**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  | А |  | Ракетно-космической техники |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Кафедра |  | А9 |  | Плазмогазодинамики и теплотехники |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Дисциплина |  | Аэрогидрогазодинамика | | |

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему

|  |
| --- |
| Сопряжённое моделирование газодинамических и |
| тепловых процессов |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы | | | |  | | А942 |
| Мурзина К.Э. | | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ** | | | | | | |
| Овчинникова О.К. | |  |  | | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | | |
| Оценка |  | | | |  | |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 20\_\_\_\_ г. | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2017г.

СОДЕРЖАНИЕ

|  |  |
| --- | --- |
| Реферат………………………………………………………………….. | 4 |
| Нормативные ссылки…………………………………………………... | 5 |
| Список условных обозначений………………………………………... | 6 |
| Введение………………………………………………………………… | 7 |
| 1 Классификация ракетных двигателей и их назначение……………. | 8 |
| 2 Математические модели……………………………………………... | 14 |
| 3 Вычислительное моделирование…………………………………….  3.1 Профилирование сопла ракетного двигателя………………….. | 17  17 |
| 3.2 Постановка задачи и результаты…………………....................... | 22 |
| Заключение……………………………………………………………… | 33 |
| Список используемой литературы…………………………………….. | 34 |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка \_\_\_\_\_\_\_\_ стр., \_\_\_\_\_\_\_\_ рис., \_\_\_\_\_\_\_\_ табл., \_\_\_\_\_\_\_\_ источников, CD диск с презентацией

СОПРЯЖЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Целью курсового проекта является ознакомление с методами постановки и решения мультифизичных задач в вычислительных пакетах «тяжелого» класса на примере задачи прогрева и охлаждения стенки сопла под действием потока газа.

В рамках курсового проекта решена задача изменения температуры стенки сопла, на которую воздействуют поток воздуха снаружи и поток горячего газа изнутри. Исследовано изменение температурного поля стенки и ударно-волновой картины струйного течения при различных параметрах внешнего потока.

Основными задачами курсового проектирования являются:

1. Ознакомление с современным уровнем решения сопряженных задач;
2. Аналитический обзор работ по тематике курсового проектирования;
3. Математическое описание исследуемого явления;
4. Проведение вычислительных экспериментов;
5. Анализ полученных результатов.

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей пояснительной записке использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7.1—84 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления

ГОСТ 8.417—81 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин

ГОСТ 7.32—2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления

ГОСТ 7.54 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Представление численных данных о свойствах веществ и материалов в научно-технических документах. Общие требования.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Латинские символы

**– изобарная теплоёмкость, Дж/(кгК);**

**– полная удельная энергия, Дж;**

**–** массовый расход, кг/с;

**–полная энтальпия, Дж/кг;**

**–** длина до оси сопла, м;

– молярная масса, г/моль;

**– число Прандтля**

– давление, Па;

- газовая постоянная, Дж/(кгК);

– радиус скругления закритической части сопла, м;

**– тензор скоростей деформаций;**

– универсальная абсолютная температура, К;

– объем газа м3

– диаметр, м;

**– время, с;**

**– тепловой поток, Вт/м2;**

*u, v, w* – компоненты вектора скорости, м/с;

Греческие символы

μ – масса газа, кг;

**– тензор вязких напряжений;**

ρ **–**  плотность, кг/м3

υ **–**  удельный объем, м3/кг;

**– оператор Лапласа;**

**–коэффициент теплопроводности, Дж/(м2К)**

ВВЕДЕНИЕ

Выбор задачи связан с актуальностью тепловых расчетов при разработке как авиационных, так и ракетных двигателей.

При конструировании ракетных двигателей стоит вопрос об эффективности охлаждения камеры сгорания и сопловой части двигателя, чтобы не допустить прогорания стенок изделия, а также обеспечить необходимый ресурс работоспособности в случае экстремальных внешних тепловых воздействий [1].

В курсовом проекте рассмотрена задача прогрева стенки сопла, на которую воздействуют поток воздуха, омывающий сопловой контур снаружи и поток горячего газа из камеры сгорания, омывающий сопловой контур изнутри.

1 КЛАССИФИКАЦИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Сопло в рассматриваемой задаче чаще всего применяется в ракетных двигателях (РД). В главе представлено описание РД, классификация и их назначение.

**Ракетный двигатель ­**— реактивный двигатель, источник энергии и рабочее тело которого находится в самом средстве передвижения. Ракетный двигатель — единственный практически освоенный для вывода полезной нагрузки на орбиту Земли и применения в условиях безвоздушного космического пространства тип двигателя.

В ракетном двигателе высокоскоростной реактивный поток обусловлен выделением энергии в камере двигателя, куда поступает рабочее тело. В результате химической реакции в КС образуются газы, обладающие высоким давлением и высокой температурой; эти газы затем расширяются и ускоряются в объёме сопла, создавая при выбросе сверхзвуковую струю, порождающую реактивную тягу.

Преимущества РД:

1. Тяга практически не зависит от окружающей среды и скорости полёта РС.
2. Не имеет ограничений по высоте полёта и может работать в безвоздушном пространстве.
3. Тяга, обусловленная высокими термодинамическими параметрами в КС и большим массовым расходом топлива, значительно больше тяги каких-либо других известных двигателей.

**Химические ракетные двигатели** являются наиболее применяемыми и хорошо освоенными.

Этот тип двигателей на сегодняшний день является единственным, который массово используется для выведения в открытый космос космических аппаратов, кроме того, он нашел применение и в военной промышленности. Химические двигатели делятся на твердо- и жидкотопливные в зависимости от агрегатного состояния ракетного топлива.

|  |
| --- |
| &Vcy;&icy;&dcy;&ycy; &khcy;&icy;&mcy;&icy;&chcy;&iecy;&scy;&kcy;&icy;&khcy; &dcy;&vcy;&icy;&gcy;&acy;&tcy;&iecy;&lcy;&iecy;&jcy; |
| Рисунок 1.1 – Схемы работы двигателей |

Твердотопливный двигатель вмещает в своем корпусе топливо и окислитель в твердом агрегатном состоянии, причем контейнер с топливом – это одновременно и камера сгорания. Топливо обычно имеет форму стержня с центральным отверстием. В процессе окисления стержень начинает сгорать от центра к периферии, а газы, полученные в результате сгорания, выходят через сопло, образуя тягу. Это самая простая конструкция среди всех ракетных двигателей.

В жидкостных РД топливо и окислитель находятся в жидком агрегатном состоянии в двух раздельных резервуарах. По каналам подачи они попадают в камеру сгорания, где смешиваются и происходит процесс горения. Продукты сгорания выходят через сопло, образуя тягу. В качестве окислителя обычно используется жидкий кислород, а топливо может быть разным: керосин, жидкий водород и т.д.

**Достоинствами твердотопливных РД являются:**

* простота конструкции;
* сравнительная безопасность в плане экологии;
* невысокая цена;
* надежность.

**Недостатки РДТТ:**

* ограничение по времени работы: топливо сгорает очень быстро;
* невозможность перезапуска двигателя, его остановки и регулирования тяги;
* небольшой удельный вес в пределах 2000-3000 м/с.

Анализируя плюсы и минусы РДТТ, можно сделать вывод, что их использование оправдано только в тех случаях, когда нужен силовой агрегат средней мощности, достаточно дешевый и простой в исполнении. Сфера их использования – баллистические, метеорологические ракеты, ПЗРК, а также боковые ускорители космических ракет (ими оснащаются американские ракеты, в советских и российских ракетах их не использовали).

**Достоинства жидкостных РД:**

* высокий показатель удельного импульса (порядка 4500 м/с и выше);
* возможность регулирования тяги, остановки и перезапуска двигателя;
* меньший вес и компактность, что дает возможность выводить на орбиту даже большие многотонные грузы.

**Недостатки ЖРД:**

* сложная конструкция и пуско-наладочные работы;
* в условиях невесомости жидкости в баках могут хаотично перемещаться. Для их осаждения нужно использовать дополнительные источники энергии.

Сфера применения ЖРД – это в основном космонавтика, так как для военных целей эти двигатели слишком дорогие.

## Ядерные ракетные двигатели (ЯРД)

Этот тип РД в отличие от химических вырабатывает энергию не при сгорании топлива, а в результате нагревания рабочего тела энергией ядерных реакций. ЯРД бывают изотопными, термоядерными и ядерными.

|  |
| --- |
| yard3 |
| Рисунок 1.2 – Ядерный ракетный двигатель |

Ядерные ракетные двигатели бывают газо-, жидко- и твердофазными в зависимости от агрегатного состояния ядерного топлива. Топливо в твердофазных ЯРД – это тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), такие же, как в ядерных реакторах. Они находятся в корпусе двигателя и в процессе распада делящегося вещества выделяют тепловую энергию. Рабочее тело – газообразный водород или аммиак – контактируя с ТВЭЛом, поглощает энергию и нагревается, увеличиваясь в объеме и сжимаясь, после чего выходит через сопло под высоким давлением.

Газофазные ЯРД работают на топливе в газообразном состоянии. Обычно в них используется уран. Газообразное топливо может удерживаться в корпусе электрическим полем или же находится в герметичной прозрачной колбе – ядерной лампе. В первом случае возникает контакт рабочего тела с топливом, а также частичная утечка последнего, поэтому кроме основной массы топлива в двигателе должен быть предусмотрен его запас для периодического пополнения. В случае с ядерной лампой утечки не происходит, а топливо полностью изолировано от потока рабочего тела.

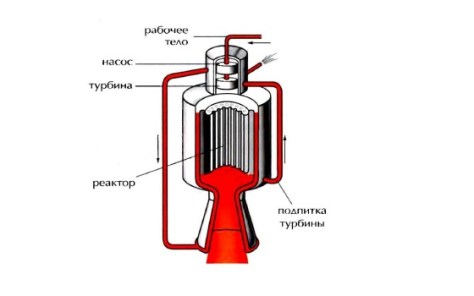
[](https://i2.wp.com/zewerok.ru/wp-content/uploads/2015/04/yard.jpg)

Рисунок 1.3 – Схема ЯРД

**Электрические ракетные двигатели (ЭРД)**

Устройство и принцип работы

Электроракетная двигательная установка состоит из самого ЭРД, строение которого зависит от его типа, систем подачи рабочего тела, управления и электропитания. Электротермический РД нагревает поток рабочего тела за счет тепла, выделяемого нагревательным элементом, или в электрической дуге. В качестве рабочего тела используется гелий, аммиак, азот и другие инертные газы, реже – водород.

Электростатические РД делятся на коллоидные, ионные и плазменные. В них заряженные частицы рабочего тела ускоряются за счет электрического поля. В коллоидных или ионных РД ионизация газа обеспечивается ионизатором, высокочастотным электрическим полем или газоразрядной камерой. В плазменных РД рабочее тело – инертный газ ксенон – проходит через кольцевой анод и попадает в газоразрядную камеру с катод-компенсатором. При высоком напряжении между анодом и катодом вспыхивает искра, ионизирующая газ, в результате чего получается плазма. Положительно заряженные ионы выходят через сопло с большой скоростью, приобретенной за счет разгона электрическим полем, а электроны выводятся наружу катодом-компенсатором.

|  |
| --- |
| [Ion_engine](https://i2.wp.com/zewerok.ru/wp-content/uploads/2015/04/Ion_engine.jpg) |
| Рисунок 1.4 – Электромагнитый РД |

Электромагнитные РД имеют свое магнитное поле – внешнее или внутреннее, которое ускоряет заряженные частицы рабочего тела.

На сегодняшний день использование ЭРД ограничено их установкой на космические спутники, а в качестве источников электроэнергии для них применяются солнечные батареи [2].

2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

В настоящее время для решения газодинамических и тепловых задач, как правило, используются вычислительные программные средства, в которых реализованы конечно-элементные или конечно-объемные схемы для системы уравнений законов изменения массы, количества движения и энергии. Для сжимаемого газа система уравнений, дополненная термическим уравнением состояния, имеет вид [3]

**где полная энергия выражается следующим уравнением**

**,**

**а полная энтальпия**

**.**

**Тензор вязких напряжений описывается формулой**

**,**

**в которую входит тензор скоростей деформаций**

**.**

**Тепловой поток вычисляется выражением ниже**

**, где .**

**Для решения представленной системы уравнений необходимо осреднение по Рейнольдсу. В сжимаемом случае это приводит к появлению корреляций плотности вида . Во многих случаях этими членами уравнений пренебрегают**

**Более оправданным подходом является использование осреднения по Фавру:**

**.**

**Оно не привносит дополнительного физического смысла, а просто удобнее математическое упрощение**

**При получении уравнений часть переменных осредняется по Рейнольдсу**

**а другая часть по Фавру**

**где – колебательные компоненты скорости.**

**Подстановка этого разложения в уравнение сжимаемого газа и осреднение последних по Рейнольдсу даёт уравнение Рейнольдса для сжимаемого газа:**

****

**В этой системе уравнений тензор турбулентных напряжений выражается следующей формулой . А турбулентный тепловой поток такой формулой .**

**В уравнение энергии входят конвекция и диффузия кинетической энергии турбулентности , и уравнение кинетической энергии турбулентности выражается .**

3 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В главе представлено: описание **профилирования сопла ракетного двигателя**, проведенные вычислительные расчёты и полученные результаты.

**3.1 ПРОФИЛИРОВАНИЕ СОПЛА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Основное назначение сопла РД – преобразование энергии, накопленной рабочим газом в камере подвода энергии, в кинетическую энергию потока, образующую реактивную тягу двигателя. Это преобразование должно быть максимально эффективным, без неоправданных потерь энергии, обеспечивающим максимальную величину суммарного импульса тяги РС. Поставленная задача решается профилированием сопла двигателя.

Согласно одномерной теории сверхзвукового сопла, скорость истечения и давление на срезе сопла не зависят от его формы и длины, а через число Маха определяются только степенью расширения сопла . Характер изменения площади сечения по длине сопла (профиль сопла) сказывается лишь на распределении параметров потока по его длине, профиль сопла при этом может быть различным.

Основная цель профилирования – максимальное приближение процес- са течения газа к идеальному, при котором потери энергии потока газа будут минимальными при минимальных массе и габаритах сопла. Это скажется и на эффективности РС в целом, снижая её пассивную массу и габариты.

**Более выгодным по соображениям длины, площади поверхности, массы и минимизации потерь тяги оказывается профилированное сопло.**

**В докритической части сопла (в силу особенностей газодинамики дозвуковых скоростей) поперечное сечение начиная от камеры сгорания сечением до критического сечения сопла может изменяться достаточно быстро, угол наклона образующей сопла может быть достаточно большим. Чем выше отношение, т.е. чем меньше скорость на входе в сопло, тем больше может быть угол наклона профиля. Длина докритической части сопла при этом убывает. Контур сопла на его входе должен быть плавным, обеспечивать прогрессивное повышение скорости потока и снижение потерь на трение по поверхности и в местных сопротивлениях.**

**Существует несколько приёмов профилирования дозвуковой части сопла, выработанных на основе опыта проектирования (эмпирическим путём). Один из них, наиболее простой, основан на использовании дуг и касательной (профиль Рао, рис.3.1). На входе в сопло радиус скругления профиля составляет , при входе в критическое сечение и для скругления закритической части . Дуги профиля радиусами R1 и R2 должны иметь общую касательную, расположенную под углом к оси сопла.**

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3.1 - **Дозвуковая часть сопла** |

**Профиль сверхзвуковой части сопла также должен обеспечить минимальную длину, минимальные потери трения потока продуктов сгорания о стенку и, кроме того, исключить возможность возникновения отрыва потока от его стенок и/или образование скачков уплотнения в потоке. На срезе сопла поток должен быть по возможности параллельным его оси (рассеяние вектора скорости потока должно быть минимальным), это требование соответствует стремлению получить максимальную тягу РД. В результате удовлетворения этих требований образуется достаточно сложный профиль контура сопла.**

**Существует несколько приёмов профилирования закритической части сопла. Предупредить потери тяги можно точным профилированием, при котором контурная линия сопла совпадает с траекторией частиц газа, движущихся около стенки (вектор скорости этих частиц направлен по касательной к контуру стенки).**

**Такое сопло носит название газодинамически профилированного, на его срезе поток газа однороден и направлен строго параллельно его оси. Однако такое сопло получается чересчур длинным и тяжёлым, даже по сравнению с простым коническим соплом. Если ещё учесть, что выполнение такого сопла технологически очень сложно, то станет ясно, что это для РД неприемлемо.**

**Для уменьшения длины сопла при его профилировании используют следующий приём. В закритической части сопла, где скорости потока ещё относительно невелики, назначают довольно большой угол раскрытия его контура. Как показывает практика, это не приводит к отрыву потока от стенки сопла, так как здесь происходят процессы догорания топлива и рекомбинации молекул продуктов сгорания (ПС) с выделением тепла. Последнее способствует более интенсивному радиальному расширению газа, чем в отсутствие этих реакций (реальные процессы теплообмена в сверхзвуковом потоке при газодинамическом профилировании сопла не учитываются, так как математическая модель течения является изоэнтропической). Отрыв потока ПС от стенок сопла не наблюдается даже при углах раскрытия профиля в , что кардинально уменьшает длину сопла по сравнению с газодинамическим профилированием, повышая его эффективность. Затем, по мере приближения к срезу сопла, угол раскрытия контура уменьшают так, чтобы избежать возникновения скачков уплотнения в сверхзвуковом потоке и чтобы на срезе сопла поток был направлен по возможности параллельно его оси. Эта мера снижает потери энергии на рассеяние вектора скорости потока.**

**Практический интерес представляют сопла, контур которых близок к оптимальным по уровню удельного импульса тяги РД. В частности, приведём пример простого геометрического метода профилирования сопла (рис.6), дающего контуры, очень близкие к оптимальным по потере удельного импульса тяги, размерам и массовым характеристикам. Горловина сопла в окрестности критического сечения описывается двумя окружностями: дозвуковая (рис. 3.2) и сверхзвуковая .**

|  |
| --- |
|  |
| **Рисунок 3.2 - Сверхзвуковая часть сопла** |

**К отрезку дуги сверхзвуковой части под углом к оси сопла проводится касательная.**

**Следующий этап построения рис. 3.3 контура сопла – выбор относительной длины сопла , которая зависит как от степени расширения сопла , так и от величины угла . Обе эти величины – функции числа Ма. Срез сопла радиусом Ra располагается на удалении от критического сечения. Через координату Ra под углом проводят линию до пересечения с касательной, выпущенной из горла сопла. Образовавшиеся отрезки разбивают на равное число участков (3...4), после чего одноимённые точки участков соединяют хордами.**

**Кривая, огибающая полученную сетку хорд, образует искомый контур сопла. Угол наклона контура на срезе сопла, сильно влияющий на его длину, выбирают в пределах = 5...9 [4].**

|  |
| --- |
|  |
| **Рисунок 3.4. - Выбор относительной длины сопла** |

3.2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Решается стационарная осесимметричная задача в двумерной постановке.

В программе ICEM CFD строится сопло ракетного двигателя с параметрами: – диаметр критического сечения сопла;   
 – диаметр на выходе сопла; толщина стенки сопла равна и геометрическое число Маха . Задаётся расчётная область . Далее строится блочная сетка, которая содержит ~ 406∙103 ячеек. Её ортогональное минимальное качество 0,746.

После построения сетки, в программе Fluent задаются входные параметры. В качестве рабочего газа и газа окружающей среды задан воздух, описывающийся моделью совершенного газа. В камере сгорания задано давление 90 атм, температура 1500 К. Температура окружающей среды 300 К.

Далее проводится серия расчётов при различных скоростях потока окружающей среды: при 10 м/с, 200 м/с, 400 м/с и 800 м/с.

На рисунках 3.4…3.5 показаны результаты при обтекании потоком со скоростью 10 м/с.

На рисунке 3.4 видно, что температура на выходе из сопла заметно уменьшилась, по сравнению с температурой в камере сгорания. Она варьируется от 200 до 600 К. Минимальная температура достигается за сопловой частью, и равна 149 К. Также на рисунке видно, что поток нагревается вблизи критического сечения сопла у стенки. На рисунке 3.5 можно видеть изменение поля числа Маха, которое достигает значения 6,75.

На рисунках 3.6…3.7 показаны результаты при обтекании потоком со скоростью 200 м/с. Температура на выходе из сопла, как и в предыдущем случае, уменьшилась, и достигла такого же значения ­– 149 К.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| |  | | --- | |  | |  | | Рисунок 3.4 – Распределение температуры по струе и соплу | |
|  |

|  |
| --- |
|  |
|  |
| Рисунок 3.5 – Поле чисел Маха |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| |  | | --- | |  | |  | | Рисунок 3.6 – Распределение температуры по струе и соплу | |
|  |

|  |
| --- |
|  |
|  |
| Рисунок 3.7 – Поле чисел Маха |

В данном случае температура стенки сопла уже не достигает температуры в камере сгорания. В среднем она равна 1000 К.

На рисунках 3.8…3.9 показаны результаты при обтекании потоком со скоростью 400 м/с.

|  |
| --- |
|  |
|  |
| Рисунок 3.8 – Распределение температуры по струе и соплу |

|  |
| --- |
|  |
|  |
| Рисунок 3.9 – Поле чисел Маха |

Диапазон температур ничем не отличается от двух вышерассмотренных случаев.

Температура части стенки, находящаяся рядом с окружающим потоком, приближается к его температуре и достигает 600 К.

На рисунках 3.10…3.11 показаны результаты при обтекании потоком со скоростью 800 м/с. Минимальная температура на рисунке 3.10 равна 150 К.

При увеличении скорости внешнего обтекания сопла, температура его убывает.

|  |
| --- |
|  |
|  |
| Рисунок 3.10 – Распределение температуры по струе и соплу |
|  |
|  |
| Рисунок 3.11 – Поле чисел Маха |

При первоначальном увеличении скорости внешнего обтекания сопла от 0 м/с до конкретного значения, температура его стенки значительно уменьшается, однако, при достижении определённой величины (не исследованной нами), изменение температурного градиента стенки становится совсем незначительным даже при увеличении скорости в разы. Более того, при высоких числах Маха возможно появление эффекта нагрева стенки внешним потоком из-за эффекта вязкого трения, что сделает температурный режим стенки слишком тяжёлым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В курсовом проекте рассмотрена задача прогрева стенки сопла, на которую воздействуют поток воздуха, омывающий сопловой контур снаружи и поток горячего газа из камеры сгорания, омывающий сопловой контур изнутри.

Исследовано изменение температурного поля стенки и ударно-волновой картины струйного течения при различных параметрах внешнего потока.

Для решения поставленной задачи было проведено профилирование сопла, простроены геометрическая и сеточная модели.

Рассмотрено изменение газодинамической и тепловой картины при различных граничных условиях, заданных для внешнего потока окружающей среды.

Сделаны выводы о влиянии скорости набегающего потока, обтекающего сопловой контур на распределение газо- и термодинамических параметров струи газа, формирующейся в этом контуре.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

* 1. <http://elibrary.ru/item.asp?id=25360773> , дата посещения 25.03.2017
  2. <http://rdeu.kai.ru/vidy-raketnykh-dvigateley/>, дата посещения 15.04.2017
  3. <https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/turb_models/Term8_Lec05_Reynolds.pdf>, дата посещения 13.05.2017
  4. В.В. Сахин Устройство и действие энергетических объектов: учебное пособие / Изд-во Балт. гос.техн. ун-т. – СПб., 2008. – 196 с.