моделированию рабочего процесса ПуВРД, определены преимущества, недостатки и условия применимости. Оценивается возможность использования полученных результатов при проектировании и доводке ПуВРД.

Вопросу изучения рабочих процессов ПуВРД посвящены немногочисленные исследования, среди которых следует отметить работы Раушенбаха Б.В., Рейнста Ф. Г., Харратта С.Е., Фoa, Побежимова В.Н., и др. Раушенбах основывался на интегральных законах механики сплошной среды используя метод разрывных решений. Он предложил заменить реальную картину течения в ПуВРД условной, в которой свойства потока изменяются скачком на поверхностях разрыва, которые отделяют аэродинамический клапан, камеру сгорания и резонансную трубу друг от друга. Харратт рассматривал процесс расширения в трубе постоянного сечения закрытой с одной стороны и вывел дифференциальные уравнения для определения понижения давления в процессе инерционного истечения. Рейнст моделировал рабочий процесс ПуВРД с точки зрения линейной акустики и рассматривал ПуВРД как четверть волновой акустический резонатор. В 1986 году Зинн развил подход Рейнста, рассмотрев систему волновых уравнений с учетом линейного теплоподвода используя функцию Грина, и получил зависимость амплитуды давления в трубе от количества подведенной теплоты. Фoa описывал процесс истечения как ступенчатую функцию от времени. Побежимовым В.Н. предложена физическая модель рабочего процесса бесклапанного ПуВРД на основе представления термодинамического цикла в виде элементарных процессов, позволяющая получить аналитические зависимости для определения основных параметров рабочего процесса. В работах, проводимых в Королевском университете Белфаста в 1982 году, особое внимание было уделено более детальному моделированию течений в резонансной трубе на основе метода характеристик.

Гораздо более многочисленные исследования были проведены в смежных областях, применительно к проблемам вибрационного горения в ракетных и газотурбинных двигателях, а также в промышленных энергетических установках. Здесь следует отметить работы Раушенбаха Б.В., Натанзона М.С., Рэля, Рийке П.Л., Зондхаусса С., Аbruкова С.А., Бабкина Ю.Л., Ротта Н., Подымова В.М. и др. Имеется ряд монографий, в которых представлены результаты исследований по устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания авиационных двигателей, а также по использованию автоколебательного режима горения в практических целях.

Показано, что на данный момент не существует единого подхода к моделированию рабочего процесса ПуВРД и аппаратов пульсационного горения. Отсутствует четкое терминологическое разделение между процессами, протекающими в ПуВРД и так называемым вибрационным горением, встречающимся в ракетных двигателях, форсажных камерах ГТД и промышленных энергетических установках.

Выявлено пять подходов к описанию рабочего процесса ПуВРД: акустический, механический, газодинамический, волновой и вихревой подходы. Акустический подход рассматривает ПуВРД как акустический четверть волновой резонатор или резонатор Гельмгольца, в котором имеет место стоячая акустическая волна. Механический подход основывается на предположении о сосредоточенных параметрах и рассматривает ПуВРД как механическую автоколебательную систему. Газодинамический подход использует представление рабочего цикла ПуВРД как последовательность элементарных процессов и рассматривает динамику движения объема газа в течение элементарного процесса. В основу волнового подхода, получившего наибольшее распространение, заложено описание волновой природы нестационарного течения сжимаемой жидкости. Вихревая гипотеза природы рабочего процесса ПуВРД является наименее развитой и рассматривает в основе рабочего процесса динамику эволюции тороидальных вихревых структур, образующихся в камере сгорания.

Приведенные выше работы основаны на разбиении рабочего процесса ПуВРД на фазы или элементарные процессы, а также на замене реальной картины течения в проточной части двигателя идеализированной. Анализ показал, что в действительности в рабочем процессе ПуВРД не существует четкого разделения рабочего процесса на фазы, а имеет место непрерывное взаимодействие всех элементов ПуВРД. Все это создает определенные трудности при разработке и доводке ПуВРД.

Проведен патентный и литературный анализ ПуВРД и аппаратов пульсирующего горения различного назначения. На основании проведенных анализов сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований формирования и эволюции контактного разрыва в резонансной трубе (РТ), влияния U-образной формы резонансной трубы на форму и амплитуду волн давления и влияния скорости заряда на входе в камеру на процесс наполнения и горения. Исследования проводились путем трехмерного численного моделирования методом контрольных объемов в программе Star-CD процессов смесеобразования, воспламенения, горения и течения в проточной части ПуВРД. Для создания расчетной области использовалась геометрия проточной части экспериментальной установки. Подача топлива и воспламенение моделировалось аналогично эксперименту. Топливо подавалось через струйную форсунку, расположенную в аэродинамическом клапане. Моделирование процесса горения осуществлялось с использованием гибридной мо-

дели Kinetics/EBU, в которой учитывается влияние турбулентного перемешивания и кинетики химических реакций на скорость протекания процесса горения. В качестве химической реакции использовалась глобальная реакция горения пропана: $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$.

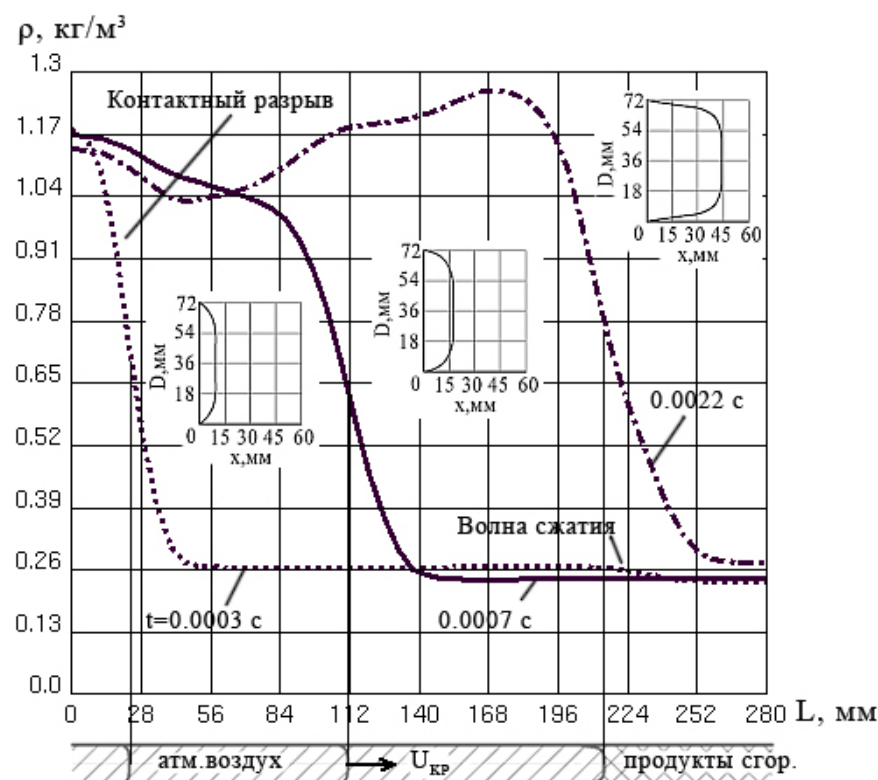


Рисунок 2 – Распределение плотности у среза РТ при всасывании и эволюция формы поверхности КР для различных моментов времени

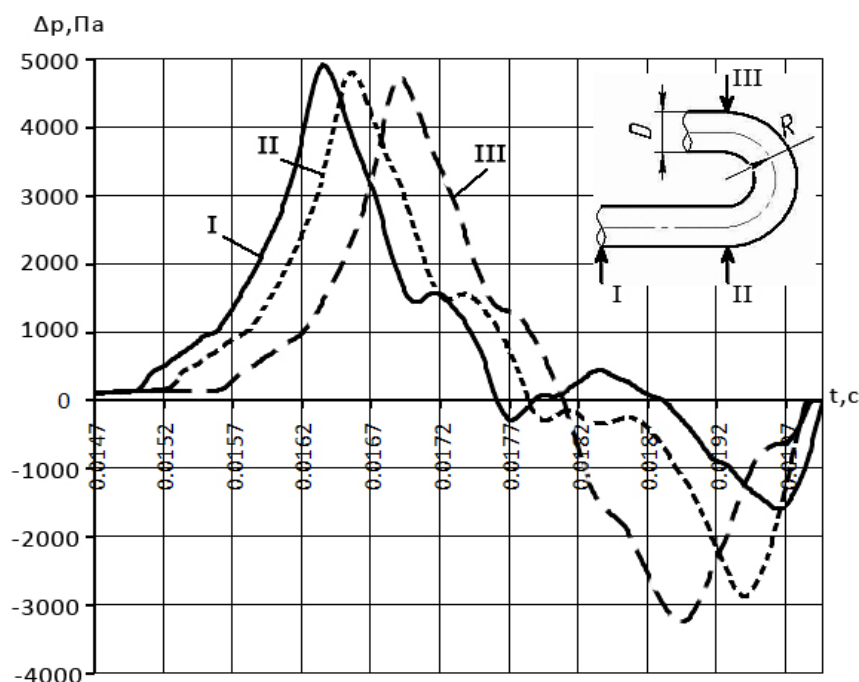


Рисунок 3 – Временные реализации давления на осевой линии РТ

Результаты исследований показали, что при всасывании атмосферного воздуха в РТ формируется контактный разрыв (КР), который создает неоднородность термогазодинамических параметров у среза РТ.

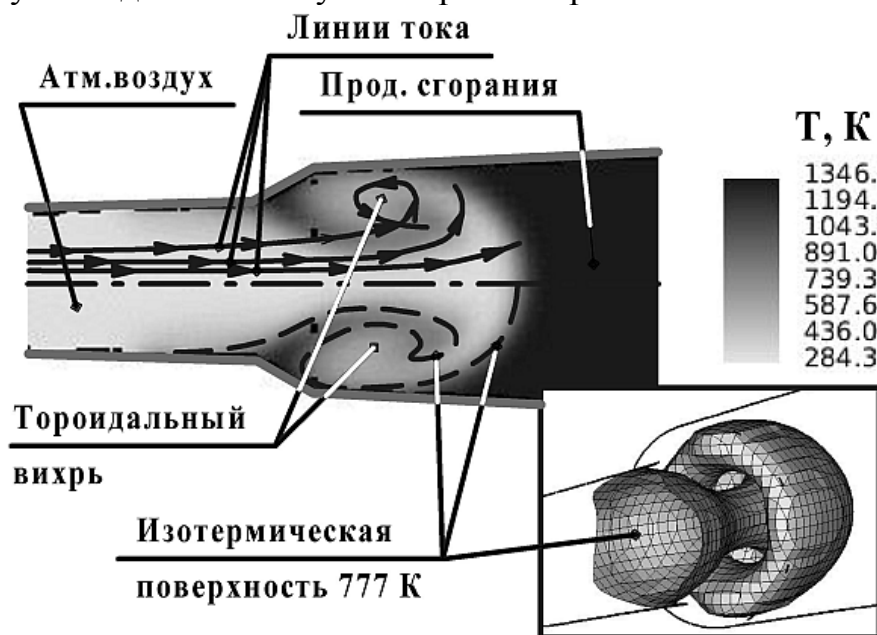
Проникая в РТ на значительное расстояние (рисунок 2) контактный разрыв несколько размывается в результате теплопроводности, диффузии и турбулентного перемешивания. Взаимодействуя с горячим пограничным слоем КР изменяет форму своей поверхности. Глубина проникновения КР в РТ зависит от геометрии проточной части ПуВРД.

Поэтому при моделировании рабочего процесса ПуВРД необходимо учитывать наличие, эволюцию и взаимодействие КР с волнами сжатия и разрежения.

Выявлено, что наличие U-образного изгиба РТ с большой степенью кривизны (отношение радиуса средней линии к диаметру канала 1,3) не оказывает значительного влияния на форму и амплитуду волн сжатия и разрежения (рисунок 3). На рисунке 3 точка I соответствует входу в прямолинейный участок РТ длиной 100 мм. Точка II соответствует переходу пря-

молинейного участка в криволинейный участок, а точка III переходу криволинейного участка в прямолинейный.

Поэтому при моделировании рабочего процесса в случае рассмотрения неизоэнтропного течения в РТ достаточно ограничиться расчетом потерь полного давления в искривленном канале. Однако расчет и оценка гидравлического сопротивления искривленного канала при пульсирующем потоке и переменной температуре требуют отдельного научного рассмотрения.



Численное моделирование процесса наполнения, воспламенения и горения в камере сгорания (КС) показало, что при поступлении атмосферного воздуха в камеру сгорания формируется тороидальный вихрь (рисунок 4). В результате этого контактная поверхность отделяющая продукты сгорания от воздуха приобретает грибовидную форму, при этом начинается перемешивание продуктов сгорания и заряда. Скорость заряда максимальна в ядре потока – на оси камере

Рисунок 4 – Структура течения при наполнении КС и форма изотермической поверхности, на которой возможно самовоспламенение смеси

сгорания. На рисунке 4 представлена форма изотермической поверхности в поперечном сечении и трехмерном виде, полученная при численном моделировании. Температура поверхности 777 К, поэтому она может быть источником воспламенения пропано-воздушной смеси в случае обеспечения концентрационных пределов воспламенения.

Выявлено, что предварительное перемешивание топлива с воздухом в аэродинамическом клапане (внешнее смесеобразование) и низкая скорость топливовоздушной смеси на входе в КС, по сравнению со скоростью распространения пламени при данных условиях, приводят к раннему началу процесса горения. В результате этого процесс повышения давления начинается при достижении головной части волны разрежения КС, а не при достижении КС отраженной волны сжатия, следующей за волной разрежения в КС от РТ. Это приводит к уменьшению объема заряда в КС и к снижению эффективности процесса тепловыделения, поскольку процесс горения начинается и развивается при пониженном давлении. Таким образом, описанные выше процессы могут приводить к потере мощности двигателя. Поэтому при проектировании и доводке ПуВРД необходимо учитывать особенности совместной работы АК, КС и РТ, а также процесса смесеобразования.

На основании полученных результатов предложена физическая модель рабочего процесса КС, использованная при разработке методики моделирования рабочего процесса ПуВРД.

В третьей главе разработана методика одномерного численного моделирования рабочего процесса ПуВРД на основе метода характеристик и метода приближенного решения дифференциальных уравнений – метода Эйлера. Построение инженерных методик расчета на основе численных методов обладает двумя важными особенностями. Эти особенности обусловлены ограничениями, которые потенциально содержат в себе численные методы. Во-первых, численно решаются прямые задачи, в то время как при проектировании и доводке изделий необходимо решать обратные задачи. Во-вторых, объем решаемых задач, а также точность и скорость решения все еще значительно ограничиваются ресурсами вычислительной техники. Первое ограничение использования численных методик приводит к тому, что процесс проектирования и расчета нового изделия носит итерационный характер, то есть для получения требуемой геометрии двигателя применяется метод последовательных приближений, с анализом полученных результатов на каждом этапе приближения. Данный факт определяет основное требование, предъявляемое к численной методике расчета: численная методика расчета должна обеспечивать требуемую точность решения при сохранении доступности численной модели для исследования. Это значит, что ресурсы рабочего времени, затрачиваемые на создание численной модели, и ресурсы машинного времени, а также аппаратные ресурсы вычислительной техники, необходимые для решения численной модели должны быть минимальными. Эти условия должны сократить время, затрачиваемое на расчет изделия на каждом этапе приближения к требуемой геометрии, а значит сократить время проектирования.

Для описания нестационарных течений в ПуВРД целесообразно использовать хорошо известный метод – метод характеристик. Данный метод обладает большой физической наглядностью и позволит извлечь максимум информации о волновых процессах из дифференциальных уравнений. При этом возможно обеспечить требуемую точность расчета и доступность численной модели для исследования.

Для математического описания процесса нестационарного течения сжимаемой жидкости была составлена система дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа в системе координат Эйлера, которые соответствуют законам сохранения энергии, массы, количества движения и уравнению состояния. Поскольку данная система дифференциальных уравнений аналитически неразрешима, был применен метод характеристик и получены дифференциальные уравнения характеристик и совместности:

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_0 = \frac{1}{u} - \text{уравнение энтропийной характеристики}; \quad (1)$$

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_{\pm} = \frac{1}{u \pm a} - \text{уравнение акустических характеристик}; \quad (2)$$

$$dp_0 - a^2 d\rho_0 = 0 - \text{уравнение совместности вдоль энтропийной характеристики} \quad (3)$$

$$dp \pm \rho a du = - \frac{d(\ln F)}{dx} \rho u a^2 dt - \text{уравнение совместности вдоль акустических характеристик}; \quad (4)$$

где t – время, x – координата, F – площадь поперечного сечения канала, a – местная скорость звука, ρ – плотность, u – скорость, p – давление.

Уравнения характеристик описывают траектории движения возмущений и частиц жидкости, а уравнения совместности описывают изменение скорости, плотности и давления вдоль траекторий. Далее для численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений применен модифицированный предиктор-корректор метод Эйлера. При построении методики использовался обратный метод характеристик, то есть с заранее заданной пространственно временной сеткой. Это позволило заложить в методику возможности влиять на численный процесс. На рисунке 5 представлена структура разработанной методики численного расчета нестационарных течений.

Поскольку метод характеристик не позволяет создать на его основе универсальный алгоритм расчета точек в проточной части ПуВРД, были выделены семь типов расчетных точек в проточной части ПуВРД (рисунок 6). Для каждого типа точек разработан отдельный алгоритм расчета, что позволило построить методику по модульной схеме и адаптировать ее к применению на персональном компьютере.

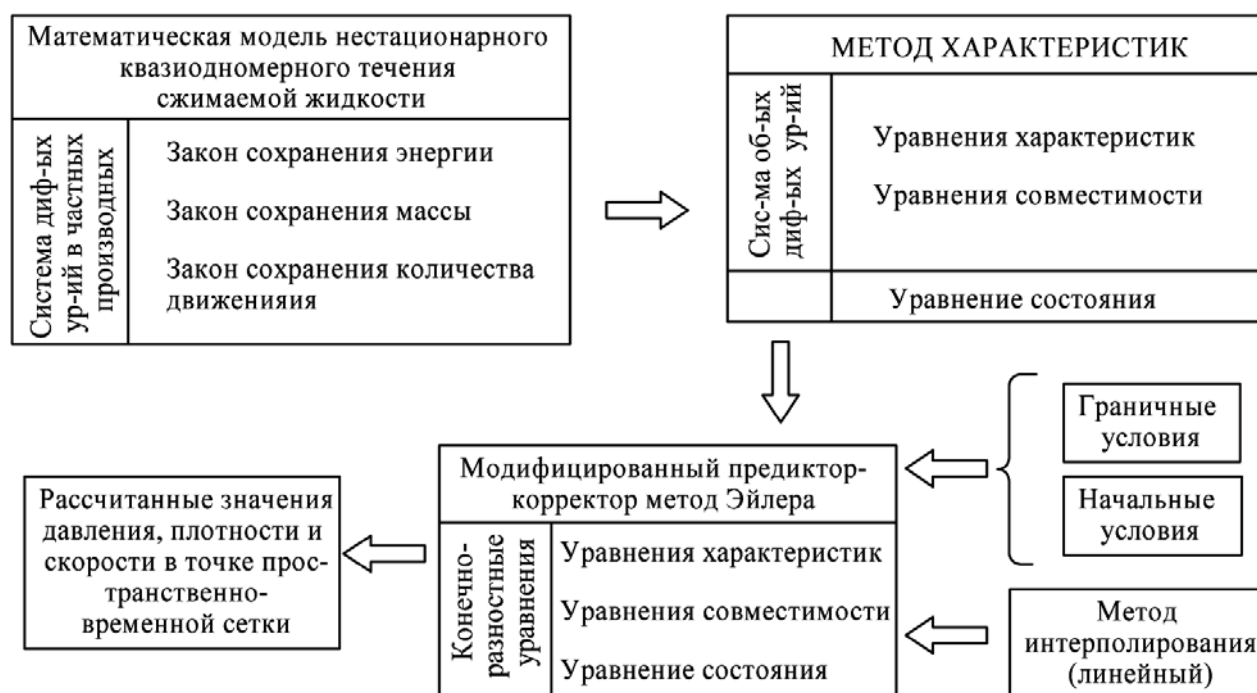


Рисунок 5 – Структура методики численного расчета точки нестационарного течения

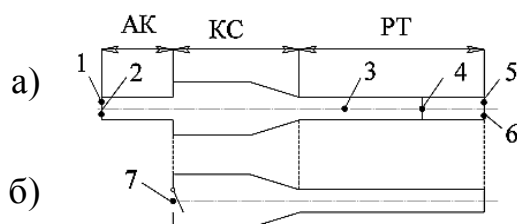


Рисунок 6 – Типы расчетных точек в проточной части ПуВРД:

- а) ПуВРД с аэродинамическим клапаном; б) ПуВРД с механическим клапаном; 1-точка на срезе АК при втекании; 2-точка на срезе АК при истечении; 3-внутренняя точка; 4- точка на контактном разрыве; 5- точка на срезе РТ при истечении; 6- точка на сре-

зе РТ при втекании; 7- точка на твердой стенке

Алгоритм расчета каждого типа точки состоит из двух итерационных циклов.

В первом цикле определяется положение точек пересечения характеристик с линией расчетного времени, а во втором цикле рассчитываются значения скорости, давления и плотности в расчетной точке. Выход из циклов осуществляется при достижении заданного критерия сходимости или при выполнении заданного числа итераций. Пример алгоритма расчета внутренней точки представлен на рисунке 7.

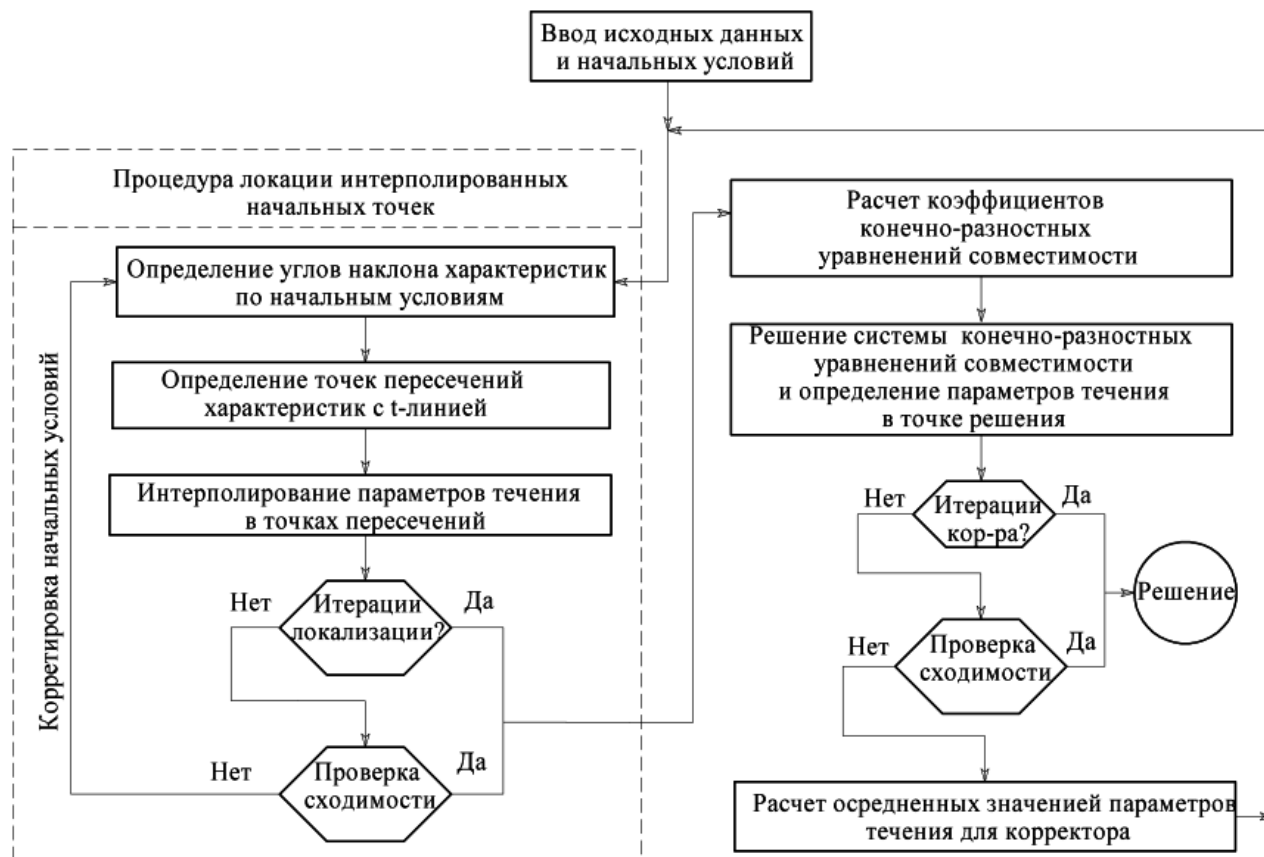


Рисунок 7 – Алгоритм расчета внутренней точки

Камера сгорания моделируется как элемент проточной части ПуВРД, в котором осуществляется подвод теплоты к рабочему телу. При этом алгоритм расчета импульса давления при теплоподводе аналогичен алгоритму расчета внутренней точки (рисунок 7), в котором в уравнения совместности добавлен член, учитывающий наличие источников тепла.

Моделирование нестационарного тепловыделения в камере сгорания основывается на представлении горения как бимолекулярной химической реакции между топливом и кислородом воздуха. Расчет динамика выгорания топлива ведется по модифицированному уравнению К. Неймана, которое также решается методом Эйлера:

$$\frac{dy}{dt} = Ke - \frac{E_a}{RT} \left[\frac{0.209 G_f M_0 (\alpha - 1) y}{V_{\hat{e}}} \right] (1 - y), \quad (5)$$

где y – доля выгоревшего топлива, t – время, E_a – условная энергия активации предпламенных реакций, R – газовая постоянная, T – температура заряда, G_f – масса топлива, M_0 – теоретическое количество воздуха необходимое для полного сгорания 1 кг топли-

ва, α – коэффициент избытка воздуха, V_E – объем камеры сгорания, K – комплекс, учитывающий влияние на скорость выгорания топлива следующих факторов: размеров камеры сгорания, вид топлива, агрегатное состояние, степень турбулизации заряда, однородность заряда, вероятность возникновения эффективных взаимодействий молекул в единице объема в единицу времени. Поскольку теоретическое определение K затруднительно, значение было получено экспериментально, на основе измерения динами нарастания давления в КС и для КС диаметром 55 мм составило $2,8 \cdot 10^6$.

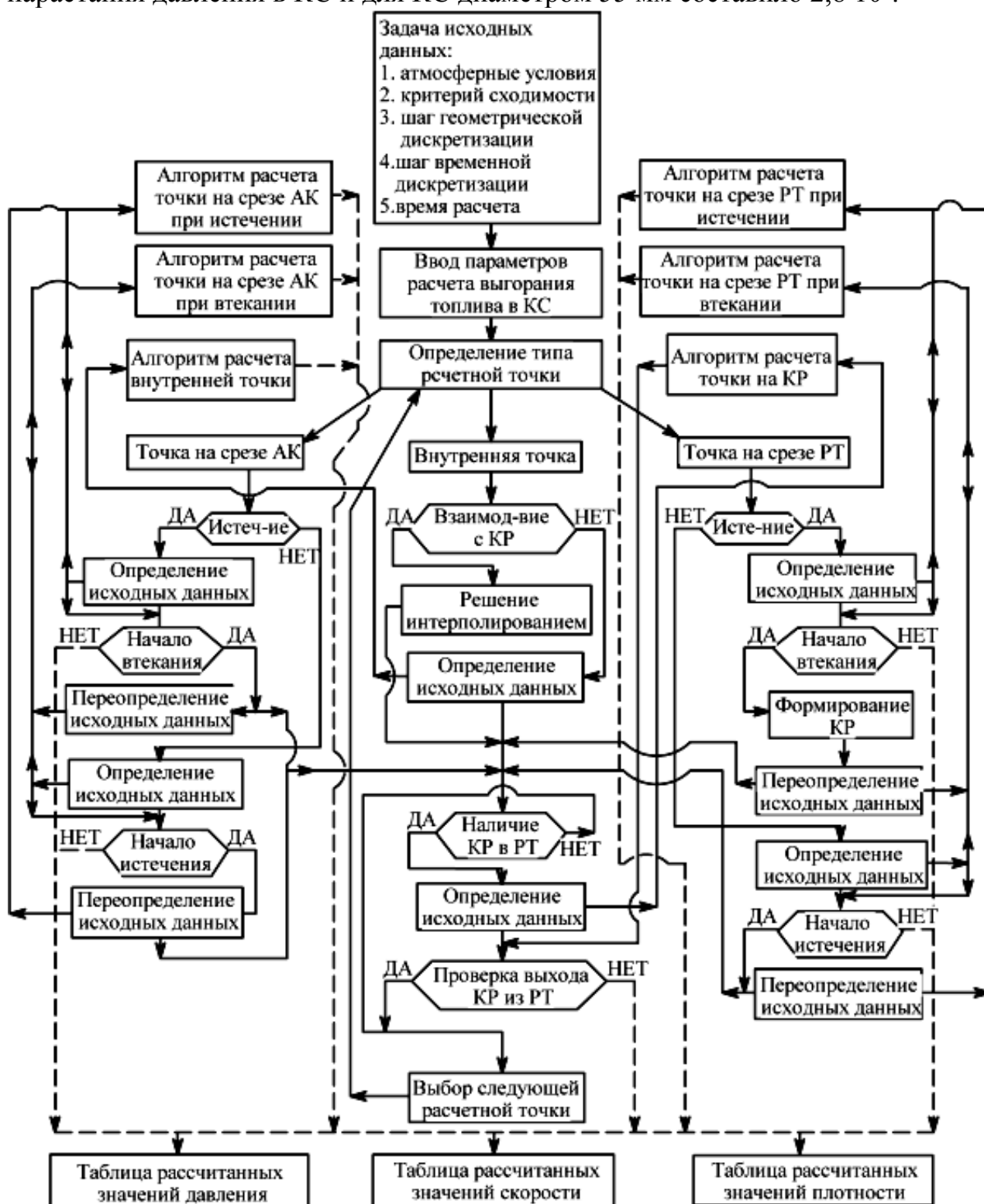


Рисунок 8 - Упрощенная структура методики расчета рабочего процесса ПуВРД

Для замыкания разработанных алгоритмов расчета типовых точек проточной части ПуВРД в единый вычислительный процесс был разработан алгоритм взаимо-

действия и обмена данными между алгоритмами расчета типовых точек, который реализует физическую модель рабочего процесса бесклапанного ПуВРД. Данный алгоритм позволяет определять тип точки, назначать корректно исходные данные для расчетов, а также формировать, следить за эволюцией и выходом контактного разрыва. Здесь же осуществляется процесс расчета взаимодействия волн сжатия и разрежения с контактным разрывом, отслеживания условий воспламенения и расчета цикловой массы воздуха и топлива, поступивших в КС при переменном давлении. В разработанный алгоритм также заложена возможность задачи параметров заряда на первом цикле соответствующих продувке КС при запуске, что позволило рассчитать динамику запуска и разгона ПуВРД.

Упрощенно структура методики расчета рабочего процесса ПуВРД численным методом на основе метода характеристик и модифицированного метода Эйлера представлена на рисунке 8.

Разработанная методика одномерного численного моделирования рабочего процесса ПуВРД, позволяет в зависимости от геометрии проточной части двигателя определять волновую картину течения, динамику изменения термогазодинамических параметров и степень наполнения КС с учетом совместной работы аэродинамического клапана, камеры сгорания и резонансной трубы. Результаты, полученные по данной методике, являются достаточными для расчета проектных характеристик ПуВРД: тяга, расход топлива. Однако общепринятых методик расчета критериев оценки эффективности ПуВРД таких как удельная тяга и удельный расход топлива на данный момент не существует.

В разработанной методике приняты следующие допущения: не учитывается теплообмен рабочего тела со стенками проточной части, не учитывается трение рабочего тела о стенки проточной части, не учитываются потери полного давления на срезах АК и РТ при всасывании, не учитывается картина течения за срезом АК и РТ, не учитывается искривление осевой линии проточной части, при расчете эволюции контактного разрыва, не учитывается действие явлений переноса и вязкости, таких как турбулентное перемешивание, диффузия, теплопроводность.

При расчете процесса сгорания зона теплоподвода определяется на основе расчета глубины проникновения заряда в КС и считается неподвижной до полного выгорания цикловой массы заряда. На основе представленной методики разработана программа численного моделирования рабочего процесса бесклапанного ПуВРД. Программа реализована в среде инженерно-научного программирования MATLAB и имеет модульную структуру, что позволило заложить в нее возможности модернизации путем создания и подключения дополнительных модулей.

В четвертой главе приведены результаты проверки адекватности разработанной методики расчета рабочего процесса ПуВРД, а также результаты экспериментального и теоретического исследования динамики процесса запуска ПуВРД.

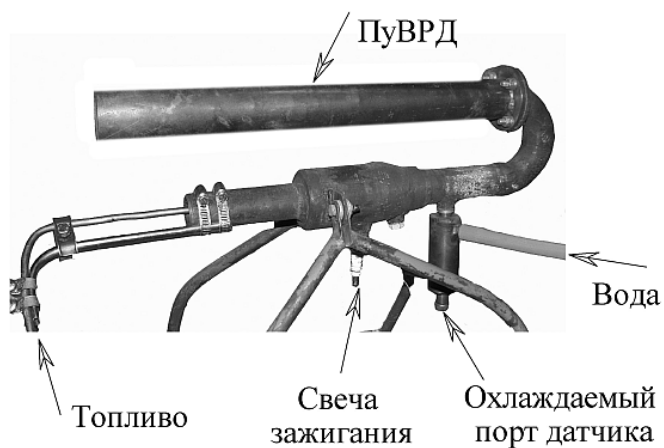


Рисунок 9 – Общий вид экспериментальной установки

Оценка адекватности проводилась путем сравнения теоретических результатов с данными экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились на разработанной установке (рисунок 9).

Резонансная частота трубки охлаждаемого порта датчика пульсаций давления составляет 795 Гц, что выходит за диапазон рабочих частот двигателя и позволяет пренебречь влиянием системы измерения на рабочий процесс.

На рисунке 10 представлена теоретическая и экспериментальная временная реализация давления на входе в РТ. Выявлено, что в процессе запуска ПуВРД можно выделить три стадии: запуск, разгон и режим. Это объясняется тем, что на запуске, в момент воспламенения заряда системой зажигания, параметры заряда в КС определяются условиями пусковой продувки: расход пускового воздуха через КС, подача пускового топлива и выдержка. В то время как на режиме параметры заряда поступающего в КС определяются динамикой нестационарного течения в проточной части ПуВРД, и время на процесс зарядки КС строго ограничено. Поэтому для получения достоверных данных о параметрах рабочего процесса ПуВРД необходимо рассчитывать порядка 10-15 рабочих циклов.

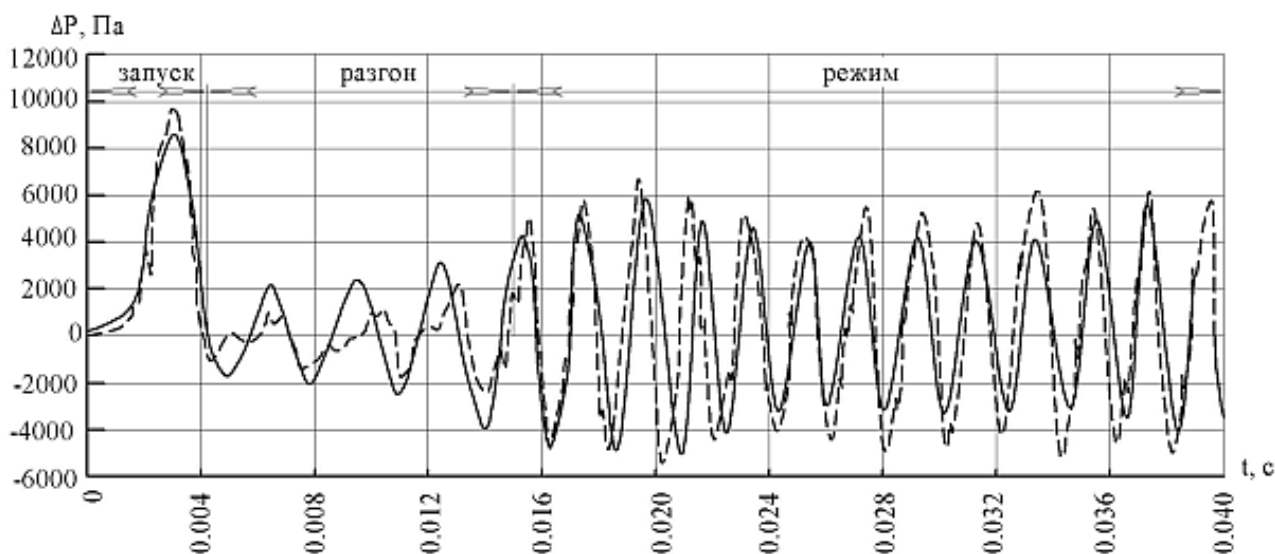


Рисунок 10 – Временные реализации давления в КС
 - - - эксперимент; — расчет

Спектральный анализ экспериментальной временной реализации давления (рисунок 11) показал, что основная энергия распределена на частотах 81 Гц и 332 Гц, то есть пульсации давления представляют собой низкочастотный сигнал с частотой 81 Гц модулированный сигналом с частотой 332 Гц. Данный факт объясняется тем, что работа проточной части от передней стенки КС до среза РТ подобна работе четверть волнового резонатора с длиной канала эквивалентной данному расстоянию, а общая длина проточной части ПуВРД от среза АК до среза РТ работает как полуволновой резонатор с переменной формой канала.

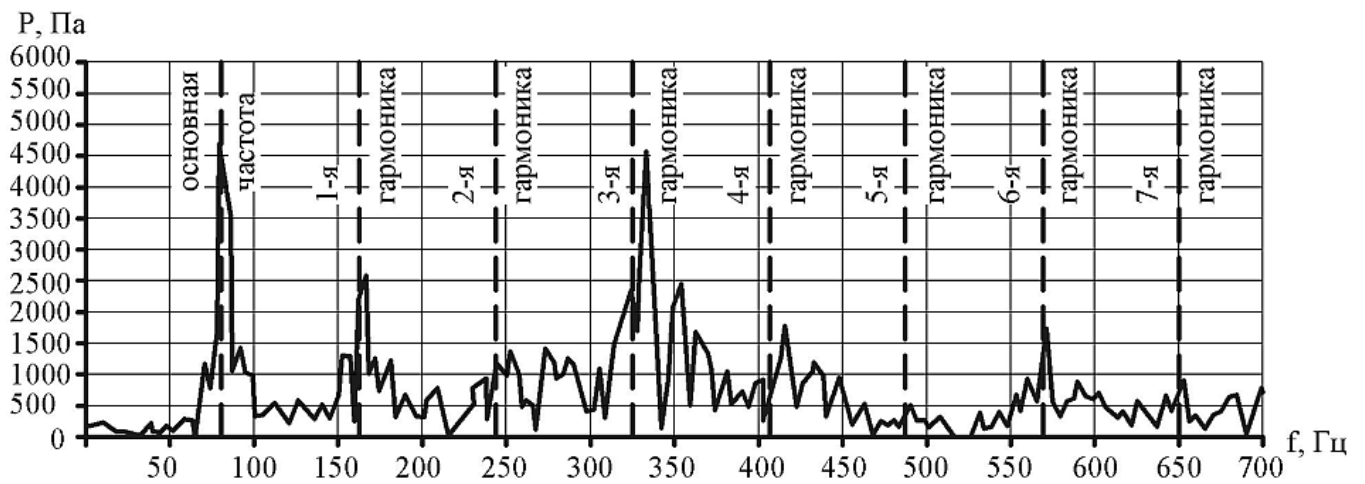


Рисунок 11 – Спектр пульсаций давления в КС построенный по экспериментальным данным

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе на основе теоретических и экспериментальных исследований газодинамических и акустических процессов в опытном ПуВРД разработаны методы моделирования рабочего процесса, обеспечивающие повышение эффективности проектирования и доводки ПуВРД и получены следующие основные результаты:

1. Анализ методов математического моделирования рабочего процесса ПуВРД показал, что одним из перспективных направлений численного моделирования является разработка методов расчета рабочего процесса ПуВРД на основе метода характеристик. Данный подход позволяет максимально извлечь информацию о волновой природе нестационарных течений в проточной части ПуВРД.
2. В результате теоретического исследования формирования и эволюции контактного разрыва среды в резонансной трубе показано, что контактный разрыв формирует существенную неоднородность термогазодинамических параметров, что делает необходимым его учет при расчете рабочего процесса ПуВРД.
3. Теоретическими исследованиями влияния U-образной формы резонансной трубы на форму и амплитуду волн давления выявлено, что наличие U-образного изгиба РТ с большой степенью кривизны не оказывает значительного влияния на форму и амплитуду волн сжатия и разрежения рабочего тела в РТ.
4. На основе теоретических исследований влияния скорости заряда на входе в камеру на процесс наполнения и горения показано, что скорость заряда влияет на степень наполнения камеры сгорания через задержку воспламенения, обусловленную тем, что скорость заряда в камере сгорания превышает местную скорость распространения фронта пламени.
5. Разработана методика моделирования нестационарных течений газа в аэродинамическом клапане и резонансной трубе ПуВРД обратным методом характеристик, позволяющая учесть формирование и эволюцию контактного разрыва, а также учесть взаимодействие возмущений с контактным разрывом.
6. Разработан алгоритм пространственно-временной дискретизации проточной части ПуВРД и численного решения уравнений характеристик и совместности модифицированным методом Эйлера.

7. Разработана математическая модель квазиизохорного процесса теплоподвода в камере сгорания ПуВРД, позволяющая определять динамику выгорания топлива с учетом состава и температуры заряда, а также учитывающая влияние нестационарных течений на процессы наполнения камеры сгорания и воспламенения.
8. Разработана методика численного моделирования рабочего процесса ПуВРД, позволяющая в зависимости от геометрии проточной части двигателя определять динамику изменения термогазодинамических параметров в проточной части ПуВРД, а также получать характеристики процессов запуска и разгона ПуВРД и определять его работоспособность.
9. Создана экспериментальная установка для исследования рабочего процесса бесклапанного ПуВРД, имеющая охлаждаемые порты датчиков и позволяющая проводить измерения пульсаций давления в резонансной трубе и камере сгорания.

Основное содержание работы опубликовано

в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК России

1. Сейфетдинов Р.Б. Математическая модель рабочего процесса пульсирующего детонационного двигателя // Изв. СНЦ РАН.-Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2007, том № 3 с. 701-706.
2. Сейфетдинов Р. Б. Концепции применения детонационного горения в авиационных силовых установках // Вестник СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Самара: СГАУ, 2007, № 2(13) с. 161-167.

в других изданиях

3. Сейфетдинов Р.Б., Сейфетдинов Б.О., Сейфетдинов М.Б., Шахматов Е.В. Малошумный эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель. Патент на полезную модель № 67652 от 02.05.2007.
4. Сейфетдинов Р.Б., Богданов С.А. и др. Глушитель Шума. Патент на полезную модель. Заявка № 2007123970/22(026098) от 25.06.2007.
5. Сейфетдинов Р.Б., Иголкин А.А., Шахматов Е.В., Крючков А.Н. Пневмоглушитель. Патент на полезную модель № 59152 от 24.11.2005.
6. Сейфетдинов Р.Б., Шахматов Е.В. Анализ резонансно-волновых процессов в каналах пульсирующего воздушно-реактивного двигателя // Всероссийская молодежная научная конференции с международным участием «IX Королевские чтения» 1-3 октября. Тезисы докладов – Самара: СГАУ, 2007 – с. 314.
7. Сейфетдинов Р.Б., Кутузов Р.Р., Сейфетдинов М.Б. Численное моделирование акустических характеристик расширительной камеры методом контрольных объемов // Всероссийская молодежная научная конференции с международным участием «IX Королевские чтения» 1-3 октября. Тезисы докладов – Самара: СГАУ, 2007 – с. 313.
8. Сейфетдинов Р.Б. Численное исследование влияние волновых процессов в аэродинамическом клапане и резонансной трубе на динамику пульсирующего воздушно-реактивного двигателя // Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» 30-31 октября. Тезисы докладов – Уфа: УГАТУ, 2007 – с. 7.