

**На правах рукописи**



**КОЧЕТКОВ АНДРЕЙ ОЛЕГОВИЧ**

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГОСОПЛОВОГО РДТТ  
С НЕКРУГЛЫМИ СОПЛАМИ**

**Специальность: 05.07.05 – тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Казань 2011**

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева и ОАО «Казанское ОКБ «Союз»

- Научный руководитель - доктор технических наук  
Н.И. Михеев
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
В.Г.Крюков
- кандидат технических наук  
Филиппов С.В.
- Ведущая организация - ОАО «ОКБ «Новатор»

Защита состоится “20” апреля 2011г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.079.02 при Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева по адресу: 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ им.А.Н.Туполева.  
Электронный вариант автореферата размещен на сайте Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева ([www.kai.ru](http://www.kai.ru)).

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2011г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



А.Г. Каримова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Одним из наиболее перспективных направлений повышения энергоэффективности ракет, эксплуатирующихся во внутриатмосферной зоне, является комбинированное применение экономичного прямоточного воздушно–реактивного двигателя, работающего на маршевом режиме, и ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ), используемого в качестве стартового ускорителя. Рациональным схемным решением в таком летательном аппарате является размещение ускорителя в камере маршевого двигателя, и на конструкцию РДТТ в таком случае накладываются жесткие ограничения не по массе, а по габаритам.

Наиболее перспективным подходом, позволяющим решить проблему повышения энергоэффективности двигателя при жестких габаритных ограничениях, является увеличение объема топлива путем удлинения камеры сгорания за счет уменьшения длины сопла. При его практической реализации могут быть применены различные формы сопел: кольцевые, раздвижные сопла и многосопловые блоки. Наиболее эффективным решением проблемы для данного класса двигателей является применение многосопловых блоков.

Стартовые ускорители ракет обычно работают с недорасширением продуктов сгорания в сопле. Именно уменьшение реализуемой степени расширения сопла является основной причиной снижения удельного импульса тяги при использовании классического многосоплового блока, состоящего из нескольких круглых сопел. Для повышения степени расширения целесообразно использовать сопла с некруглыми сечениями на срезе, которые бы плотно компоновались в общий блок в пределах располагаемого миделя ракеты. Этому условию отвечают сопла, имеющие на срезе форму кольцевого сектора со скругленными углами. Однако в настоящее время нет отработанных методов профилирования некруглых сопел и оценки потерь удельного импульса тяги в них.

Таким образом, проблема повышения энергоэффективности стартовых РДТТ на основе использования многосоплового блока с некруглыми соплами и связанные с ней задачи профилирования такого сопла и оценки его характеристик являются в настоящее время весьма актуальными.

Цель работы. Повышение энергоэффективности стартовых ускорителей ракет при жестких габаритных ограничениях.

Задачи исследования.

1. Выбор рационального критерия энергоэффективности стартовых ускорителей ракет применительно к условиям жестких ограничений на габариты ускорителя.

2. Развитие современных методов профилирования и оценки потерь удельного импульса тяги, нашедших применение для осесимметричных

сопел, с целью их распространения на схему многосоплового блока РДТТ с некруглыми соплами и двухфазными продуктами сгорания.

3. Подтверждение численным моделированием с использованием пакета FlowVision и физическим экспериментом эффективности предлагаемой методики профилирования в части обеспечения течения двухфазных продуктов сгорания по тракту некруглого сопла без заметного выпадения частиц конденсированной фазы на стенку.

4. Обоснование повышения энергоэффективности многосоплового стартового РДТТ с некруглыми соплами по сравнению с ускорителями, выполненными по классическим схемам, в интересном для практики диапазоне габаритных ограничений.

#### Научная новизна.

1. Разработан и апробирован на модельном двигателе метод профилирования многосоплового блока РДТТ с некруглыми соплами и оценки потерь импульса в нем для двухфазных продуктов сгорания.

2. На базе моделирования движения конденсата в некруглом сопле с различной степенью расширения и степенью некруглости определены области параметров, в которых предложенный метод профилирования обеспечивает течение двухфазных продуктов сгорания по тракту некруглого сопла без заметного выпадения частиц конденсированной фазы на стенку.

3. Проведена сравнительная оценка энергетических характеристик традиционных стартовых РДТТ с ускорителями, выполненными по многосопловой схеме с некруглыми соплами. Показан значительный прирост энергоэффективности двигателя благодаря применению предлагаемой схемы.

#### Личный вклад автора.

Основные научные положения и результаты, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации, получены автором лично. Идея повышения эффективности стартовых РДТТ за счет применения многосопловых блоков с некруглыми соплами принадлежит научному руководителю д.т.н. Н.И.Михееву.

#### Автор защищает:

1. Метод профилирования проточной части многосоплового блока с некруглыми соплами.

2. Метод оценки потерь суммарного импульса тяги многосоплового блока с некруглыми соплами.

3. Результаты оценки эффективности многосопловой схемы ускорителя с некруглыми соплами.

4. Результаты численного моделирования движения частиц конденсированной фазы по тракту сопел с различной степенью некруглости их сверхзвуковой части.

5. Характеристики многосоплового блока с некруглыми соплами по результатам огневых стендовых испытаний на модельном РДТТ.

#### Практическая ценность и реализация результатов диссертации.

Полученные в ходе исследования результаты и выработанные на их основе рекомендации позволяют:

- профилировать контур многосоплового блока РДТТ с некруглыми соплами, обеспечивающий течение двухфазных продуктов сгорания по тракту без заметного выпадения частиц конденсированной фазы на стенку, и выполнять его оптимизацию с учетом основных составляющих потерь удельного импульса тяги;

- установить влияние геометрических характеристик некруглого сопла и среднемассовых размеров частиц конденсированной фазы на картину распределения концентрации в расчетной области некруглого сопла;

- значительно увеличить энергоэффективность стартового РДТТ в интересном для практики диапазоне габаритных ограничений.

Ряд результатов работы использованы в отчетах по гранту Президента РФ НШ-4334.2008.8, по контрактам с ФАНИ (02.740.11.0071, 02.518.11.7101). Основные положения и результаты диссертационной работы использовались ОАО «Казанское ОКБ «Союз» при разработке современных образцов военной техники.

Рекомендации по использованию результатов. Основные результаты работы могут быть использованы при проектировании РДТТ, на габариты которых накладываются жесткие ограничения, в том числе используемых в качестве стартовых ускорителей ракет, эксплуатирующихся во внутриатмосферной зоне.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методов численного моделирования и их тестированием, применением стандартных методик испытаний, аттестованных и поверенных средств измерения, удовлетворительной сходимостью расчетных оценок с результатами огневых стендовых испытаний.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VI школе–семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Казань, 2008 г.; 7-ой и 8-ой международных конференциях «Авиация и космонавтика», МАИ, Москва, 2008 г. и 2009 г.; XVII школе–семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях», ЦАГИ, Жуковский, 2009 г.; XXI 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», КВВКУ, Казань, 2009 г.; V Всероссийской научно–технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики», КГТУ им. Туполева, Казань, 2009 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ. Две работы опубликованы в рекомендуемых ВАК журналах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации 113 стр., в том числе 46 рисунков расположенных по тексту, а также список литературы, включающий 103 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, перечислены основные положения, которые выносятся на защиту, показан личный вклад соискателя в приведенные в диссертации результаты.

В первой главе дается аналитический обзор опубликованных работ по методам оптимизации энергетических характеристик ракетных двигателей на твердом топливе.

Определены критерии энергоэффективности стартовых РДТТ, применяемые при проектировании. Представлены наиболее перспективные направления увеличения энергоотдачи в условиях жестких габаритных ограничений. Показана целесообразность отступления от сопел, обеспечивающих наибольший удельный импульс тяги, в сторону более коротких сопел. При этом эффективность двигателя возрастает, так как значительно увеличивается масса топлива.

Дается краткий обзор применяемых схем осесимметричных сопел. Подробно рассмотрены основные составляющие сопловых потерь удельного импульса тяги. Выполнен анализ методов оценки этих потерь и особенностей физических процессов, лежащих в основе их возникновения.

Приведен краткий обзор методов профилирования осесимметричных сопел для идеального газа и для двухфазных продуктов сгорания РДТТ. Отмечается, что одной из важных задач для сопел РДТТ является обеспечение течения двухфазных продуктов сгорания без выпадения частиц конденсированной фазы на стенку сверхзвуковой части сопла. Важный вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований этого направления внесли А.М.Губертов, В.В.Миронов, Д.М.Борисов, Ю.М. Кочетков и др.

На основе проведенного обзора показано, что для однофазного потока близкими к оптимальным являются укороченные контуры из семейства с равномерной выходной характеристикой и угловой точкой или спрофилированные по промежуточным линиям тока. Эти же контуры сопел близки к оптимальным и для двухфазного течения в случае отсутствия заметного осаждения частиц на стенку сопла. Проведен анализ современных методов профилирования осесимметричных сопел РДТТ.

Рассмотрены современные методы компьютерного моделирования трехмерных течений и параметров потока по тракту сопел с учетом двухфазности. Отмечается, что численное моделирование является одним из

наиболее перспективных инструментов поиска оптимального профиля, обеспечивающего наивысшие показатели функционирования сопла.

Дан анализ преимуществ и недостатков многосопловых РДТТ. Приведены примеры практического применения такой схемы в ракетах различного назначения как отечественного, так и зарубежного производства.

В целом на основе обзора литературы констатируется, что в настоящее время наиболее отработаны методы профилирования и оценки основных составляющих потерь импульса для осесимметричных сопел. Для некруглых сопел такие методы практически отсутствуют. Не решена задача предотвращения выпадения частиц конденсированной фазы на стенку некруглого сопла. Нет четких представлений, при каких условиях достигается преимущество двигателя с многосопловым блоком перед традиционной схемой.

На основе проведенного анализа литературы сформулированы цель и задачи настоящего исследования.

Во второй главе изложены предложенные подходы к профилированию многосоплового блока РДТТ с некруглыми соплами и оценке потерь импульса тяги в нем. Рассмотрены особенности применения методов численного моделирования течения двухфазных продуктов сгорания в некруглых соплах. Дано описание оборудования для стендовых испытаний модельного РДТТ.

В составе продуктов сгорания современных твердых топлив содержится высокая доля конденсированной фазы, выпадение которой на стенку сопла недопустимо. В соплах, спроектированных для равновесного течения, на концевых участках происходит выпадение частиц конденсата. С целью исключения этого нежелательного явления, конечный участок раструба сопла может быть отогнут таким образом, чтобы стенка на этом участке была параллельна предельной траектории движения.

Методы построения контура сверхзвуковой части круглого сопла, исключающего осаждение конденсированной фазы на его концевую часть, хорошо развиты и прошли широкую апробацию. Применяют как численные, так и аналитические методы. При оптимизации профиля сопла для неравновесного многофазного течения необходимо учитывать, что образующая сопла должна находиться на заданном минимально допустимом расстоянии от предельной траектории. Для однофазного потока близкими к оптимальным являются укороченные контуры из семейства с равномерной выходной характеристикой и угловой точкой или спроектированные по промежуточным линиям тока. Эти же контуры близки к оптимальным и для двухфазного течения в случае отсутствия заметного осаждения частиц на стенку сопла.

Задача профилирования многосоплового блока с некруглыми соплами включает как выбор их формы поперечного сечения на срезе сопла, так и построение профиля сверхзвуковой части единичного некруглого сопла, обеспечивающего отсутствие выпадения частиц конденсированной фазы.

На профиль многосоплового блока с некруглыми соплами накладывается ряд конструктивных и технологических ограничений. Вкладыш в теплонапряженной области минимального сечения сопел должен быть осесимметричным, а общий срез – плоским. При этом оси вкладышей по условиям прочности смещают относительно центра площади среза единичного сопла ближе к оси двигателя, а количество сопел целесообразно увязывать с профилем щелевого или звездообразного твердотопливного заряда двигателя. Показано, что при таких ограничениях рациональной формой поперечного сечения на срезе сопла является кольцевой сектор со скругленными углами (рис.1).

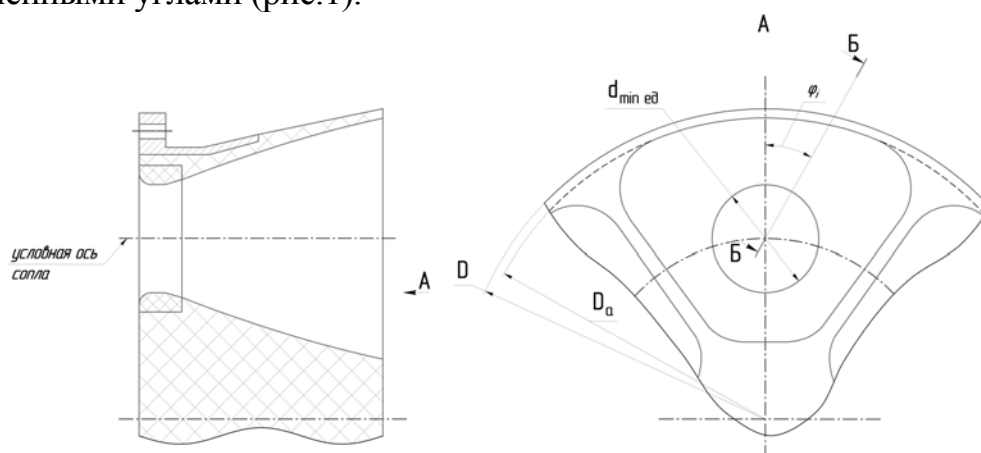


Рис. 1. Схема многосоплового блока с некруглыми соплами

Полагается, что из условий компоновки и оптимизации двигателя определены основные геометрические характеристики соплового блока. Считаются известными также параметры продуктов сгорания твердого топлива на входе в сопло, их термодинамические и теплофизические свойства. Длина сверхзвуковой части сопла обычно оптимизируется, и при построении контура считается известной.

Для схемы многосоплового блока, представленной на рис.1, построение контура сопла выполняется следующим образом. Единичное сопло разбивается на ряд сечений плоскостями Б - Б, проходящими через его условную ось с малым шагом по углу  $\varphi$  в окружном направлении. Полученные сечения являются основой для дальнейшего построения. В каждом из них рассматривается некоторое условное круглое осесимметричное сопло. Диаметр минимального сечения и длина сверхзвуковой части принимаются равными соответствующим размерам единичного некруглого сопла, а радиус среза – равным расстоянию от условной оси в плоскости среза единичного сопла до точки пересечения секущей плоскости с линией профиля выходного сечения единичного сопла. Одной из важных составляющих предложенного метода профилирования является задача выбора расположения условной оси единичного некруглого сопла. Она может быть решена двумя способами (рис.2).



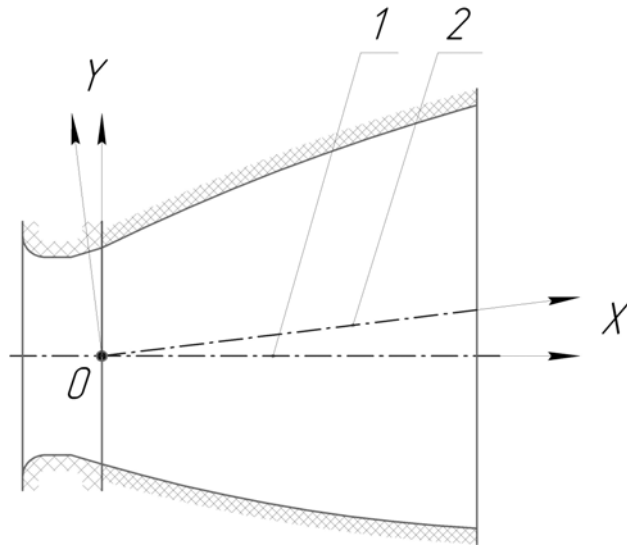


Рис. 2. Схема возможного расположения условной оси

В первом способе в качестве условной оси может быть принята прямая, проходящая через центр минимального сечения вкладыша параллельно оси соплового блока. Во втором способе - прямая, проходящая через центр выходного сечения вкладыша и через центр площади единичного сопла на срезе, либо через точку в плоскости симметрии, для которой разность между минимальным и максимальным относительным радиусом будет наименьшей.

Предложен метод оценки потерь удельного импульса тяги в многосопловом блоке из некруглых сопел, учитывающий специфическое для такого блока несоответствие геометрической и эффективной степени расширения. В стартовых ускорителях ракет при реализации максимально возможной степени расширения сопла и оптимального давления в камере единичные сопла работают, как правило, с недорасширением. В центральной зоне среза многосоплового блока с некруглыми соплами и в зоне перемычек между выходными сечениями единичных сопел образуются замкнутые донные области с повышенным относительно окружающей среды давлением. С учетом этого оценку параметров целесообразно выполнять с использованием эффективной степени уширения сопла  $\overline{d_{a\text{эф}}}$ , определяемой эффективной площадью среза  $F_{a\text{эф}}$ , превышающей геометрическую степень уширения  $\overline{d_a}$ . Площадь  $F_{a\text{эф}}$  определяется по общему диаметру среза соплового блока  $D_a$ , за исключением областей при вершинах перемычек, на которые действует атмосферное давление. Следствием того, что давление в донных областях ниже, чем на срезе единичных сопел, является возникновение дополнительных потерь удельного импульса тяги. Предложен приближенный метод определения величины донных потерь, основанный на количественном сравнении действующих на выделенный участок сверхзвуковой части осевых сил двух условных сопел. Сопла отличаются плавным и ступенчатым изменением контура на участке от  $d_{a\text{ед}}$  до  $d_{a\text{ед.эф}}$  (рис. 3).

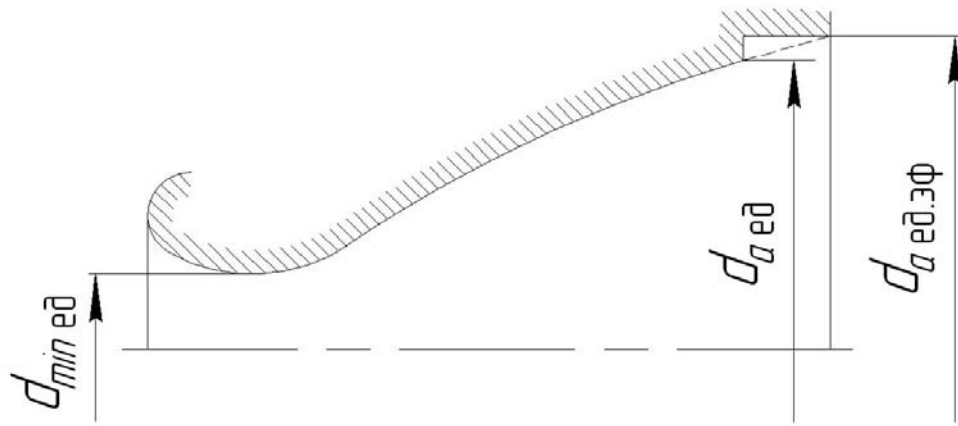


Рис. 3. Форма искажения сверхзвуковой части условного осесимметричного сопла

Искажение сверхзвуковой части условного сопла представлено в виде уступа (рис.3). Такое упрощение позволяет применить классическую модель Корста для определения величины донного давления в зоне внезапного расширения контура сверхзвуковой части сопла.

Сила, действующая на выделенный участок условного сопла без искажения сверхзвуковой части, вычисляется с использованием газодинамической функции  $f(\lambda)$ :

$$\Delta R_1 = p_0 \left[ F_{a \text{ ед.эф}} f(\lambda_{a \text{ ед.эф}}) - F_{a \text{ ед}} f(\lambda_{a \text{ ед}}) \right],$$

где  $p_0$  – давление в камере двигателя. Для сопла с искажением сверхзвуковой части соответствующая сила на том же участке контура:

$$\Delta R_2 = p_2 (F_{a \text{ ед.эф}} - F_{a \text{ ед}}),$$

где  $p_2$  – донное давление.

Донные потери определяются следующим образом:

$$\zeta_{\text{дон}} = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{P} \cdot 100 \%$$

где  $P$  – тяга двигателя.

Другие виды потерь удельного импульса тяги оцениваются на основе подходов, используемых для осесимметричных сопел. С учетом разбивки некруглого сопла по секторам и пропорциональности массового расхода продуктов сгорания доле сектора в площади минимального сечения вкладыша сопла, общие потери для единичного некруглого сопла определяются как

$$\zeta_{\Sigma.ед} = \sum \left( \zeta_{\Sigma i} \cdot \frac{S_i}{S_{\Sigma.ед}} \right),$$

где  $\zeta_{\Sigma.ед}$  – суммарные потери единичного некруглого сопла;  $\zeta_{\Sigma i}$  – суммарные потери эквивалентного осесимметричного сопла для сектора  $i$ ;  $S_i$  – площадь сектора в минимальном сечении сопла;  $S_{\Sigma.ед}$  – суммарная площадь минимального сечения единичного сопла.

Целью моделирования двухфазных продуктов сгорания в тракте единичного некруглого сопла являлось расчетное подтверждение

эффективности предлагаемой методики профилирования в части обеспечения течения без заметного выпадения частиц конденсированной фазы на стенку в интересном для практики диапазоне степеней расширения и некруглости сопла. Использовался отечественный программный комплекс FlowVision (сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU.МЕ20.Н01223). Этот комплекс соответствует всем современным требованиям нормативных документов и может использоваться для расчета гидро- и газодинамических задач в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Маха в произвольных трехмерных областях.

При оценке движения частиц конденсированной фазы использована модель – «полностью сжимаемая жидкость» с дополнительной моделью «частицы» и стандартная  $k-\epsilon$  модель турбулентности. Представлены основные соотношения, описывающие данные модели.

Стендовое оборудование, предназначенное для огневых испытаний (рис. 4), позволяло измерять тягу модельного РДТТ с использованием поверенного тензометрического датчика типа ТПА.

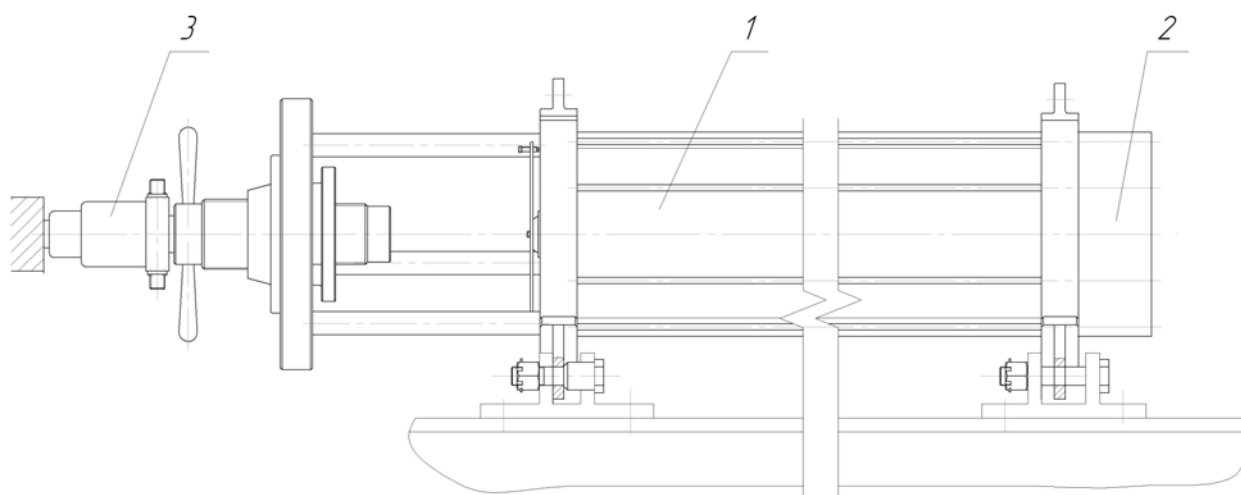


Рис. 4. Схема стендового оборудования для замера тяги модельного РДТТ:  
1 – корпус, 2- сопловой блок, 3 - тензометрический датчик

В третьей главе представлены результаты апробации предложенных методов профилирования и оценки потерь удельного импульса тяги применительно к многосопловому блоку РДТТ с геометрической степенью расширения сопел до 10 и степенью их некруглости до 2. Эффективность методов обоснована численным моделированием течения двухфазных продуктов сгорания в сопле и физическим экспериментом на модельном двигателе. Проведена оценка прироста энергоэффективности стартового ускорителя, выполненного по многосопловой схеме с некруглыми соплами, по сравнению с традиционной схемой.

Для оценки влияния геометрии сопел на их характеристики с использованием предложенного метода профилирования получено семейство контуров сопел различной степени расширения и некруглости. В качестве

предельных значений, определяющих область применимости результатов, приняты геометрическая степень расширения единичного некруглого сопла  $\overline{F}_a = 10$  и степень его некруглости  $\overline{r_{a \max}} / \overline{r_{a \min}} = 2$ . Отмечается, что сопловые блоки с бóльшими значениями приведенных параметров в стартовых ускорителях применять нецелесообразно.

В качестве теста проведено моделирование двухфазного течения продуктов сгорания в осесимметричном сопле, подтвердившее эффективность применения программного комплекса FlowVision для оценки полей концентрации конденсата в соплах РДТТ.

Далее выполнена серия расчетов двухфазного течения продуктов сгорания в многосопловом блоке с некруглыми соплами (рис.5). Местные выборки в зоне перемычек между выходными сечениями единичных сопел, выполненные радиусом  $R$ , служат для снижения концентрации напряжений в стенке на этом теплонапряженном участке.

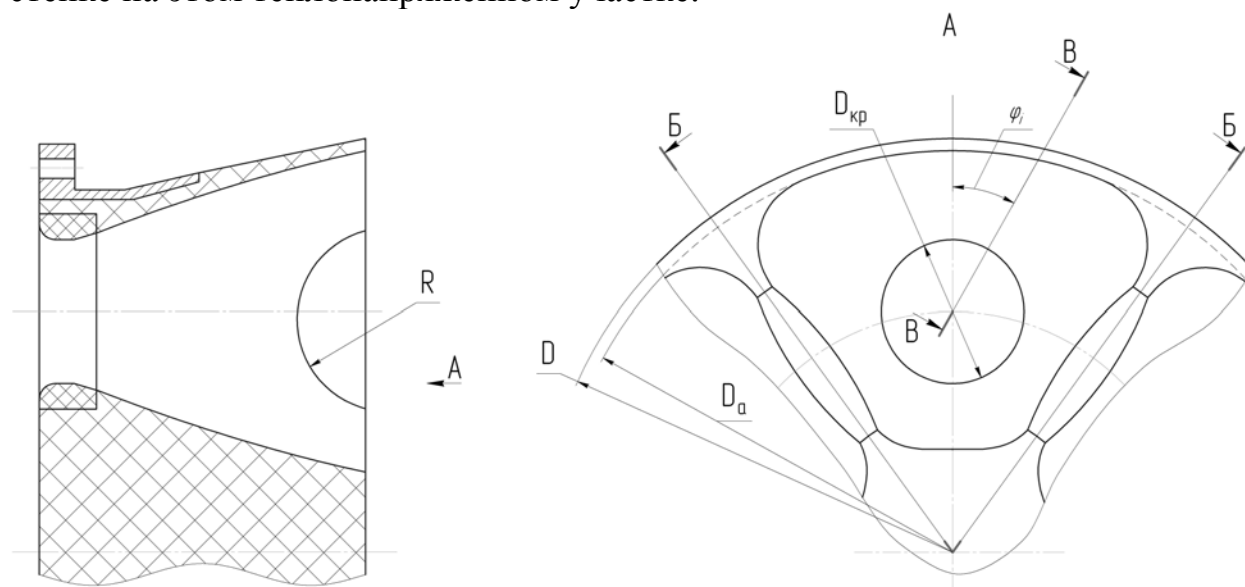


Рис. 5. Схема многосоплового блока с некруглыми соплами

Моделирование течения двухфазных продуктов сгорания выполнено для двух вариантов размеров монодисперсных частиц – 2 и 25 мкм. Граничные размеры частиц конденсированной фазы при принятых в расчетах размерах сопел определены на основе работ Б.Т.Ерохина и А.М.Губертова.

Установлено, что частицы размером 2 мкм достаточно близко приближаются к стенке сверхзвуковой части некруглого сопла. При этом вблизи поверхности сопла наблюдается зона чистого газа. Выпадение частиц отсутствует. Характер распределения потока частиц размером 25 мкм существенно отличается. Зона чистого газа занимает уже значительную часть сечения. При этом основная концентрация частиц смещена ближе к оси сопла. На рис.6 представлена картина распределения концентрации частиц конденсированной фазы по тракту некруглого единичного сопла со степенью расширения  $\overline{F}_a = 10$  и степенью некруглости единичного сопла  $\overline{r_{a \max}} / \overline{r_{a \min}} = 2$ .

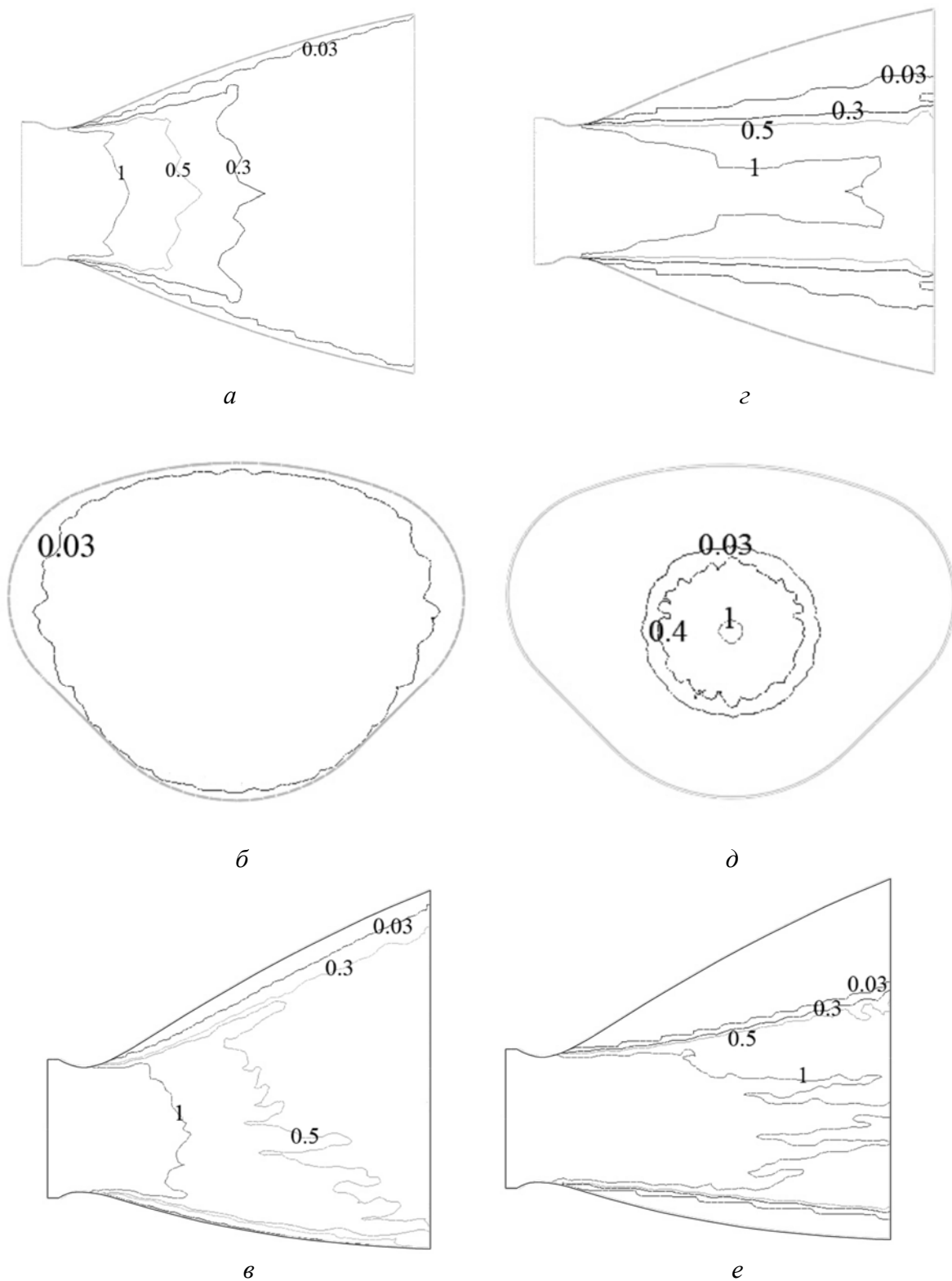


Рис. 6. Массовая концентрация частиц ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) по тракту сопла со степенью расширения  $\overline{F}_a = 10$  и степенью некруглости  $\overline{r_{a\max}} / \overline{r_{a\min}} = 2$  при диаметре частиц: *a, б, в* – 2 мкм, *г, д, е* – 25 мкм.

Как следует из рис.6, *в*, степень некруглости 2, во всяком случае, при предложенном методе профилирования сопла является предельно допустимой с точки зрения обеспечения течения без выпадения мелких частиц конденсированной фазы (2 мкм) на стенку сверхзвуковой части.

В целом в результатах моделирования отмечен волнообразный характер изолиний концентрации частиц по тракту сопла. Основной причиной этого является то, что, несмотря на близость контура в каждом сечении к линии тока для осесимметричного сопла, в трехмерном сопле возникают слабые косые скачки уплотнения. На них газовая фаза резко изменяет направление на некоторый угол и увлекает за собой конденсат, который также изменяет направление движения, пусть и более плавно. Отчасти волнообразный характер изолиний концентрации частиц связан с формой и размерностью расчетной сетки.

Проведена сравнительная оценка суммарного импульса тяги стартовых ускорителей традиционной схемы с двигателем, выполненным по многосопловой схеме с некруглыми соплами. Оценка выполнена для интересного для практики диапазона габаритных ограничений на относительную длину двигателя  $L_{дв}/D$  от 3 до 6.

Как следует из представленных в таблице результатов, по величине расчетного удельного импульса тяги многосопловая схема с некруглыми соплами на 1,52% уступает односопловой, но на 2,2% превосходит традиционную 4-сопловую схему. Однако по величине суммарного импульса тяги, являющегося основным показателем энергоэффективности стартового ускорителя в ограниченных габаритах, преимущества многосопловой схемы становятся весьма существенными (рис.7), особенно для двигателей малой степени удлинения  $L_{дв}/D$ .

**Результаты расчета тягового комплекса  $K_p$  и основных составляющих потерь импульса**

Схема	Параметр								
	$K_p$	$\delta K_p$ , %	$\zeta_{зап}$ , %	$\zeta_{тр}$ , %	$\zeta_f$ , %	$\zeta_{дон}$ , %	$\overline{d}_a$	$\overline{d}_{эф}$	$\delta I_{удп}$ , %
Односопловая	1,5218	-	1,88	0,5	1	-	2,5	-	-
4-сопловая традиционная	1,4683	-3,5	2,4	0,5	0,7	-	2	-	-3,72
4-сопловая с некруглыми соплами	1,5172	-0,3	2,35	0,54	0,95	0,76	-	2,45	-1,52

Эффект достигается за счет использования объема, освободившегося из-за укорочения сопла в многосопловой схеме, для размещения дополнительного топлива. Так, в интересном для практики диапазоне габаритных ограничений двигателя расчетная оценка выигрыша многосопловой схемы по величине суммарного импульса тяги изменяется от 9,8 % (при  $L_{дв}/D = 6$ ) до 24,5 % (при  $L_{дв}/D = 3$ ).

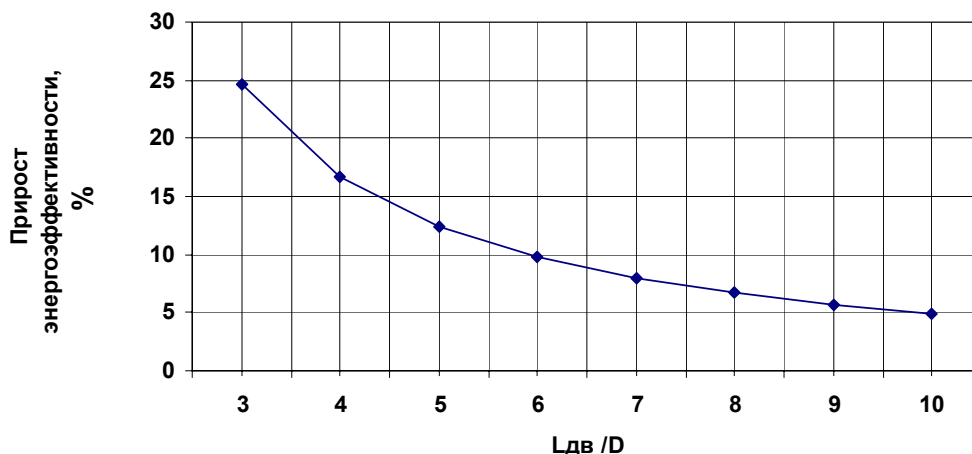


Рис. 7. Зависимость прироста энергоэффективности от удлинения двигателя

Выполнена экспериментальная проверка характеристик многосоплового блока с некруглыми соплами (рис. 8, *а*) огневыми стендовыми испытаниями на модельном РДТТ. Состояние сопла после испытаний (рис. 8, *б*) свидетельствует об отсутствии заметного выпадения частиц конденсированной фазы на стенку сопла. Внутренняя поверхность равномерно обуглена, прогары отсутствуют, величины уноса теплозащитного покрытия не превышают ожидаемых значений и находятся в диапазоне величин 0,3...0,4 мм.



Рис. 8. Многосопловой блок с некруглыми соплами до и после испытаний.

Получено удовлетворительное согласование потерь суммарного импульса тяги модельного РДТТ с многосопловым блоком с некруглыми соплами, оцененных по результатам испытаний ( $\zeta_{\Sigma}=5,3\%$ ), с прогнозируемым по результатам расчета значением  $\zeta_{\Sigma} = 6,1 \%$ .

В конце главы даны рекомендации по проектированию многосоплового блока РДТТ с некруглыми соплами:

1. Количество сопел в многосопловом блоке целесообразно увязывать с профилем щелевого или звездообразного твердотопливного заряда.

2. Рациональной формой поперечного сечения на срезе единичного сопла является кольцевой сектор со скругленными углами.

3. В зоне перемычек между выходными сечениями единичных сопел рекомендуется выполнять местные выборки. Без заметного влияния на величину удельного импульса тяги они облегчают конструкцию, снижают напряжения в стенке на этом теплонапряженном участке, снижают влияние атмосферного давления на давление в центральной части донной области.

4. Рекомендуется объединять в многосопловой блок сопла со степенью некруглости не более 2. При большей некруглости повышается вероятность выпадения мелкодисперсных частиц конденсированной фазы на стенку сверхзвуковой части сопла.

#### Основные результаты и выводы.

1) Разработан метод профилирования и оценки потерь удельного импульса тяги многосопловой блока РДТТ с некруглыми соплами и двухфазными продуктами сгорания, основанный на апробированных подходах для осесимметричных сопел.

2) Численным моделированием течения двухфазных продуктов сгорания в некруглом сопле и огневым стендовым испытанием модельного РДТТ с многосопловым блоком показано, что в диапазоне геометрической степени расширения  $\bar{F}_a = 5 \dots 10$  и степени некруглости единичного сопла до  $\frac{r_{a \max}}{r_{a \min}} = 2$  обеспечивается течение в сопле без осаждения частиц конденсированной фазы на стенку.

3) Проведен сравнительный анализ энергоэффективности стартовых ускорителей ракет, выполненных по различным схемам. Показано, что прирост энергетических характеристик двигателя, выполненного по многосопловой схеме с некруглыми соплами, зависит от соотношения длины двигателя к диаметру на срезе сопла ( $L_{\text{дв}} / D$ ). В интересном для практики диапазоне габаритных ограничений преимущество в суммарном импульсе тяги составляет от 9,8 % (при  $L_{\text{дв}} / D = 6$ ) до 24,5 % (при  $L_{\text{дв}} / D = 3$ ).



### Публикации по основным положениям диссертации.

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. *Кочетков А.О.* Эффективность многосопловой схемы стартовых ускорителей ракет с некруглыми неосесимметричными соплами // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – Казань: КГТУ им. Туполева. 2009. №3. С. 67 – 69.

2. *Кочетков А.О.* Профилирование многосоплового блока РДТТ с некруглыми соплами / Михеев Н.И. // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – Казань: КГТУ им. Туполева, 2010. №2. С. 56 – 59.

Работы, опубликованные в других изданиях:

3. *Кочетков А.О.* Эффективность многосопловой схемы стартовых ускорителей ракет с некруглыми неосесимметричными соплами при жестких габаритных ограничениях // Тепловые процессы в технике. – М.: 2009. Т.1. №9. С. 401 – 403.

4. *Кочетков А.О.* Эффективность многосопловой схемы стартовых ускорителей ракет // Материалы докладов VI Школы – семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». – Казань: 2008. С. 443-445.

5. *Кочетков А.О.* Применение многосопловой схемы в стартовых ускорителях ракет при жестких габаритных ограничениях // Тезисы докладов 7-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2008». – М: МАИ, 2008. С.158-159.

6. *Кочетков А.О.* Методика профилирования сверхзвуковой части многосоплового блока с некруглыми соплами / Пигалев А.С. // Тезисы докладов 8 - ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2009» – М.: МАИ, 2009. С.128-129.

7. *Кочетков А.О.* Оценка эффективности многосопловой схемы стартовых ускорителей ракет с некруглыми неосесимметричными соплами // Тезисы докладов XXI 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» – Казань: КВВКУ, 2009. Часть 2. С. 87 - 89.

8. *Кочетков А.О.* Разработка методики профилирования сверхзвуковой части некруглого неосимметричного сопла // Материалы докладов V-ой Всероссийской научно-технической конференция "Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики" – Казань: КГТУ им. Туполева, 2009. Часть 1. С. 229 – 233.

Автор выражает признательность научному руководителю д.т.н. профессору Н.И.Михееву, генеральному директору ОАО «Казанское ОКБ «Союз» Н.Ш.Латыпову, главному конструктору заместителю ген. директора по НИОКР ОАО «Казанское ОКБ «Союз» Р.Х. Раимову, первому заместителю главного конструктора ОАО «Казанское ОКБ «Союз» С.Н.Саушину, начальнику конструкторского отдела №2 ОАО «Казанское ОКБ «Союз» П.И. Степанову, заместителю начальника расчетного отдела №5 ОАО «Казанское ОКБ «Союз» В.Н. Михалицыну, а также ведущему конструктору расчетного отдела №12 ОАО «Казанское ОКБ «Союз» К.Г. Белицкому за всестороннюю помощь в работе над диссертацией.

---

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ.л. 1,0. Усл.печ.л. 0,93. Уч.-изд.л. 1,0.  
Тираж 100. Заказ 0

---

Типография Издательства Казанского государственного  
технического университета  
420111, Казань, К.Маркса, 10