

На правах рукописи

УДК 629.7.036.5-543

Якутин Александр Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ
РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В МИКРО-ЖРД НА БАЗЕ МЭМС-
ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность: 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре «Ракетные двигатели» Московского авиационного института (государственного технического университета) МАИ, г. Москва.

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент,
Коломенцев Александр Иванович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Стернин Леонид Евгеньевич

кандидат технических наук,
Реш Георгий Фридрихович

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное
предприятие «Центральный институт
авиационного моторостроения им. П.И.
Баранова»

Защита состоится «13» 12 2010 г. на заседании диссертационного совета Д212.125.08 Московского авиационного института (государственного технического университета) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.


С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью организации, просьба направлять по указанному адресу института.

Автореферат разослан « 9 » 11 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

д.т.н., профессор

 Ю.В.Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Концепция применения малых и микрокосмических аппаратов (микро-КА) в настоящее время стала особенно актуальной из-за стремления минимизировать стоимость жизненного цикла спутников для различных космических миссий путём уменьшения массы и размеров этих аппаратов. Использование современных технологий и материалов, новых конструктивных решений позволяет существенно уменьшить габариты электронной аппаратуры спутников, снизить потребляемую ею энергию и уменьшить в целом массу космических аппаратов (КА). Это дает основание для реализации ряда амбициозных космических программ за счет применения микро-КА нового поколения.

Некоторые задачи, выполняемые микро-КА, требуют коррекции орбиты и положения аппарата в космическом пространстве. Для управления такими аппаратами и удовлетворения требований к точности управления положением КА ключевой проблемой является создание ракетных микродвигателей (с тягой 1 – 100 мН).

Основными областями применения космических аппаратов с микродвигателями являются: управление космическим телескопом, телекоммуникация, навигация, мониторинг ближайшего космического пространства и различных ресурсов Земли, выполнение научных миссий на околоземных орбитах, межпланетные полеты, зондирование космических тел, например, астероидов, инспектирование КА, формационные полеты, например, формирование сетки антенны для космического телескопа и многое другое.

Высокие требования к точности управления положением микро-КА и одновременно малая масса двигательной установки (ДУ) не могут быть обеспечены известными жидкостными ракетными двигательными установками малой тяги. В этой связи создание жидкостных ракетных микродвигателей (микро-ЖРД), обеспечивающих уровень тяги порядка 1 мН, включая импульсный режим работы, и одновременно имеющих очень малую массу, является актуальной задачей современного ракетного двигателестроения. Современные технологии, использующие микро-электромеханические системы (МЭМС), позволяют уменьшить размеры камер ракетных двигателей и снизить массу до величин, позволяющих их применение на наноспутниках (массой 1-10 кг). Конструкция микродвигателей предполагает интеграцию микромодулей компонентов микросистем, таких как клапаны, магистрали, емкости для топлива, тракты, сопла и т.д. При разработке таких микродвигателей необходимо решение ряда проблем. Одной из них является отсутствие сведений о рабочих процессах в микротрактах двигателя. Это, в свою очередь, обуславливает создание математических моделей процессов преобразования топлива и течения горячих продуктов в трактах, имеющих проходные сечения в десятки микрометров. Другой проблемой является разработка новых перспективных технологий, предусматривающих создание микротрактов, использование новых материалов, покрытий и т.д.

Данная работа посвящена исследованию рабочих процессов в микро-ЖРД на однокомпонентном топливе (гидразине) и проводилась в рамках международного проекта.

Практическая отработка экспериментальных образцов создаваемых микро-ЖРД сопряжена с высокой стоимостью этих работ. Высокая эффективность рабочего процесса микродвигателей может быть обеспечена за счет создания достоверных математических моделей рабочих процессов в его камере, а также оптимизацией протекания этих процессов.

Цель работы. Целью настоящей работы является создание математической модели внутрикамерных рабочих процессов микро-ЖРД на однокомпонентном топливе применительно к трактам в несколько десятков микрон и разработка рекомендаций по геометрии камеры двигателя и по параметрам рабочих процессов для данного типа микро-ЖРД.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработка математических моделей тепловых процессов в каталитическом микрореакторе при разложении монотоплива (гидразина);
- разработка математических моделей гидро- и газодинамических процессов течения в распределительном блоке, каталитическом реакторе и сопле;
- разработка математических моделей процессов теплообмена в ЧИПе микродвигателя (с учетом теплоотвода в его стенки);
- разработка методики математического моделирования камеры микродвигателя в целом и алгоритма решения этой модели;
- определение тяги и удельного импульса микро-ЖРД в зависимости от конструктивных параметров камеры двигателя и параметров рабочих процессов;
- проведение расчётов для конкретных элементов микро-ЖРД с целью апробирования и верификации моделей и методов расчёта.

Методы исследования. Решению поставленных задач предшествовал поиск и систематизация информации по:

- типам ракетных микродвигателей;
- существующим методам описания процессов термо-газодинамики (со спецификой микромасштабов);
- химической кинетики (со спецификой разложения гидразина);
- данным по теплофизическим свойствам компонентов газовой смеси.

В основу метода исследования положены уравнения Навье-Стокса, уравнение сохранения энергии и уравнения химической кинетики.

При проведении расчётов одним из основных методов был метод конечных элементов. Использовались вновь разработанные программы и комплекс программ computational fluid dynamics (CFD). Для решения жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений химической кинетики использовался метод «прогноза-коррекции», дополненный процедурой выбора переменного шага интегрирования в зависимости от величины подинтегральной функции.

Научная новизна. Впервые разработана математическая модель процессов преобразования монотоплива в конечные газовые продукты в трактах каталитического реактора, имеющего поперечные размеры в несколько десятков микрометров.

Разработана методика математического моделирования и комплекс программ для расчета течения газовых смесей в микроканале, распределительном блоке, каталитическом реакторе и микросопле Лавалья.

Проведены численные исследования зависимости выходных характеристик модели микро-ЖРД от основных параметров конструкции и рабочих процессов.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается строгостью постановки задач, использованием современных математических методов и программных продуктов для решений прикладных задач тепло- и массообмена в элементах микро-ЖРД, хорошим соответствием полученных численных результатов опубликованным расчетным и экспериментальным данным.

Практическая ценность. Разработанные математические модели, алгоритмы и комплекс программ могут быть использованы:

- в научно-исследовательских и проектно-расчетных работах по изучению внутрикамерных рабочих процессов в элементах микродвигателя;

- в качестве инструмента для оптимизации выходных характеристик при создании опытного образца микро-ЖРД и для снижения затрат на отработку микродвигателей;

- как лабораторный практикум к учебным курсам физической газовой динамики, программным комплексам для решения задач теплообмена и динамики жидкости и газа.

Автор защищает следующие основные положения работы:

- математическую модель рабочих процессов микро-ЖРД на унитарном топливе (гидразине);

- математические методы и комплекс программ для расчета уравнений модели;

- алгоритм и программу аппроксимации теплофизических свойств компонент газовой смеси и аппроксимации эквивалентного тепловыделения при реакции разложения монотоплива, как функции двух переменных;

- зависимости выходных характеристик микро-ЖРД от основных конструктивных параметров элементов микро-ЖРД и параметров процессов, происходящих в них;

- рекомендации по конструктивным и эксплуатационным параметрам микро-ЖРД.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях:

- 1) Российско-Китайская международная конференция по проектированию аэрокосмической техники. (Москва, 24-28 сентября, 2007).
- 2) XII International symposium on space propulsion. (Beijing, China, 8 – 12 October, 2007).

- 3) Всероссийская конференция молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной технике -2008». (Москва, 21-24 апреля, 2008).
- 4) XVIII научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов. (Королев, 24- 28 ноября, 2008).
- 5) Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». (Москва, 25 – 27 ноября, 2008).
- 6) XXXIII академические чтения по космонавтике «Актуальные проблемы Российской космонавтики». (Москва, 26 – 30 января, 2009).
- 7) XXII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция. (Казань, 17 – 19 мая, 2010).
- 8) Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии-2010» (Реутов, 28 сентября 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 4 статьи в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК, и 8 тезисов докладов на научно-технических конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 57 наименований. Объем диссертации содержит 120 страниц текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы и ее научной новизны. Приводится список конференций, на которых докладывались основные результаты работы, дается описание структуры и содержания диссертации. Представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены преимущества разработки и внедрения микрокосмических аппаратов, делается краткий обзор различных типов ракетных микродвигателей и работ по математическому моделированию рабочих процессов в элементах микро-ЖРД, описывается объект исследования.

Работы, посвященные различным типам ракетных микродвигателей и моделированию процессов течения в микротрактах, появились в конце 90-ых годов. Так, в работе Р. Раджу (R. Raju) и С. Рой (S. Roy) (2002) рассмотрены процессы течения в микро и наноканалах, которые описываются с помощью уравнений Навье-Стокса. В работе В. Луизеса (W.F. Louisos) и Д. Хитта (D.L. Hitt) (2005) численно, на основе программного комплекса CFD «FLUENT», исследуется оптимальный угол расширения для плоского непрофилированного сопла. В работе Г. Кхарчафи (G. Kharchafi), У. Батоннеу (Y. Batonneau) (2007) даны результаты расчетов распределения температуры при разложении монотоплива в микроканале диаметром 0,1 мм. В России проблемами разработки микроустройств занимаются в лаборатории «Нано-и Микросистемной техники» СПбГТУ, где имеются работы по микросопловым устройствам.

В настоящей диссертационной работе, помимо разработки моделей отдельных элементов, даются методика математического моделирования камеры микродвигателя в целом, алгоритм решения обобщенной модели, методы численного решения уравнений модели, результаты вариантных

расчётов и рекомендации по геометрии камеры двигателя и по параметрам рабочих процессов для данного типа микро-ЖРД.

В первой главе рассмотрены различные типы ракетных микродвигателей. На рис. 1 приведены основные концепции, реализуемые в ракетных микродвигателях в зависимости от величины тяги и удельного импульса.

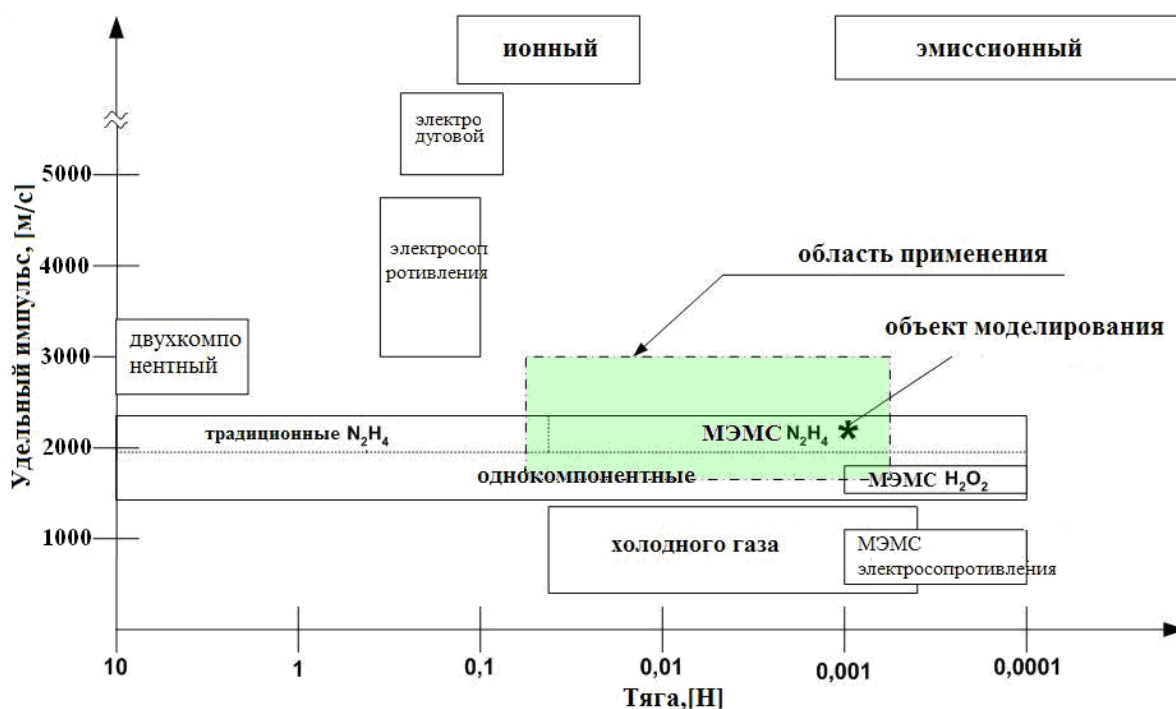


Рис. 1. Концепции реализации микродвигателей

Для решения задач точной ориентации нано и микроспутников за рубежом существуют разработки микро-ЖРД, работающих на холодном сжатом газе. При сравнительном анализе очевидно, что такие двигатели уступают разрабатываемым микро-ЖРД на основе МЭМС-технологий - в 2-3 раза по удельному импульсу, массе и другим показателям эффективности. Микродвигатели на однокомпонентном топливе являются системами многократного включения, не требуют для работы большие затраты электрической мощности и позволяют реализацию унифицированных двигательных установок. В этом случае используется одно топливо для маршевой установки, систем стабилизации и ориентации.

Предполагается, что микро-ЖРД работает импульсно с длительностью рабочих импульсов 0,01 - 0,1 с. Во время работы микро-ЖРД в реактор подается жидкий гидразин, а продукты разложения истекают из сопла, создавая необходимую тягу. Подача гидразина производится с помощью вытеснительной системы подачи. На рис. 2 показана схема такого двигателя. Микродвигатель состоит из следующих основных элементов: распределительный блок, предреакторное пространство, каталитический реактор и сопло. Микро-ЖРД, выполненный на основе МЭМС-технологий, представляет собой ЧИП.

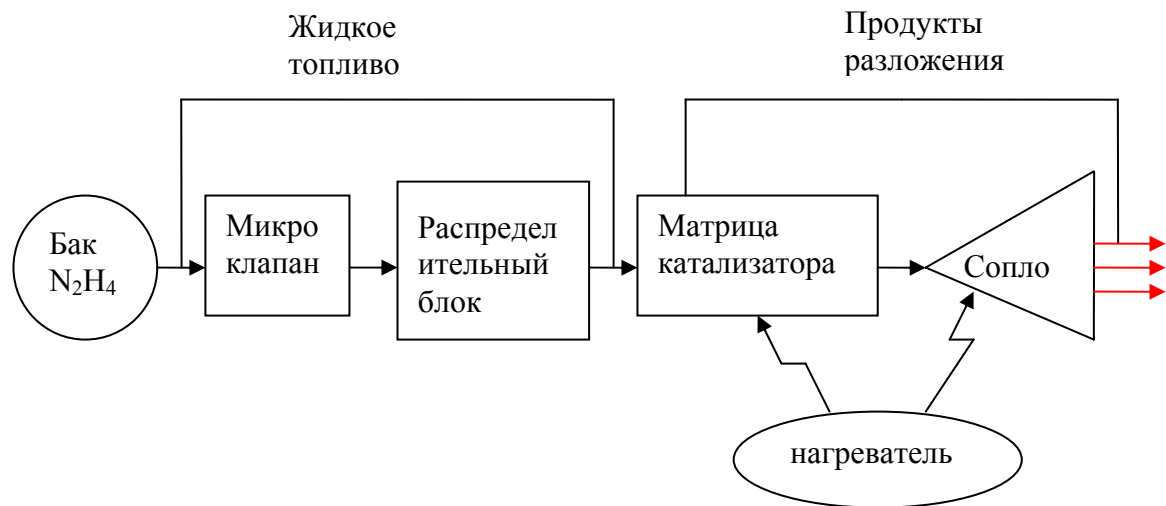


Рис. 2. Принципиальная схема микро-ЖРД

Основными особенностями исследуемого микродвигателя являются его сверхмалые размеры и прямоугольная форма поперечных сечений рис. 3. Технологией изготовления микродвигателей является ионное травление на кремниевой подложке. Сверху двигатель накрывается крышкой. Каталитический реактор представляет собой совокупность отдельно стоящих и равноудаленных друг от друга элементов, которые покрываются каталитически активным металлическим сплавом «Shell – 405» на основе иридия.

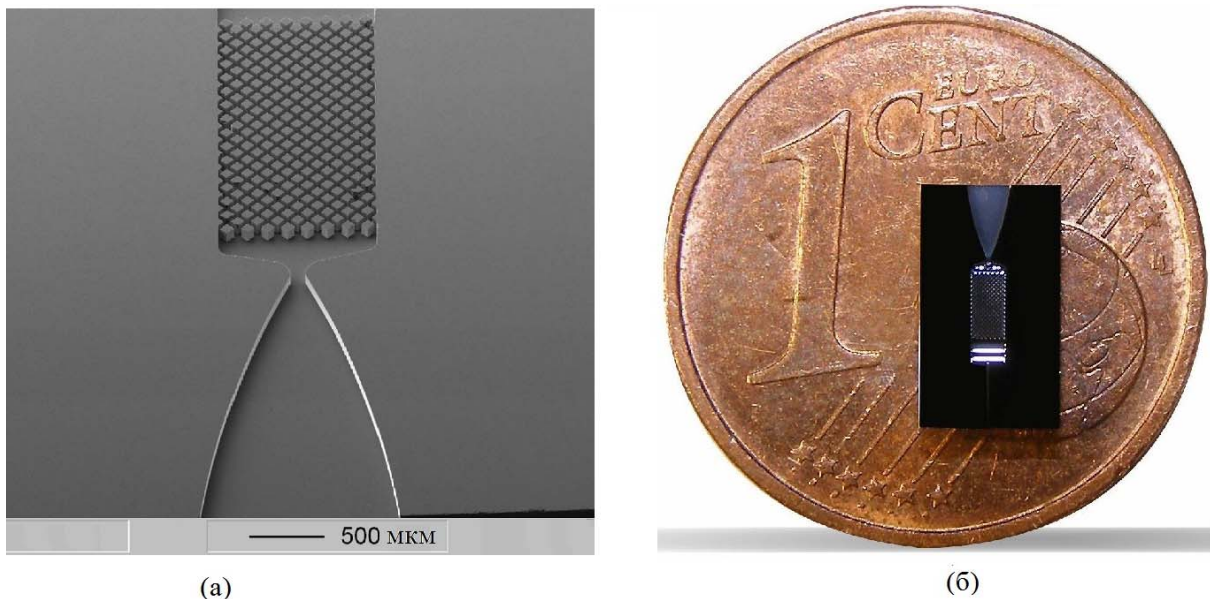


Рис. 3. Камера (а) и снимок образца (б) микро-ЖРД

При проведении вариантных расчетов принимались следующие размеры ЧИПа: длина - 15 мм, ширина – 10 мм, высота – 1 мм; длина каталитического реактора и сопла - 6,57 мм, ширина среза сопла – 1,27 мм, глубина - 0,15 мм.

В работе исследовался микродвигатель со следующими функциональными параметрами: топливо – гидразин, номинальное давление в камере 0,1-0,3 МПа, расход топлива 0,55-5,097 мг/с, ожидаемая тяга порядка 1 мН.

Вторая глава диссертации посвящена разработке общей структуры математической модели микро-ЖРД и математической модели течения вязкой сжимаемой среды. При моделировании используется сплошное представление

среды. Применимость такого представления определяется значением числа Кнудсена, которое характеризует степень разреженности газа.

$$Kn = \lambda / \Lambda, \quad (1)$$

где λ - длина свободного пробега частиц текущей среды, а Λ - характерный размер физической системы. При $Kn < 0,1$ допускается применение модели сплошной среды. Формулу (1) можно переписать в следующем виде, более удобном для использования

$$Kn = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot R \cdot T}} \cdot \frac{\mu}{\rho \cdot d}, \quad (2)$$

где ρ , μ , T - плотность, динамическая вязкость и температура среды соответственно, R - газовая постоянная среды, d - диаметр проходного сечения.

Максимальное значение числа Kn в микро-ЖРД может достигаться в каналах каталитического микрореактора. Если взять за $d = 30$ мкм, то при температуре 900 К, давлении 0,08 МПа, вязкости $3,3 \times 10^{-5}$ Па·с, число Кнудсена составляет порядка 0,01.

Предполагается ламинарный характер течения газов. Малые размеры двигателя в сочетании с низким рабочим давлением (0,1 - 0,3 МПа) уменьшают значение числа Рейнольдса, которое определяет характер течения:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu}. \quad (3)$$

Математическое моделирование на данном этапе осуществлялось при следующих допущениях:

- после открытия клапана подачи, при условии постоянства давления подачи, расход гидразина в течение всего рабочего импульса остается постоянным, не зависящим от процессов, протекающих в реакторе;
- температура материала матрицы плавно растет в течение ряда рабочих импульсов, мало изменяясь в течение одного рабочего импульса микро-ЖРД;
- течение рабочей среды в канале происходит в ламинарном режиме;
- образующиеся газы считаются идеальными;
- выполняются условия применения модели сплошной среды;
- отсутствуют засорения в элементах конструкции микро-ЖРД;
- свойства каталитической поверхности в течение процесса разложения гидразина остаются постоянными.

Структурная схема общей модели микро-ЖРД показана на рис. 4. На входе в модель задаются геометрия камеры, расход и температура гидразина, температура стенок, температура и давление окружающей среды, режим работы, длительности рабочих импульсов и интервалов между ними.

Чтобы упростить математическое описание выделения тепла в реакторе и его распространения в корпусе двигателя, предполагается, что вместо катализатора расположен локальный источник тепла мощностью $S(x, T_w)$. $S(x, T_w)$ находится из решения тепловой задачи каталитического микрореактора, для заданной конструкции, как функция пространственной переменной и температуры поверхности катализатора.

Расчет течения в камере микродвигателя производился на основе уравнений Навье-Стокса и энергии с учетом теплоотвода в стенки ЧИПа. По результатам расчетов получаем распределения компонент вектора скорости, давления, температуры, по которым можно определить и другие, интересующие нас выходные параметры: тягу, импульс тяги, удельный импульс и т.д.

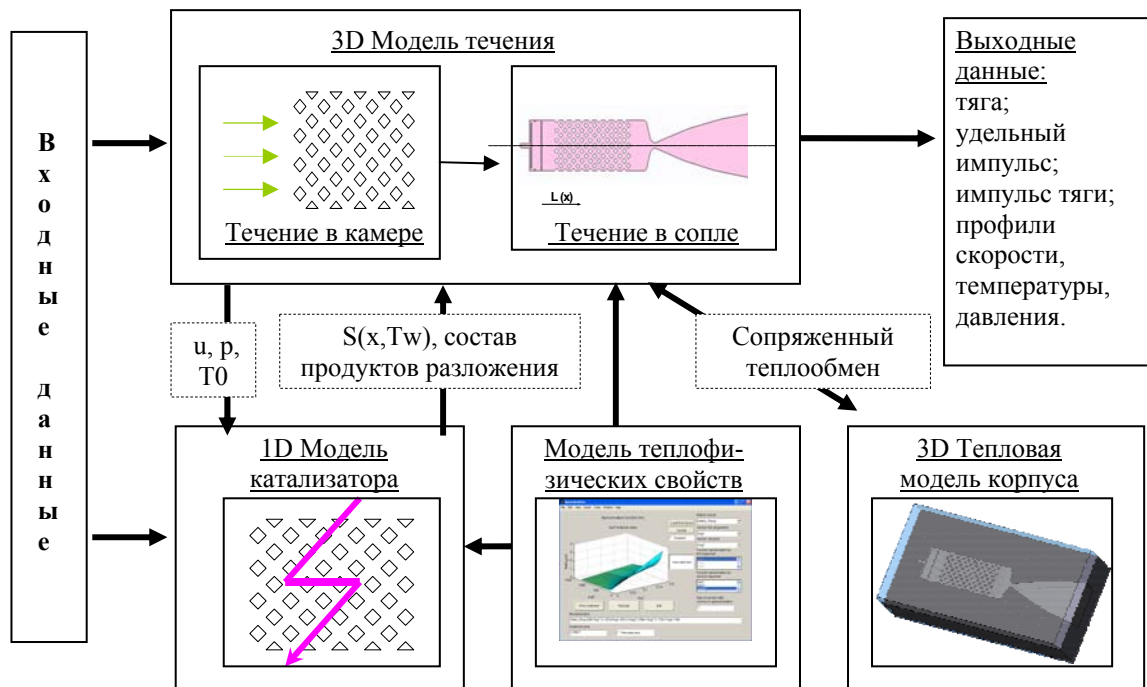


Рис. 4. Структура математической модели

Уравнения, описывающие нестационарное течение вязкой сжимаемой среды, в векторном виде имеют вид:

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0, \quad (4)$$

- уравнение движения

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \tau; \quad (5)$$

где $\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right)$ - тензор напряжения, U - вектор скорости,

\otimes - тензорное умножение, p - давление, δ - единичная матрица.

- уравнение энергии

$$\frac{\partial (\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U i) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{\partial p}{\partial t} + U \cdot \nabla p + \Phi + S; \quad (6)$$

где i - удельная энтальпия, Φ - диссипативная функция, учитывающая работу сил трения, S - источниковый член.

Для замыкания этой системы используется уравнение состояния:

$$p = \rho R T. \quad (7)$$

Распределение температуры в корпусе ЧИПа микро-ЖРД находится из решения нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (8)$$

где c и λ - удельная теплоемкость и теплопроводность ЧИПа.

На поверхности контакта областей из разнородных материалов выполняются условия теплового сопряжения:

$$\begin{cases} T^- = T^+ \\ q^- = q^+ \end{cases}. \quad (9)$$

Тепловое излучение корпуса вычисляется на основе закона Стефана-Больцмана:

$$q = \varepsilon C_0 (T/100)^4, \quad (10)$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, $\varepsilon = 0 \div 1$ - относительная излучательная способность тела.

Лучистый теплообмен газа в стенке ЧИПа составляет менее 0,1% от конвективного теплообмена и его можно не учитывать.

Система уравнений (4)-(8) решается численно методом конечных элементов в программном комплексе CFD, в качестве альтернативного подхода к решению приводится метод конечных объемов и алгоритм SIMPLE. Для решения системы используются следующие граничные условия (рис. 5):

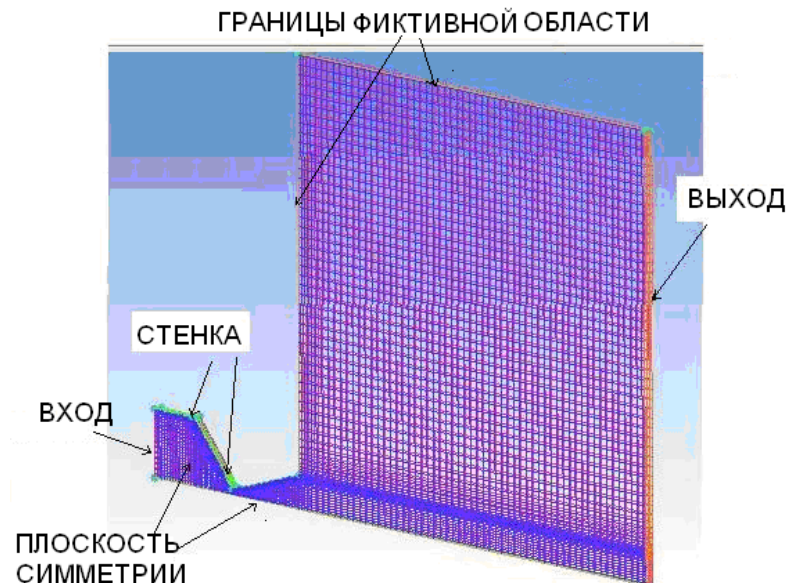


Рис. 5. Пример сетки сопла с обозначенными границами

- на входе задаются температура, а также массовый расход или давление;
- на плоскости симметрии граничные условия формулируются из условия симметрии течения;
- на стенке принимаются граничные условия первого рода (прилипания и непротекания) для компонент вектора скорости и задается температура или тепловой поток для уравнений энергии и теплопроводности;
- на выходе для дозвукового потока задается давление, а для сверхзвукового потока ставятся «мягкие граничные условия (к физической области добавляется некоторая фиктивная область и предполагается, что на выходе из фиктивной области течение является полностью развитым).

- на границах фиктивной области задаются температура и давление окружающей среды.

В качестве начальных условий при расчетах системы уравнений (4)-(8) компоненты вектора скорости принимались равными нулю, а температура и давление в камере двигателя берутся равными температуре и давлению окружающей среды.

В третьей главе настоящей работы рассматриваются процессы теплообмена в каналах каталитического микрореактора при разложении монотоплива. Предполагается, что на входе в реактор гидразин будет находиться в виде двухфазного потока с температурой, близкой к температуре стенки. Процессы в каталитическом реакторе микро-ЖРД имеют ряд особенностей. Первое, большое отношение «поверхность-объем» вызывает увеличения тепловых потерь через стенки двигателя. Второе, уменьшение эквивалентного диаметра микроканала при постоянном значении критерия Шервуда

$$Sh = \frac{\beta \cdot d_e}{D}, \quad (11)$$

приводит к возрастанию коэффициента массообмена между топливом в микроканалах камеры и пристеночной областью и интенсивному выносу всех капель топлива на поверхность катализатора.

Каталитический реактор представляется в виде системы извилистых микроканалов, по которым протекает реагирующая среда, влиянием перетечек между каналами пренебрегаем.

Для упрощения математического описания реактора решается задача распределения температуры вдоль единичного канала реактора.

Разложение гидразина на катализаторе и в объеме рассматривается как реакция первого порядка:

$$\frac{dC}{dt} = -K_V \cdot C, \quad (12)$$

где C - концентрация гидразина в области разложения, K_V - кинетический коэффициент реакции разложения гидразина.

Схема процессов происходящих в камере, представлена на рис. 6.

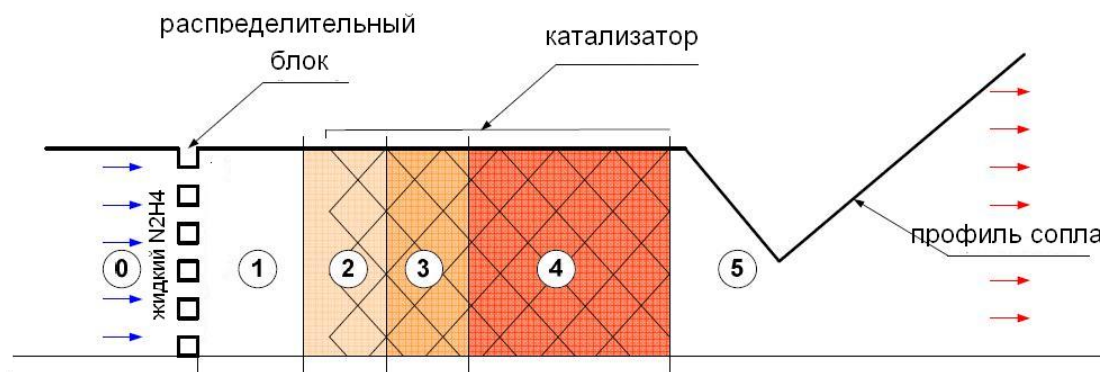
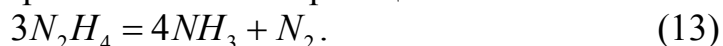


Рис. 6. Тепловые режимы

- 0- жидкий гидразин; 1 - смесь жидкого и газообразного гидразина;
- 2 - каталитическое разложение + испарение гидразина;
- 3 - пары гидразина + каталитическое разложение;
- 4 - пары гидразина + каталитическое разложение + термическое разложение;
- 5 - продукты разложения

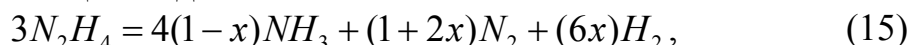
Разложение гидразина может происходить по нескольким схемам. Термодинамически наиболее благоприятной является реакция:



Теплота, выделяющаяся при разложении 1 кг жидкого гидразина, равна $H_{NET} = 3502$ кДж/кг. В свою очередь, аммиак, попадая на катализатор, разлагается в соответствии с реакцией:

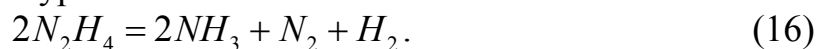


В отличие от реакции (13), эта реакция эндотермическая, к тому же наличие водорода в продуктах реакции тормозит разложение аммиака. Реакцию разложения гидразина в общем виде можно записать так:



где x – степень разложения аммиака (доля водорода).

При температурах выше 650 К реакция (термическое разложение), как правило, идёт в соответствии с уравнением:



В ходе этой реакции разложения выделяется несколько меньше тепла, чем при реакции (13). С учётом, что теплота образования азота и водорода равна нулю, количество выделяющегося тепла $H_{НОМ} = 3021$ кДж/кг.

Реализация тех или иных цепочек химических реакций разложения гидразина в реакторе микро-ЖРД предопределяет различные скорости реакций и её суммарный тепловой эффект. В работе (*Kesten A.S. Analytical Study of Catalytic Reactors for Hydrazine Decomposition // United Aircraft Research Laboratories. Report F910461-12. Contract №NASA-458. 1967. P. 1-225*) указано, что в объеме, заполненном гранулами катализатора “SHELL – 405”, кинетический коэффициент определяется уравнением Аррениуса:

$$K_V = 10^{10} \exp\left(\frac{-11550}{R \cdot T_w}\right), \quad (17)$$

где T_w – температура поверхности катализатора. Данные значения характеризуют “SHELL – 405” как исключительно активный катализатор. От кинетического коэффициента в единице объёма можно перейти к коэффициенту на единицу поверхности K_S :

$$\frac{dC}{dt} = -K_S \cdot S_\Sigma \cdot C, \quad (18)$$

где S_Σ - площадь активной поверхности катализатора на единицу его объёма.

Величина диффузионного потока, падающего на поверхность катализатора, определяется выражением:

$$j_D = \frac{K_S \cdot \beta}{(K_S + \beta)} \cdot C. \quad (19)$$

Если кинетический коэффициент реакции много больше коэффициента массообмена β , то такой режим протекания химических реакций называется диффузионным, реальная скорость химической реакции определяется скоростью диффузии активного реагента к каталитической поверхности.

$$j_D \approx \beta \cdot C. \quad (20)$$

При принятых допущениях тепловые процессы в канале можно считать квазистационарными, и баланс тепла газа на участке канала длиной Δx будет следующим:

$$(c_{pV} \cdot \dot{m}_V + c_{pPr} \cdot \dot{m}_{Pr}) \cdot \frac{dT}{dx} = H_{HEТ} \cdot j_D \cdot \Pi + H_{НОМ} \cdot K_0 \cdot C \cdot F - q_C \cdot \Pi, \quad (21)$$

где c_{pV} , c_{pPr} - теплоёмкости паров гидразина и продуктов его разложения; Π , F - периметр и площадь канала; q_C - удельный тепловой поток в стенки канала.

Реакция разложения топлива ведет к уменьшению массового расхода его паров \dot{m}_V . Этот процесс описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\dot{m}_V}{dx} = -j_D \cdot \Pi - K_0 \cdot C \cdot F. \quad (22)$$

Соответствующее увеличение расхода продуктов реакции \dot{m}_{Pr} будет описываться тем же уравнением, но с положительными знаками в правой части, чтобы выполнялось условие постоянства расхода в канале каталитического микрореактора:

$$\dot{m}_\Sigma = \dot{m}_V + \dot{m}_{Pr} = const. \quad (23)$$

При расчете режима нагревания двухфазной среды использовались следующие уравнения:

$$(C_{pL} \cdot \dot{m}_L + C_{pV} \cdot \dot{m}_V + C_{pPr} \cdot \dot{m}_{Pr}) \cdot \frac{dT}{dx} = H_{HEТ} \cdot (j_{add} \cdot \varphi + j_D) \cdot \Pi - q_C \cdot \Pi; \quad (24)$$

$$\frac{d\dot{m}_L}{dx} = -j_{add} \cdot \Pi \cdot \varphi \quad (25)$$

$$\frac{d\dot{m}_V}{dx} = -j_D \cdot \Pi; \quad (26)$$

$$\dot{m}_\Sigma = \dot{m}_L + \dot{m}_V + \dot{m}_{Pr} = const, \quad (27)$$

где c_{pL} , \dot{m}_L - теплоёмкость и расход жидкого гидразина, $j_{add} = \beta \cdot C_L$ - диффузионный поток жидкого гидразина, φ - доля тепла, выделяющаяся в жидкой фазе.

Для системы уравнений (24)-(27) давление и температура на входе берутся из решения системы уравнений течения вязкой сжимаемой среды (см. рис. 4) при заданной температуре поверхности катализатора.

Из-за того, что данная система относится к классу «жестких» дифференциальных уравнений, метод «прогноза – коррекции», который применялся для решения, дополнялся процедурой выбора переменного шага интегрирования в зависимости от величины подынтегральной функции. Для коррекции полученного решения использовалось условие сохранения баланса тепла в канале при одновременном соблюдении сохранения баланса секундных расходов.

Для решения уравнений математической модели необходимо знать значения теплофизических свойств газовой смеси в зависимости от

температуры и давления. Для этого разработаны алгоритм и программа аппроксимации, которые позволяют получить аналитические зависимости свойств по табличным данным. Были получены аналитические выражения динамической вязкости, удельной теплоемкости и теплопроводности аммиака, азота и водорода для давления 10^{-4} -0,3 МПа и температуры 100-1800 К. Максимальная относительная погрешность этих выражений с табличными данными не превышает 3%. Отметим, что такие зависимости удобно использовать в современных программных комплексах CFD.

Четвертая глава посвящена моделированию и расчету параметров рабочих процессов в распределительном блоке, микроканале, каталитическом реакторе и сопле микро-ЖРД.

Расчет поля скоростей в распределительном блоке с глубиной трактов 150 мкм проводился при подаче жидкого гидразина с расходом 1,552 мг/с. Схема распределительного блока показана на рис. 7.

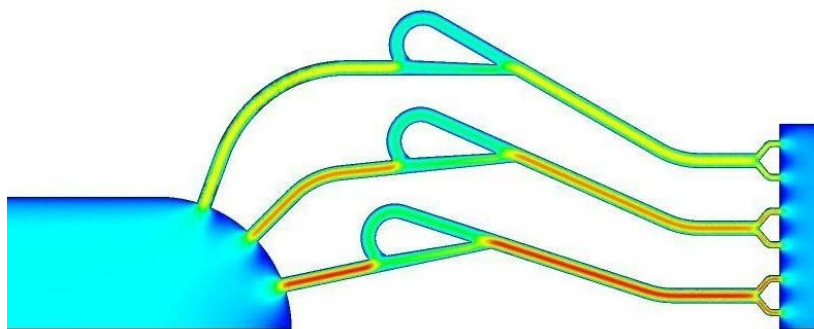


Рис. 7. Схема распределительного блока

Конструкция распределительного блока выбрана таким образом, чтобы увеличить гидравлическое сопротивление обратным потокам из каталитического реактора после окончания подачи топлива в импульсном режиме.

Расчеты показали, что на входе в распределительный блок скорость гидразина составляет 0,02 м/с, в средней части – 0,05 м/с, на выходе – 0,04 м/с.

Как было отмечено ранее, каталитический реактор рассматривается как система однотипных микроканалов. Вообще, микроканал является одним из основных элементов микросистем, в частности микро-ЖРД. Ему уделяется значительное внимание в экспериментальных и теоретических работах.

Рассматривался прямоугольный канал следующих размеров: длина канала $L=3$ мм, ширина 40 мкм, высота $H=1,2$ мкм. Температура газа (азот) и стенок микроканала 314 К, давление на выходе $P_{out}=0,1$ МПа, число Кнудсена на выходе $Kn=0,058$. Эти данные взяты из статьи *S. Roy, R. Raju, H. Chuang et al. Modeling gas flow through microchannels and nanopores. // Journal of applied physics. 15 April, 2003, V. 93, № 8. P. 4870 – 79¹.*

Сравнение результатов расчета с данными из указанной работы приведено на рис. 8. Сравнение производилось для трех значений отношения давлений

$$dP = \frac{P_{in}}{P_{out}}.$$

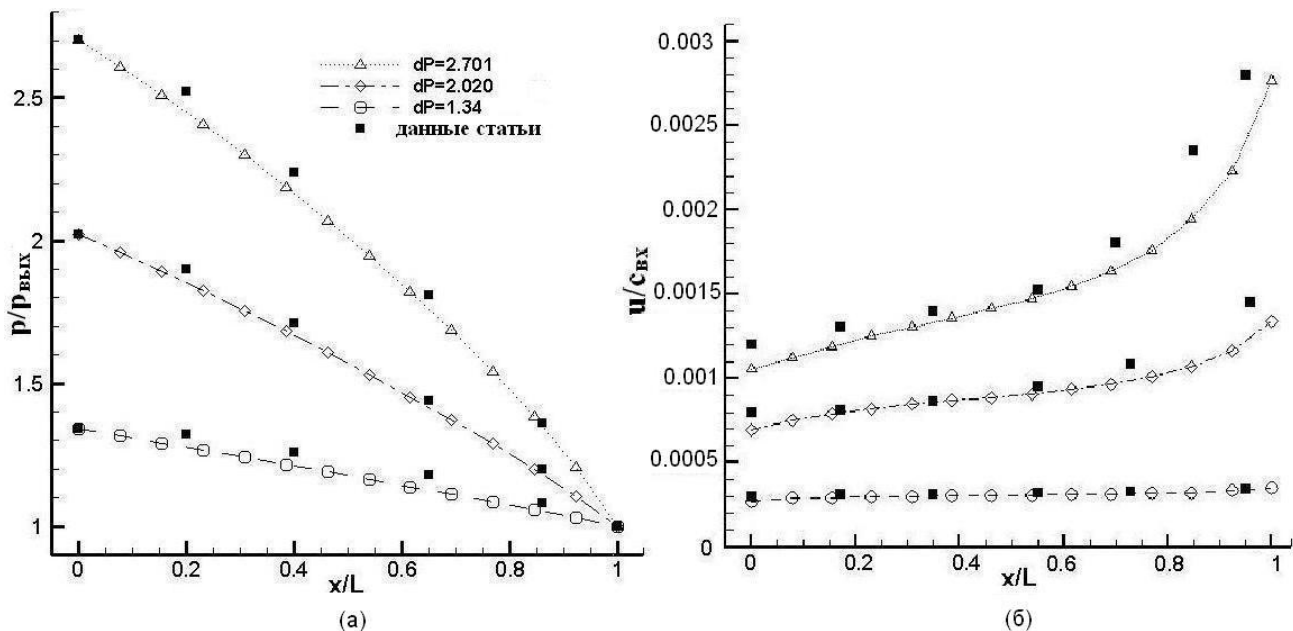


Рис. 8. Распределение безразмерного давления (а) и скорости (б) вдоль оси канала, $c_{in} = 361$ м/с - скорость звука на входе в канал

Из рисунка можно сделать вывод о хорошем совпадении полученных результатов расчета с опубликованными данными. Нелинейный характер распределения давления является следствием сжимаемости газа и молекулярных эффектов.

Были проведены тепловые расчеты канала каталитического реактора, который рассматривался как система, состоящая из 22 криволинейных каналов. Результат расчета канала при температуре стенки 493 К показан на рис. 9. Расход топлива в единичном канале принимался равным 0,142 мг/с, длина канала – 4,3 мм, ширина – 50 мкм, высота - 150 мкм.

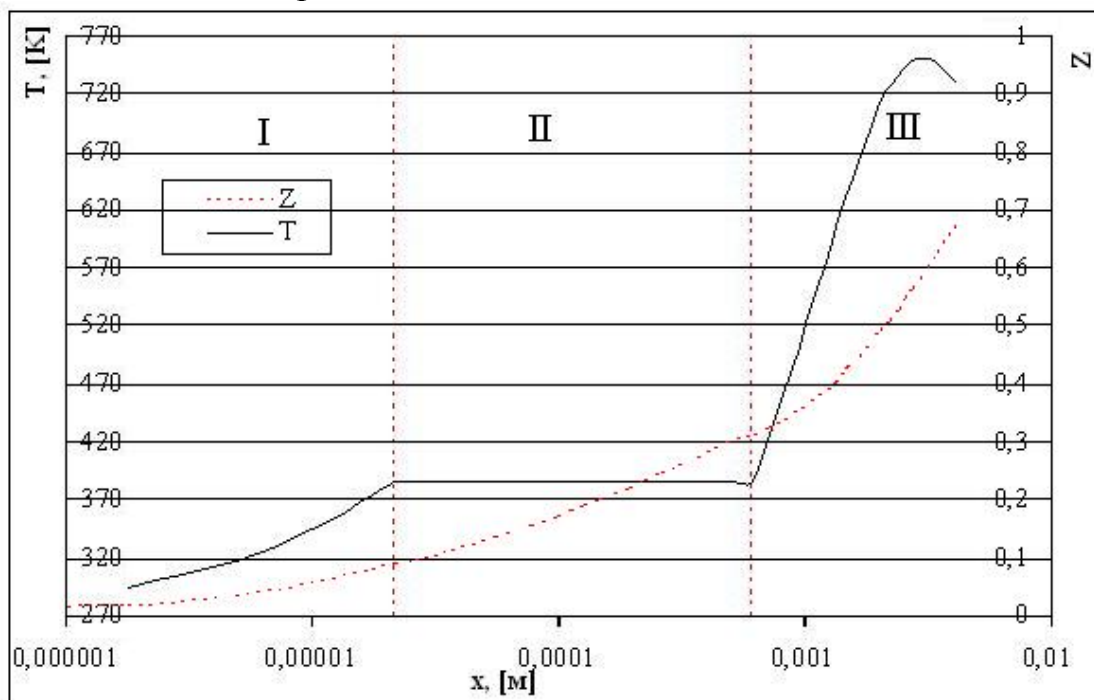


Рис. 9. Распределение степени разложения гидразина $Z = \frac{C_{Pr}}{\rho_{\Sigma}}$ и температуры T по длине канала каталитического реактора

На рис. 9 прослеживаются три тепловых режимных зоны (нагревания двухфазной среды, испарения жидкой фазы, течения однофазной среды).

Первая зона заканчивается тогда, когда температура двухфазной среды достигает температуры кипения. Высокий диффузионный поток капель гидразина на поверхность катализатора является причиной того, что протяженность зон I и II мала. Поэтому длина канала на рис. 9 представлена в логарифмических координатах. Зона III оказывается более протяженной. В ней происходит каталитическое разложение паров гидразина на поверхности катализатора.

Показано, что температура поверхности каталитического реактора оказывает заметное влияние на расположение и величину температурного максимума в канале. Чем меньше температура, тем меньше температурный максимум среды и тем ближе он сдвинут к входу в канал.

Были выполнены варианты тепловые расчёты канала реактора для различных расходов гидразина (1,562, 3,124 и 5,097 мг/с). Наибольшая температура на выходе из реактора получилась при расходе 3,124 мг/с. Это объясняется тем, что при больших расходах разлагается меньшая часть гидразина, а при малых расходах выделяется меньше тепла.

По результатам вариантных расчетов для различных температур стенки при заданном расходе рассчитывается величина эквивалентного тепловыделения $S(x, T_w)$, которая используется при решении уравнения энергии. На заданном участке Δx канала она равна отношению:

$$S(x, T_w) = \frac{Q_V + Q_{SUR}}{\Delta x \cdot F}, \quad (28)$$

где Q_V , Q_{SUR} - тепло, полученное за счет термической и каталитической реакции разложения гидразина на участке Δx , соответственно.

Далее представлены результаты моделирования газодинамических процессов течения в микросопле. Исследовалось два вида плоского сопла: профилированное сопло и непрофилированное сопло с углом раскрытия 50 градусов (рис. 10). Расчеты значений тяги и удельного импульса для второго варианта оказались несколько выше.

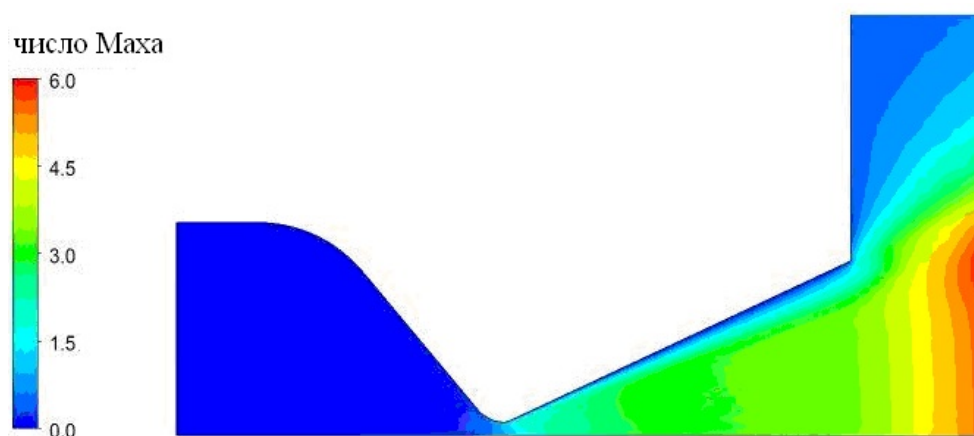


Рис. 10. Распределение числа Маха в сопле для давления на входе 0,3 МПа и температуры 373 К

Отмечено нарастание дозвукового пограничного слоя по длине сопла, которое может приводить к уменьшению числа Маха в сверхзвуковой части сопла. Значение числа Маха на срезе сопла около трех. Было проведено сравнение полученных результатов расчетов течения в микросопле с аналогичными данными, опубликованными в статье *Louisos W.F., Hitt D.L. Optimal expansion angle for viscous supersonic flow in 2-D micro-nozzles. 35th AIAA Fluid dynamics conference and exhibit. 2005*, и получено хорошее совпадение результатов.

Пятая глава диссертационной работы посвящена вариантным расчетам тяги, удельного импульса и других выходных параметров микро-ЖРД.

Тяга P определялась по известной формуле:

$$P = \dot{m}w_a + (p_a - p_H)F_a, \quad (29)$$

где $w_a = \int_{F_a} \rho w dF / \int_{F_a} \rho dF$ – средняя скорость на срезе сопла, \dot{m} – массовый расход, F_a – площадь выходного сечения сопла, p_a и p_H – давления на срезе сопла и окружающей среды, соответственно.

Исследовалось влияние на тягу и удельный импульс температуры и давления газового потока на входе в сопло рис. 11 - 12. Расчёты проводились для двух глубин сопла и двух газов на входе в сопло - азота и продуктов разложения гидразина (при степени диссоциации аммиака $x=0,25$). В качестве граничных условий принимались условия прилипания и адиабатной стенки. Давления на входе 0,1 и 0,3 МПа, давление на выходе и температура окружающей среды 100 Па и 293 К.

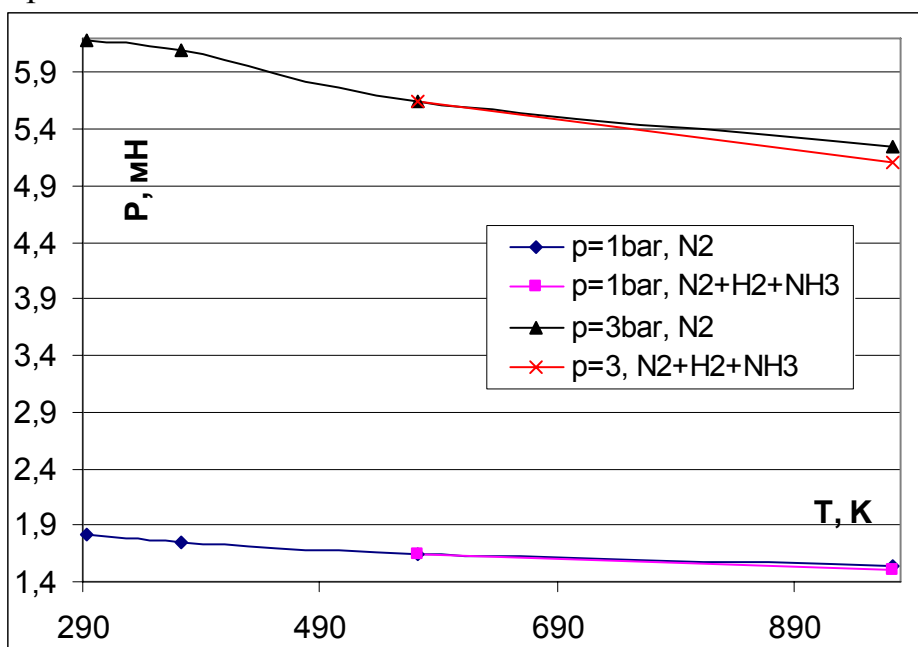


Рис. 11. Зависимость значения тяги от температуры для глубины сопла 150 мкм

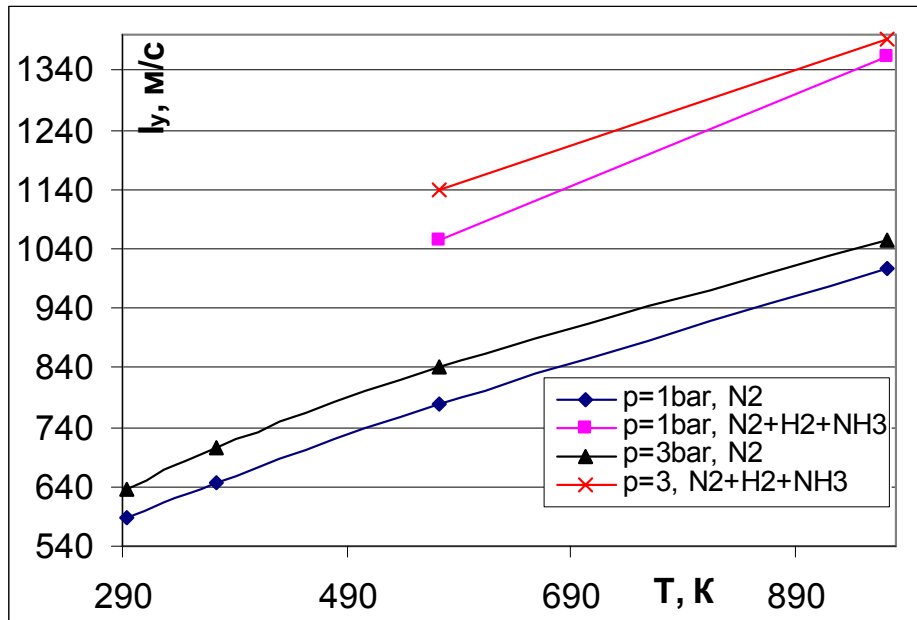


Рис. 12. Зависимость значения удельного импульса от температуры для глубины сопла 150 мкм

Как видно из рис. 11, тяга уменьшается при увеличении температуры газовой смеси. Это объясняется уменьшением её плотности. Удельный импульс увеличивается с повышением температуры и давления, так как скорость течения растёт. Высота плоского сопла мало влияет на удельный импульс, а тяга возрастает с увеличением высоты сопла.

Были проведены расчеты по определению оптимальной длины сверхзвуковой части сопла и угла расширения. Результаты составили порядка 0,43 мм и 50°, соответственно.

Результат расчета изменения тяги микро-ЖРД по времени с учетом теплоотвода в стенки ЧИПа показан на рис. 13. Расход топлива принимался равным 3,124 мг/с. Для расчета использовались две сетки: 1) проточной части, состоящей из 1 505 669 элементов; 2) ЧИПа – 377 658 элементов.

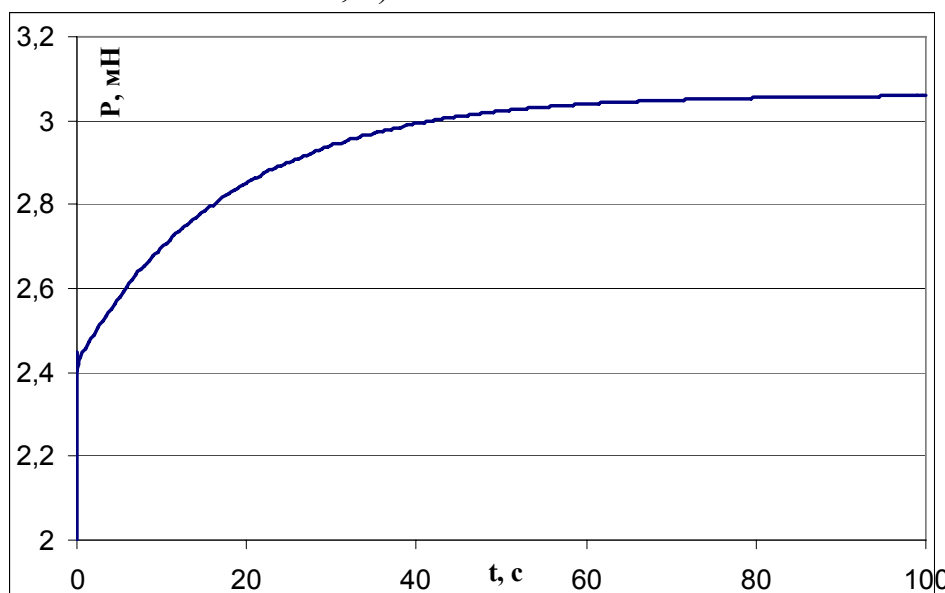


Рис. 13. Изменение тяги микро-ЖРД по времени в стационарном режиме работы

Тяга растет в первые секунды, а после 60 с практически стабилизируется, приближаясь к стационарному значению 3,05 мН. Так как кремний имеет большие значения удельной теплоёмкости и теплопроводности, то ЧИП микро-ЖРД аккумулирует значительное количество тепла, и требуется относительно большое время для установления теплового равновесия. После 100 с работы средняя температура поверхности каталитического реактора составила 515 К.

Изменения выходных параметров микро-ЖРД в импульсном режиме работы показаны на рис. 14 – 15. Время включения, время выключения принималось равным 0,1 с.

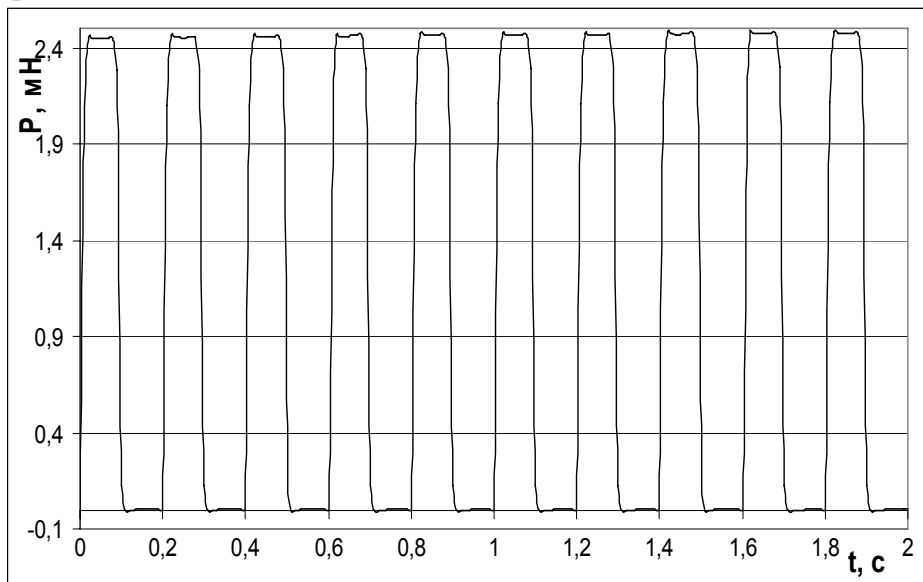


Рис. 14. Изменение значения тяги в течение 10 импульсов

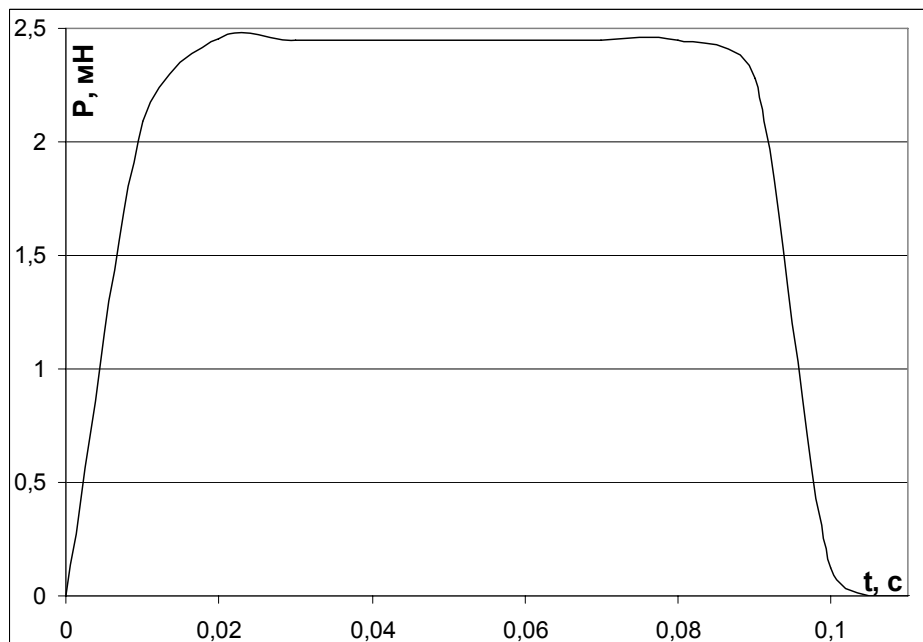


Рис. 15. Изменение значения тяги в течение одного импульса

На рис. 14 видно, что максимальная тяга практически не меняется в течение 10 импульсов. На рис. 15 через 0,02 с виден небольшой скачок тяги после начала подачи топлива. Можно отметить, что значение тяги более плавно изменяется при подходе к своему максимальному значению, чем величина

расхода топлива. На рис. 16 показано изменение удельного импульса в течение 10 рабочих импульсов.

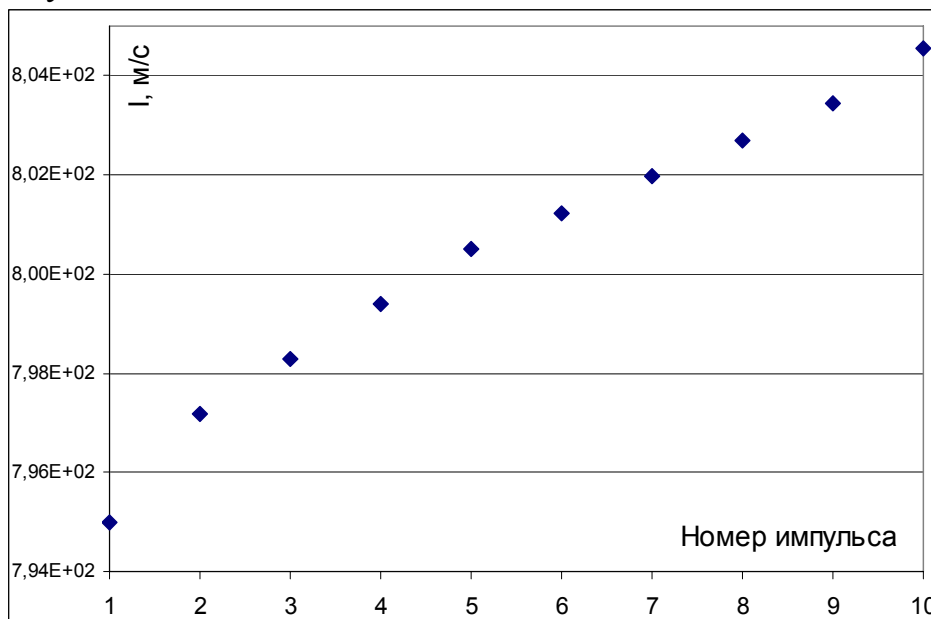


Рис. 16. Изменение значения удельного импульса для десяти пусков

На рис. 16 наблюдается тенденция небольшого роста удельного импульса со временем. При этом импульс тяги для первого и десятого пусков составили 0,216 и 0,219 мН·с, соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель процессов преобразования монотоплива (гидразина) в конечные газообразные продукты в трактах каталитического реактора, имеющих поперечные размеры в несколько десятков микрометров. По результатам расчетов показана интенсификация тепло- и массообмена в условиях микро размеров и введена функция эквивалентного тепловыделения в канале, что позволяет использовать результаты расчета реактора при моделировании теплообмена в ЧИПе микродвигателя.

2. Разработаны гидро – и газодинамические модели процессов течения в элементах камеры микро-ЖРД. Проведены расчеты распределения давления и скорости газов в микроканале. Показано совпадение результатов этих расчетов с опубликованными данными и обосновано применение уравнений модели с граничными условиями «непроскальзывания» на стенках для числа $Kn < 0,058$.

3. Созданы обобщенная модель рабочих процессов в микро-ЖРД на однокомпонентном топливе и алгоритм её решения. Даны рекомендации по конструкции и режимным параметрам микродвигателя: расход топлива – 3,124 мг/с для глубины камеры двигателя 150 мкм; геометрия предреакторного пространства; профиль и геометрия сопла - непрофилированное сопло с длиной сверхзвуковой части 0,43 мм и углом раскрытия 50 градусов; температура стенок ЧИПа микро-ЖРД – 515 К.

4. Для микро-ЖРД с критическим сечением 95×105 мкм при значениях давления в камере двигателя 0,1 – 0,3 МПа и температуры 293 - 973 К рассчитаны значения тяги и удельного импульса, которые составили 0,6 – 6,1 мН и 550 - 1350 м/с, соответственно. Проведено сопоставление

результатов распределения скорости газового потока в микросопле Лавалья с опубликованными данными и получено хорошее соответствие.

5. Разработаны алгоритм и программа аппроксимации теплофизических свойств компонентов газовой смеси (аммиака, азота и водорода) по давлению и температуре в диапазоне от 10^{-4} до 0,3 МПа и от 100 до 1800 К, соответственно, что позволяет получать по табличным данным аналитические зависимости.

6. Разработанная методика математического моделирования и результаты расчетов, выполненных в настоящей диссертационной работе, использованы в рамках совместного проекта с фирмой «Astrium GmbH» и могут быть применены в качестве инструмента для оптимизации выходных характеристик при создании опытного образца микро-ЖРД и для сокращения времени на отработку микродвигателей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в журналах перечня ВАК

1. Коломенцев А.И., Захаров С.А., Якутин А.В. Математическая модель расчета теплофизических свойств газовой смеси // Вестник МАИ. М.: Изд-во МАИ, 2007. – т. 14, №3. С. 41-47.
2. Коломенцев А.И., Якутин А.В. Двигательные установки реактивных систем управления малоразмерных космических аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. М.: Изд-во «Научтехлитиздат», 2008. № 1. С. 51-56.
3. Коломенцев А.И., Якутин А.В. Исследование рабочих процессов жидкостных ракетных микродвигателей созданных на базе МЭМС технологий // Вестник МАИ. М.: Изд-во МАИ, 2010. – т. 17, № 4. С. 90-95.
4. Коломенцев А.И., Байков А.В., Мартыненко С.И., Якутин А.В., Яновский Л.С., Теличкин Д.С., Цыгенхаген Ш. Проблема разработки микродвигательных установок // Известия вузов. Авиационная техника. Казань: Изд-во КГТУ, 2010. № 2. С. 53-55.

Публикации в других изданиях

5. Коломенцев А.И., Якутин А.В. Двигательные установки реактивных систем управления малоразмерных космических аппаратов // Труды Российско-Китайской международной конференции по проектированию аэрокосмической техники. М.: Изд-во «Информиздат», 2007, с. 70-75.
6. Kolomentsev A.I., Telitshkin D.S., Yakutin A.V. Features and numerical analysis of working processes in microthruster // International Symposium on Space Propulsion (ISSP2007), 8 – 12 October 2007, Beijing, China. P. 171-176.

7. *Якутин А.В., Коломенцев А.И.* Моделирование процессов в микро-ЖРД на унитарном топливе // Сборник тезисов Всероссийской конференции молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной технике – 2008», 21-24 апреля 2008 г., Москва – М. МАИ-ПРИНТ, 2008. С. 109-110.
8. *Якутин А.В., Коломенцев А.И.* Моделирование процессов микро-ЖРД // Сборник трудов Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», 25-27 ноября, 2008г., Москва – М.: МГТУ им. Баумана, 2008. С. 229-230.
9. *Якутин А.В., Коломенцев А.И.* Математическая модель канала реактора микро-ЖРД на унитарном топливе // Обеспечение качества на всех этапах жизненного цикла изделий / под. ред. проф. Ю.Ю. Комарова. – М.: Изд-во МАИ, 2008. С. 360-366.
10. *Якутин А.В., Коломенцев А.И.* Особенности рабочих процессов в микро-ЖРД // Труды XXXIII академических чтений по космонавтике «Актуальные проблемы Российской космонавтики». М. 26-30 января 2009 г.
11. *Якутин А.В., Коломенцев А.И.,* Математическая модель микро-ЖРД для наноспутников // Сборник тезисов XII Международной молодежной научно - практической конференции «Человек и Космос», 7-9 апреля 2010 г., Днепропетровск - Днепропетровск: 2010. С. 116
12. *Якутин А.В., Коломенцев А.И.* Моделирование внутрикамерных процессов в энергоустановках многократного использования // Материалы XXII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», 17-19 мая 2010 г., Казань: КВВКУ, 2010. С. 92-93.