МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

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

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

Факультет [«А» РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ](http://www.voenmeh.ru/training_activities/institutes/fa)

Кафедра А4 "Стартовые и технические комплексы ракет и космических аппаратов"

Дисциплина (модуль) Стартовые Комплексы Стратегического Назначения

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Разработка математической модели проведения численного эксперимента

Выполнил студент

группы А4М31

Номер группы

Левченко Г.Е

Фамилия И.О.

Руководитель

Доцент, Маштаков А.П.

Должность, Фамилия И.О.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018г.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

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

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

УТВЕРЖДАЮ:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Заведующий кафедрой | | |  |
|  |  |  | |
| подпись |  | расшифровка | |

З А Д А Н И Е

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| на курсовой проект по дисциплине | | | | | | | | Стартовые Комплексы Стратегического Назначения | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| выполняемый в | | | | | 1 | | семестре | | | | 2018 | | | - 2019 | | | | | уч. года | | |  | | | |  | | | | | |
| студенту | | Левченко Глебу Евгеньевичу | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| группы | | А4М31 | | Факультета | | | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_А4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Тема проекта | | | Аэродинамический проект ЛА типа "Воздух-Поверхность" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Дата выдачи задания | | | | | | | | | | | |  | | | | |  | | | 20\_\_\_ г. | | | |  | | | | |  | | | | |
| 3 | Сроки сдачи студентом оконченного проекта | | | | | | | | | | | | 10 | | | | | января | | | 2019 г. | | | |  | | | | |  | | | | | |
| 4 | Техническое задание | | | | | | | | | | | |  | | | | |  | | | 20\_\_\_ г. | | | |  | | | | |  | | | | | |
|  | Исходная технико-экономическая информация к проекту | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Состав и объем проекта | | | | | | | | | | |  | | | | |  | | | |  | | | |  | | | |  | | | | |
|  | 5.1 | Чертежи, схемы, диаграммы: | | | | | | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | 5.2 | Программа расчетов на ЭВМ | | | | | | | | Ansys Meshing, Ansys ICEM CFD, Ansys Design | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | Modeler, Ansys Fluent | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | 5.3 | Расчетно-пояснительная записка к проекту на | | | | | | | | | | | | | 5 | | | | | стр. | | |  | | | |  |
| 6 | Календарный план выполнения курсового проекта | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Этап | | | Краткое содержание | | | | | | | | | | | | | Срок выполнения | | | | | | | | | | | | | | |
| по плану | | | | | | | | фактически | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | |  | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | |  | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | |  | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | |  | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | |  | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | |  | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | |  | | | | | | |
|  | | |  | | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | |  | | | | | | |
| 7 | Дополнительные указания по проектированию | | | | | | | | | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Отзыв руководителя | | | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | Общая оценка о работе студента | | | | | | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

подпись ФИО

дата

Руководитель \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

подпись ФИО

дата

Содержание

[Введение 5](#_Toc3587360)

[Глава 1. Структурно-Элементное моделирование 6](#_Toc3587361)

[Концепция Структурно-Элементного Метода [5] 6](#_Toc3587362)

[Глава 2. Метод конечных объемов 10](#_Toc3587363)

[Построение сетки 10](#_Toc3587364)

[Выбор модели и допущений 13](#_Toc3587365)

[Глава 3. Описание расчетно-экспериментальной модели 17](#_Toc3587366)

[Глава 4. Результаты проведения численного эксперимента 24](#_Toc3587367)

[Заключение 27](#_Toc3587368)

# Введение

Данная работа посвящена возможности применения Структурно-Элементного моделирования(СЭМ) в расчете параметров нестационарного струйного сверхзвукового течения в эжекторной установке, а также нахождению некоторых зависимостей между геометрическими характеристиками установки и характеристиками течения.

На данный момент определенны задачи исследования, имеется концепция проведения численных расчетов с использованием пакетов прикладных программ реализующих метод конечных объемов. Это необходимо из-за практически полного отсутствия экспериментальных данных по подобным исследования в открытом доступе или отсутствие экспериментальных данных вообще, а также в виду отсутствия возможности проведения экспериментальной наработки до начала исследования. Таким образом, использование численного моделирования является вынужденной мерой для компенсации отсутствия экспериментальных наработок. Безусловно, все результаты численных расчетов будут проверены на адекватность с использованием доступной информации по экспериментальной отработке других опытов с наличием подобных физических явлений [1].

Данная работа, по большей мере, посвящена описанию расчетной модели для проведения численного эксперимента, отработки модели, разбору первых успешных результатов моделирования.

# Глава 1. Структурно-Элементное моделирование

Структурно-элементное моделирование (СЭМ) представляет собой научное направление, сформированное на кафедре А4 БГТУ «Военмех», благодаря научным работам сотрудников [3,4] , продолжающее развиваться в настоящее время [2].

Концепция Структурно-Элементного Метода [5].

Метод Предназначен для создания быстродействующих программ расчета газоструйных процессов в выбранном диапазоне варьирования исходными данными. Требуемая универсальность достигается на этапе постановки задачи. На этом этапе рассматривается спектр течений, представляющий актуальный интерес для изучения, выявляются и формулируются задачи, подлежащие решению в целесообразной последовательности, устанавливаются диапазоны варьирования исходными данными для каждой из задач с учетом перспектив развития исследований.

Возможности построения математических моделей, позволяющих разрабатывать программы физико-математических расчетов с уникально высоким быстродействием, возникают в настоящее время благодаря достигнутому уровню изучения газоструйных процессов. Имеющийся обширный материал по экспериментальному и теоретическому исследованию газодинамических структур струйных течений с плоской и осевой симметрией в сочетании с дополнительным анализом вполне достаточен для разбиения исследуемого поля течения на относительно большие подобласти однородных процессов. Для них характерно монотонное изменение либо определенных параметров потока, либо комплексов параметров, по которым могут быть вычислены значения других газодинамических величин с применением лишь известных аналитических формул гидрогазодинамики. Накопленные результаты исследований свидетельствуют так же, что подобласти однородных процессов являются однотипными в различных течениях и многообразие струйных потоков значительно превышает число однотипных подобластей, которыми в том или ином сочетании формируют общую структуру рассматриваемого течения. Границами структурных подобластей являются хорошо известные элементы газовой динамики: скачки уплотнения, характеристические линии, где претерпевают разрывы те или иные производные, поверхности тангенциального разрыва, фронты вязких напряжений, которые продвигаются во внутрь потока или во внешнюю среду. В совокупности они образуют структурную сетку, разбивающую естественным образом в соответствии с физической картиной процессов вне поля течения на большие подобласти – макроячейки. Очевидно, что число макроячеек в структурной сетке получается на несколько порядков меньше числа необходимых ячеек в сетках, организуемых для численного интегрирования уравнений газодинамики. Выделяемые подобласти и их границы являются, таким образом, отдельными элементами общей газодинамической структуры рассматриваемого течения, для которых целесообразно разрабатывать отдельные математические модели, имеющие достаточно универсальный характер. При нестационарных задачах геометрия структурных сеток является зависимой от времени. На рисунке показан пример разбиения течения на макроячейик.

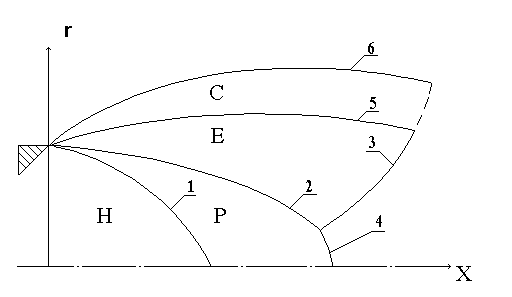


Рис.1 – Разбиение течения на макроячейки.

1 – первая характеристика; 2 – падающий скачок;

3 – отраженный скачок уплотнения; 4 – диск Маха;

5 – внутренняя граница слоя смешения; 6 – граница струи;

Н – подобласть невозмущенного течения;

Р – подобласть изэнтропического расширения;

Е – подобласть изоэнергетической части сжатого слоя;

С – подобласть смешения истекающих газов с окружающей средой.

На этапе математического моделирования процессов разрабатывается разрешающая система расчетных соотношений. В разрешающую систему входят расчётные соотношения в объёме, достаточном для определения форм и размеров макроячеек структурной сетки газодинамических величин в любой точке поля течения.

Для получения разрешающей системы расчетных соотношений используются базовые математические модели процессов, происходящих на сеточных линиях и внутри макроячеек. Базовые модели обладают простыми вычислительными свойствами и дополняют существующий в газодинамике набор теоретических моделей, например, уравнения одномерной газовой динамики, соотношения течения Прандтля-Майера, струи-точечного источника, аналитические решения для потенциальных движений жидкости, модель осредненного турбулентного движения газа, статистическая модель турбулентности, модель векторных линий.

Теоретическое обоснование использования базовых моделей возможно по неоднократному экспериментальному подтверждению по критерию Фишера.

При относительно большом числе элементов структурной сетки разрешающая система расчетных соотношений может оказаться весьма обширной, включающей сотни аппроксимирующих зависимостей. Но и в этих случаях общее число узлов интерполяции будет несопоставимо меньше количества узлов при конечно-разностном описании того же процесса. В этом и состоит главная причина высокого быстродействия программ расчета, построенных на базе структурно-элементного метода. Расчетное время исчисляется секундами, а для конечно-разностных решений десятками минут и часами.

# Глава 2. Метод конечных объемов

В данной работе метод конечных объемов будет использоваться в качестве дешевой и достаточно надежной альтернативы натурному эксперименту. Натурный эксперимент дорог и сложен в реализации, а также требует длительной наработки материала, изучения материальной части, проверки возможности получения искомого результата.

Выбирается некоторая замкнутая область течения жидкости или газа, для которой производится поиск полей [макроскопических величин](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%BA%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%BD%D1%8B) (например, скорости, давления), описывающих состояние среды во времени и удовлетворяющих определенным законам, сформулированным математически. Наиболее используемыми являются [законы сохранения](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%8B_%D1%81%D0%BE%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F) в [Эйлеровых переменных](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%AD%D0%B9%D0%BB%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5&action=edit&redlink=1).

Для любой величины, в каждой точке пространства, окруженной некоторым замкнутым конечным объемом, в момент времени существует следующая зависимость: общее количество величины в объеме может изменяться за счет следующих факторов:

транспорт количества этой величины через поверхность, ограничивающую контрольный объем — [поток](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BA);

генерация (уничтожение) некоторого количества величины внутри контрольного объема — [источники](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA) ([стоки](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%BE%D0%BA)).  
Другими словами, при формулировке МКО используется физическая интерпретация исследуемой величины. Например, при решении задач переноса тепла используется закон сохранения тепла в каждом контрольном объеме.

## Построение сетки

Для реализации метода конечных объемов используется неструктурированая сетка, необходимая для реализации разностных схем,на которых итерационно будет производится решение уравнений описывающих течение жидких сред.

Отличие структурированых и неструктурированых сеток заключается в способе хранения информации в памяти компьютера во время выполнения расчета,а так же взаимодействия отдельных ячеек. В зависимости от размерности решаемой задачи структурированые сетки хранятся в памяти в виде двумерного или трехмерного массива, что в свою очередь обеспечивает возможность взаимодействие соседних элементов между собой в нескольких направлениях распространения сетки. Неструктурированые сетки хранятся в памяти компьютера одномерным массивом, это означает что каждая ячейка «знает» своего соседа справа и слева,взаимодействие с другими соседями осуществляется только при помощи полного прогона сетки и поиска соседнего элемента, что значительно увеличивает время расчета. Неструктурированые сетки хорошо показали себя при создании моделей сложной геометрии и использовании спецефических сеток(шестиугольных). В частности любое тело можно легко поместить в сетку используя операцию триангуляцию(покрытие тела треугольными поверхностями,являющимися основаниями для формирования пристеночной ячеки). Использование структурированых сеток для сложных тел влечет усложнение построение сеток, что частично решается следующими методам: введение нерегулярных узлов, неравномерные сетки, сетки с полуцельными индексами и введением сеток с криволинейной образующей. Данные операции решают большинство проблем структурированых сеток,но так же вводят ряд усложнений и делают невозможным построение сеток без участия человека, что возможно при использовании неструктурированых сеток.

Отедельно необходимо выделить возможность расположение ячеек структурированых сеток «по потоку», при использовании структурированых сеточных построителей опытным инженером,возможно заранее предугадать направление основного движения газа. В этом случае основной перенос газа будет осуществляться в нормальном направлении относительно входной границы ячейки, а радиальная составляющая будет несущественная. Отсюда вытекает причина использования структурированых сеточных построителей в задачах газовой динамики и проблемы использования неструктурированых непрямоугольных сеток – плохая сходимость разностных схем, увеличение времени расчета, расчетных мощностей, падение качества моделей(из-за введения дополнительных ограничений).

Геометрия построеная на предыдущем этапе передается в сеточный построитель, где осуществляется разбивка её на блоки, привязка блоков к геометрии и заполнение блоков сеткой.

Характерное сгущение стенки вдоль стенки сопла, это необходимо для корректного использования модели турбулентности в пристеночном слое вязкого газа. Для моделирования вихреобразования уравнение Навье-Стокса дополняется моделью турбулентности, дополнительное сгущение сетки обусловлено сложностью моделирования движения газа вблизь стенки сопла. На стенке сопла скорость движения газа равна нулю, а поток имеет большую скорость движения. В следствии большой разницы скоростей образуются сильные завихрения, которые в свою поджимаются потоками газа от оси симетрии сопла в направлении стенок,где опять же сообщают дополнительные возмущения движущемуся газу.

В используемом решателе есть значение определяющее точность моделирования и корректность используемой модели турбулентности, безразмерное расстояние до стенки [6]:

,



где скорость потока осредненная по касательным напряжениям,



кинематическая вязкость,



расстояние от стенки,



y+≤27

Для моделирования турбулентности используется дополнительное мельчение сетки вдоль стенок твердых тел с коэффицентом роста ячеек 1.2 и начальной высотой ячейки 10-5 м, для избежания численых ошибок, вызванных ростом ячеек и некомфорностью сеток пограничный слой начинается на входной границе расчетной области и заканчивается в выходной. Для данной расчетной модели, таким образом выбираем для дальнейшего расчета модель турбулентности .



## Выбор модели и допущений

Для решения задачи был выбран решатель по давлению, для решателя по давлению есть вероятность полного схождения решения. Решатель по плотность решает все уравнения одновременно, то есть осуществляется подход типа «предиктор-корректор», в то время как решатель по давлению решает все уравнения последовательно. Но после изменения основного метода решения на парный уравнение движения и уравнение неразрывности решаются одновременно.

Решатель по плотности изначально разрабатывался для решения высокоскоростных задач и так же известен как алгоритм расщепления.

В качестве настроек модели или включаемых в решение уравнений были выбраны уравнение энергии и модель турбулентности . Уравнение энергии позволяет учитывать сжимаемость рабочего тела, а выбраная модель турбулентности является хоть и двухпараметрической, но при этом не очень требовательна к ресурсам , когда у модели . Двихпараметрическая модель турбулентности подразумевает добавление в решатель двух дополнительных уравнений.



В реальной постановки задачи существуют лишь квазистационарные процессы – очень медленно меняющиеся или неизменяющиеся в каком-то интервале времени. Решатель по псевдовремени реализует решение задачи в квазистационарной постановке

Для решения задачи используется неявная разностная схема, её приемуществом над явной разностной схемой является безусловная устойчивость и более высокая скорость сходимости, задача не так чувствительна к числу Куранта. Это означает что в условиях расчета исключается возможность появления ячеек нулевевого объема и «проскакивание» объема газа через одну ячейку за одну итерацию, те число Куранта – некий критерий физичности решаемой задачи. В общем и целом решатель унаследовал все «плюсы и минусы» метода распада-разрывов:

- явные и неявные разностные схемы

- граничные условия

- методы решения уравнений

- апроксимация по времени и пространству

- свойства монотонности решения

Монотонной называется схема, которая не приводит к появлению дополнительных экстремумов по сравнеию с точным решением и не увеличивает абсолютные значения этих экстремумов. Расчет с выделением поверхности разрыва(считаются 2 области по отдельности,после чего решения «сшиваются») и методы сквозного счета(поверхность разрыва «размывается» на несколько соседних ячеек) [7]. В данной задаче выбрана схема сквозного счета и апроксимация второго порядка «против тока».

По картинам течения можно увидеть ключевую особенность методов сквозного счета, при которой скачки уплотнения (поверхности разрыва) «размываются» на несколько соседник ячеек. Толщина поверхности разрыва при нормальных условиях для газов примерно равна м. Дальнейшее мельчение сетки не уточнит результатов расчета скачков,а лишь увеличит толщину слоя размытых ячеек и увеличит время расчета. Хорошо с этой проблемой борется «метод сшивки решений», но при всем при этом они развиты не настолько хорошо и используются куда реже. Существенным недостатком «метода сшивки решений» являются осцилляции газодинамических параметров в месте объединения решений, иногда существенно сказывающихся на результатах расчета,для борьбы с ними надо обладать опытом работы с данным методом. При неправильном осреднении осцилляций газодинамических параметров можно получить результаты различающиеся с реальным значениями до 1.5 раз.



На рисунке 2 приведены некоторые результаты моделирования, полученные автором.

На рисунках отображено развитие течения в различные моменты времени, при этом давление в ресивере для верхнего и нижнего ряда совпадает. Слева от оси симметрии представлено распределение статического давления в диапазоне 0..1 ата, справа изолинии распределение чисел Маха от 0 до 1. Выбор способа отображения результатов обусловлен необходимостью наглядного представления результатов моделирования.

В данном случае авторами проводилось исследование влияния формы торца (наличие или отсутствие выступа сопла) на характер развития течения.

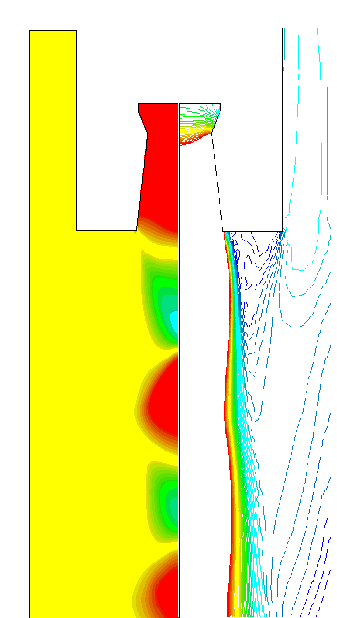
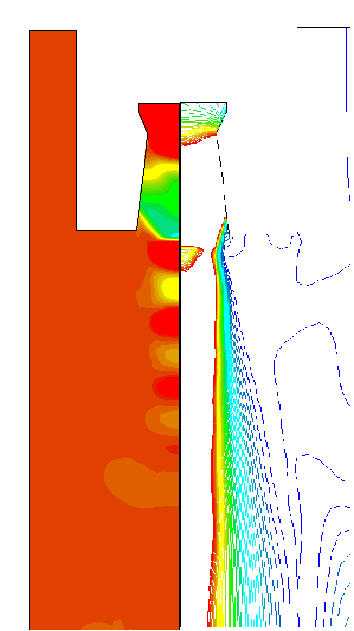
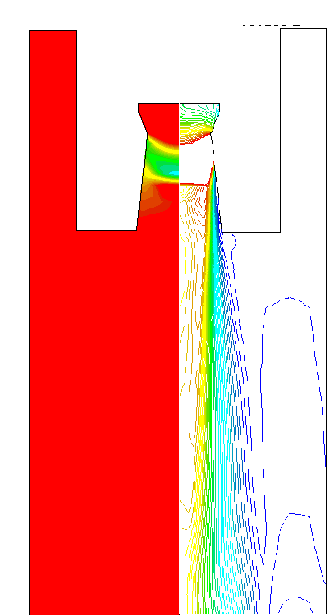
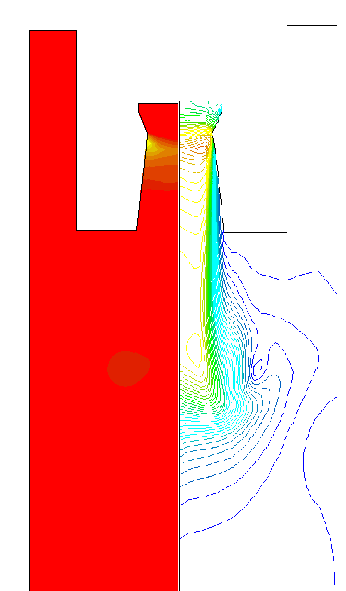
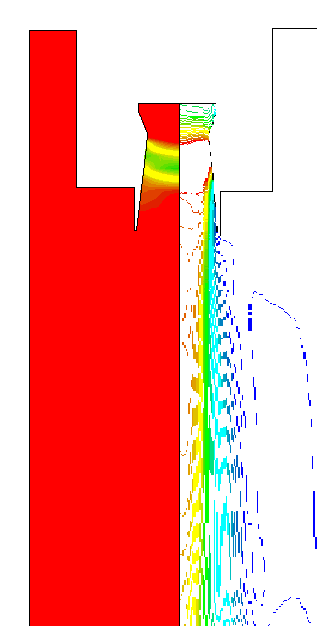
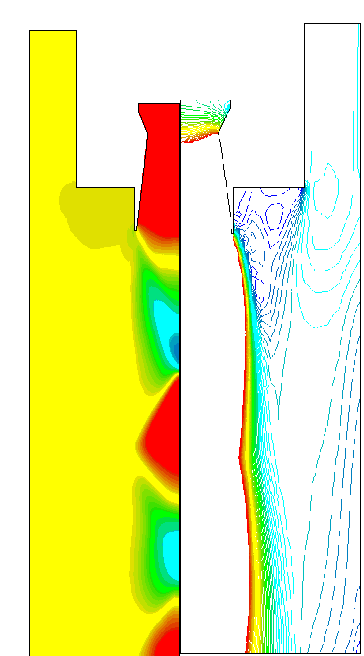
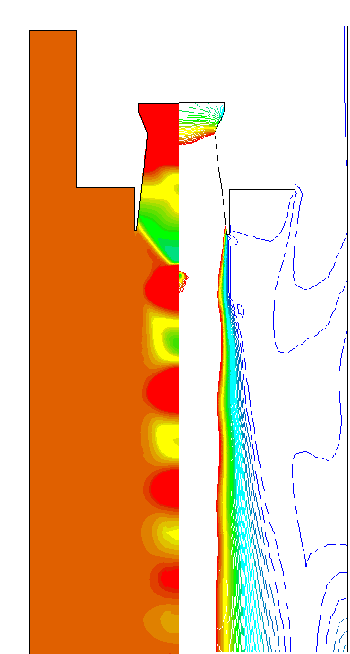
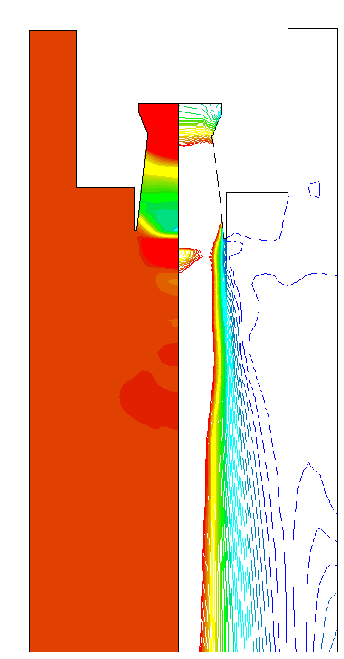


Рисунок 2 – некоторые результаты численного моделирования

# Глава 3. Описание расчетно-экспериментальной модели

Расчетно-экспериментальная модель представляет собой установку, состоящую из сопла Лаваля, специальным образом закрепленного в прозрачной трубе, выполненной из оргстекла, с относительно небольшим зазором. На рисунке 2 представлен схематичный вид установки и исследуемого сверхзвукового течения.

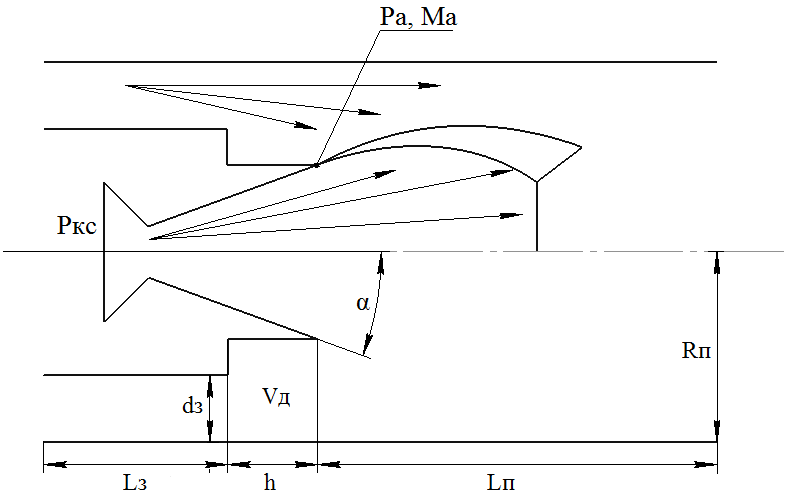


Рис. 3 – Схема течения и экспериментальной установки

Анализ экспериментальных данных показал, что на процесс формирования структуры течения оказывает существенное влияние кольцевой зазор, определяемый длиной (Lз) и шириной (dз). В процессе истечения струи в полость за счет эжектирующей способности струи устанавливается пониженное давление в заторцевом объеме (Vд). При достаточном размере проходного сечения газ извне будет поступать в зазор, в результате чего установится дозвуковой поток (рисунок 2) со скоростью течения М=0,2-0,3. С уменьшением ширины (dз) кольцевого зазора возможно появление автоколебательного режима истечения. Поиск сочетаний определяющих параметров установки для которых реализуется автоколебательный режим является актуальной научной задачей в прикладном аспекте.

Основной целью работы является нахождения некоторых зависимостей между параметрами струи и геометрическими характеристиками установки, например, нахождение связи между эжектирующей способностью струи, длинной(Lз) и шириной зазора(dз). Нахождение критериальных зависимостей для геометрических характеристик установки, характеристик струйного течения и возможностью образования автоколебательного режима. Определение параметров автоколебательного режима по геометрическим и струйным характеристикам. Нахождение дополнительных составляющих силового воздействия на сопловую установку помимо реактивной силы создаваемой соплом.

Далее на рисунках приводится схематичное отображение развития сверхзвукового течения в установке.

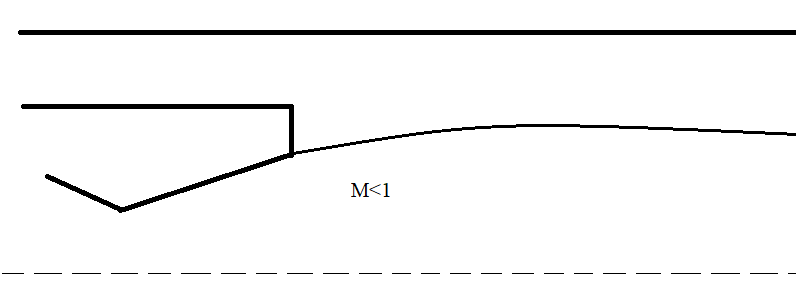


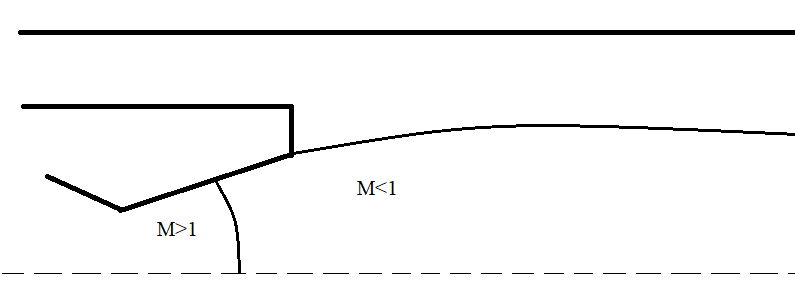
Рис. 4а – дозвуковое течение

Рис. 4б – течение с прямым скачком уплотнения

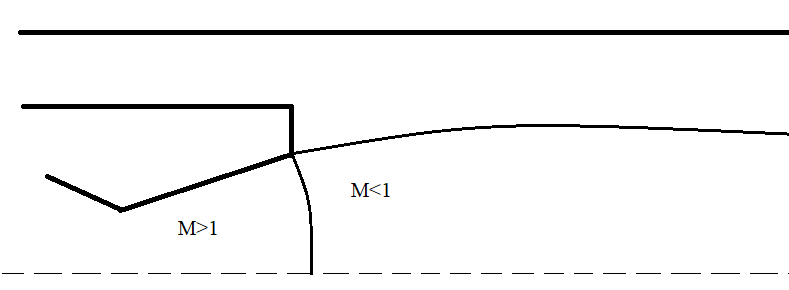


Рис. 4в – режим запуска сопла

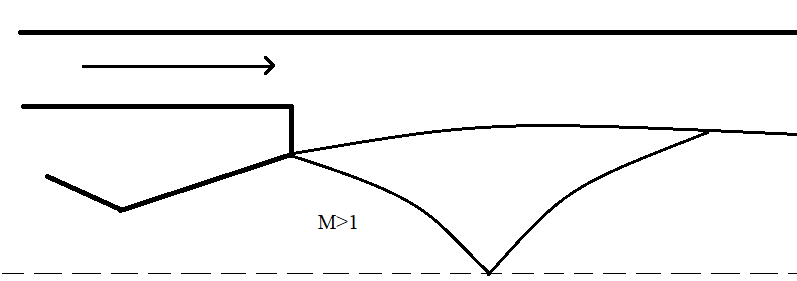


Рис. 4г – режим перерасширения

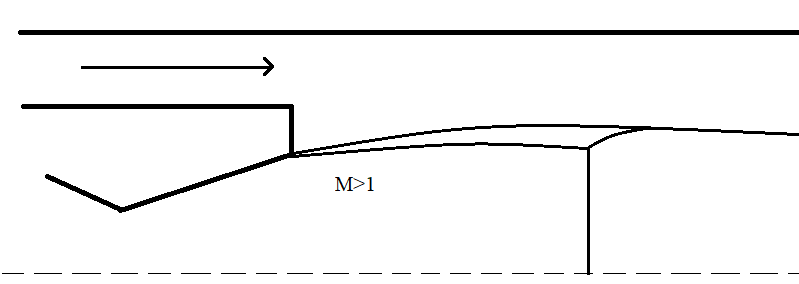


Рис. 4д – расчетный режим

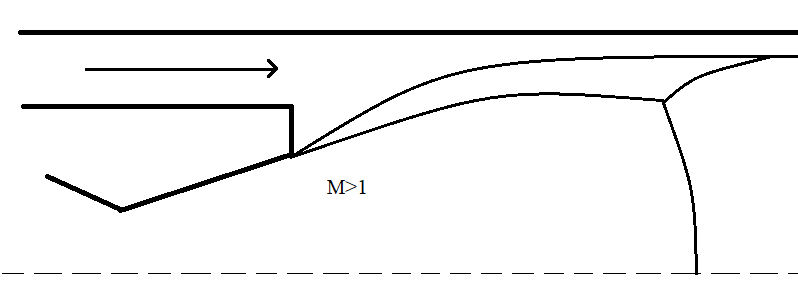


Рис. 4е – режим недорасширения

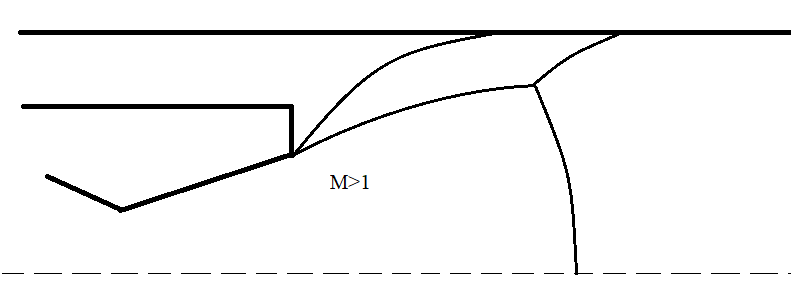


Рис. 4ж – режим сильного недорасширения

На режиме, изображенном на рисунке 4г появляется эжекционное течение в кольцевом зазоре. Далее, с увеличением давления сопло переходит в расчетный режим (Рис. 4д). При увеличении давления в ресивере сопло переходит в режим недорасширения (Рис. 4е). Под действием эжектирующей способности струи давление в подторцевом пространстве падает, в следствии чего течение переходит в режим сильного недорасширения с полным перекрытием трубы в установке струйным течением (рис. 4ж). Дальнейшее увеличение давление в ресивере и/или уменьшение площади проходного сечения кольцевого зазора приведет к существенному понижению давления подторцевом пространстве. Граница струи, формирующаяся с кромки сопла, получит расширение характерное для истечения струй в вакуум, в результате чего вероятно отклонение граничной трубки тока в сторону к торцу установки и возникновение эффектов «прилипания» течения к торцевой плоскости. Давление в подторцевом пространстве измениться от сильного разрежения до повышенного в нескольких атмосфер, т.о. возможно возникновение противотечений в кольцевом зазоре, а сверхзвуковая струя переходит в режим перерасширения (рис. 4г). Далее процесс зацикливается между состояниями, изображенными на рисунках 4г-4ж.

В литературе данный эффект принято называют помпажным. Предполагается возможность смещения фаз начала эжекционного течения и его прекращения в зависимости от геометрических и струйных параметров конкретного эксперимента [8], а также возникновения дополнительного катализирующего эжекционного эффекта на более ранних стадиях. В процессе поиска научных работ был проанализирован ряд источников, в которых не удалось обнаружить практических наработок вопросе установления зависимостей между геометрическими характеристиками полости и автоколебательными эффектами. В работе [9] Енютина Г.В., Лашкова Ю.А., Шумилкиной Е.А*.* проводилось исследование эжекторов других компоновок или исследовались другие эффекты. В работе Соколовой Т.Т. [10] проводилось исследование конкретной инженерной задачи, поиск каких-либо критериальных зависимостей, эффектов и явлений не ставился как цель исследования. В работах Продана Н.В. [1,11] наоборот проводилось подробное исследование автоколебательного режима подобной установки, но с закрытой донной частью и без кольцевого зазора. На рисунке 5 приводятся результаты некоторых численных расчетов работы [11]. В работе [1] так же не проводилось исследование поведения системы при более сильном недорасширении струи.

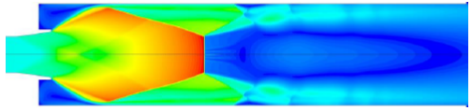
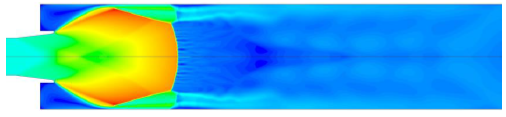
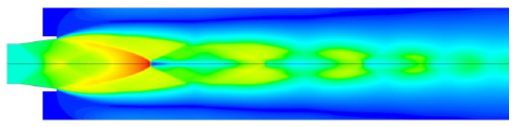


Рисунок 5 – Результаты численного расчета конструкции с закрытой частью

Для обоснования результатов, полученных с помощью численного моделирования, авторы планируют создание экспериментальной установки для подтверждений и валидации численных расчетов. Если в процессе работы будет обоснована возможность появления исследуемых эффектов на установках малой скорости (М=1.05) и относительно небольших давлениях в конфузоре, будут проведены эксперименты на базе аэродинамической лаборатории БГТУ «Военмех». На рисунке 6 представлено схематичное изображение экспериментальной установки, где 1 – сопловой блок, 2 – прозрачная труба, 3 – место установки дополнительного гидравлического сопротивления.

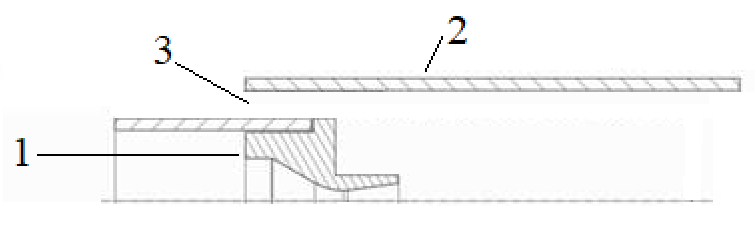


Рисунок 6 – Схема экспериментального стенда

Расчетно-экспериментальная модель представляет собой установку, состоящую из соплового блока, специальным образом закрепленного в прозрачной трубе, выполненной из оргстекла, с относительно небольшим зазором. Имитация различной длины и ширины кольцевого зазора возможна за счет создания дополнительного гидравлического сопротивления эжектируемому газу экспериментальную установку предполагается оснастить набором перфорированных или пористых заглушек (рисунок 7) в зазор между установкой и трубой.

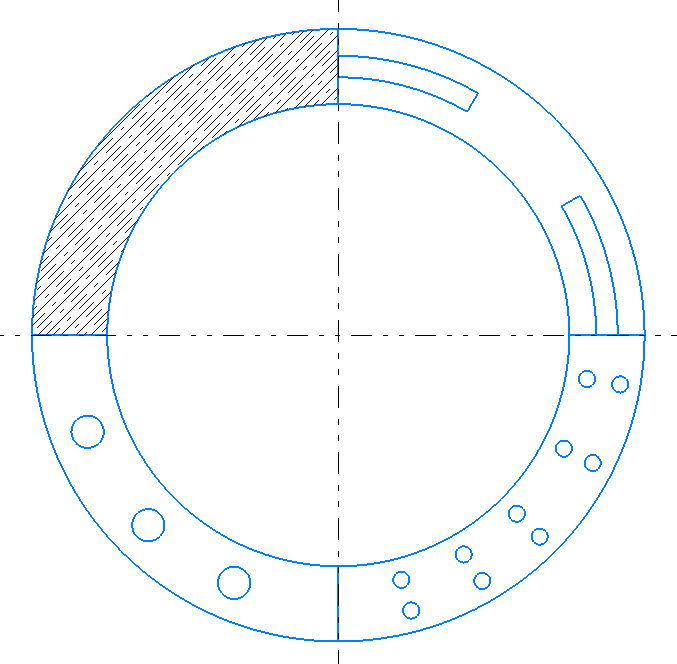


Рисунок 7 – Схематичное изображение вариантов заглушек

# Глава 4. Результаты проведения численного эксперимента

На рисунках 8-14 приводится развитие процесса в зависимость от времени. Отображается в полях скоростей (0-2300 м/с, что соответствует 0-6,5М). Частота колебаний примерно равна 0,06 Гц, указанная частота требует проведения дополнительных исследований и на данный момент не подтверждена с точки зрения физики. После физической картины, показанной на рисунке 7 происходит зацикливание и повторение процесса.

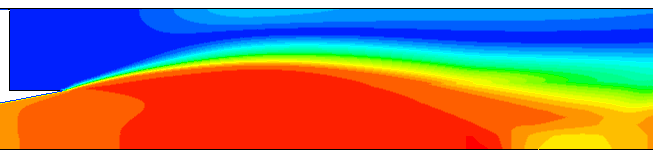


Рисунок 8 – начальный момент времени

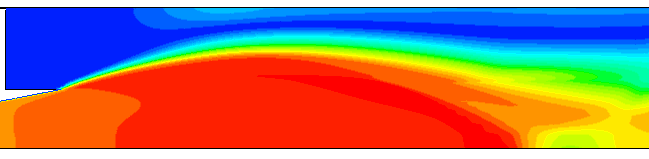


Рисунок 9 – момент времени 0,005 с

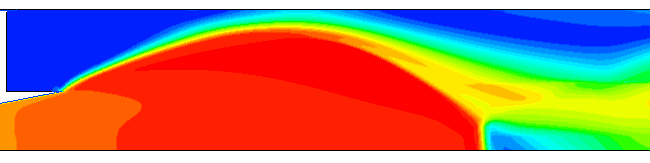


Рисунок 10 – момент времени 0,01 с

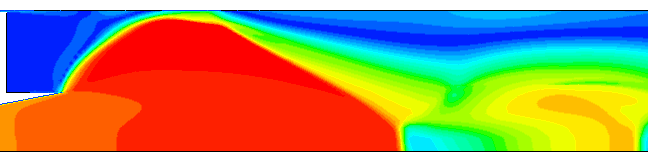


Рисунок 11 – момент времени 0,016 с

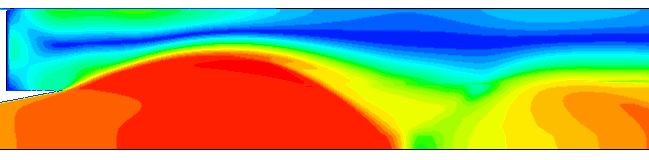


Рисунок 12 – момент времени 0,017 с

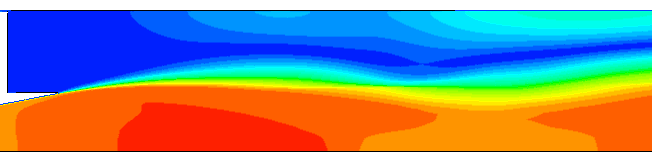


Рисунок 13 – момент времени 0,02 с

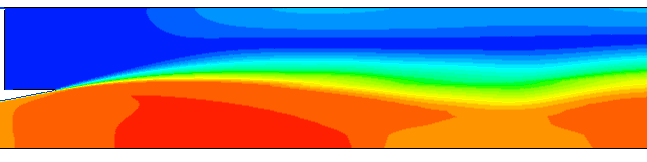


Рисунок 14 – момент времени 0,025 с

Для данного расчетного случая нерасчетность струи n=6,6. Обезразмеренные геометрические характеристики расчетного случая в соответствии с введенными обозначениями [12]: Lз=13,2, h=0,46, dз=2,4, Lп=23,25, Rп=0,009. Дополнительно в конечном сечении трубы было уменьшено проходное сечение с dз=2,4 до dз=1,79.

Далее приводятся результаты расчета для несколько иного расчетного случая: Lз=13,2, h=0,46, dз=1,85, Lп=23,25, Rп=0,009, сужение на конце трубы отсутствует. В данном расчетном случае не удалось достичь исследуемого эффекта даже при нерасчетности струи n=7,72.

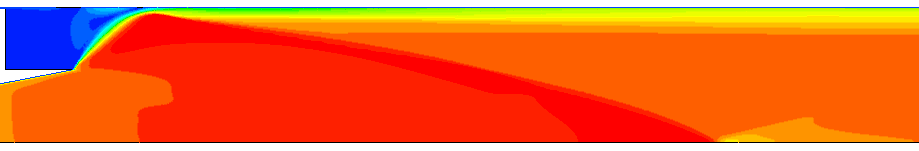


Рисунок 15 – поля скоростей для «неудачного» расчетного случая (0-2300 м/с)

По результатам расчетов можно сделать некоторые выводы: при отсутствии сужения в оконечной части трубы автоколебательных процессов не наблюдается даже при сильном уменьшении проходного сечения трубы. Возможно отсутствие эффекта в большей мере связано с уменьшением проходного сечения трубы, поскольку в таком случае газу остается меньше места для расширения и выравнивания направления течения и, таким образом, большая его часть попадает в подустановочную полость, делая процесс менее зависимым от поступающего через зазор воздуха. Дополнительным доводом к этому предположению может послужить то, что по мере увеличения давления наблюдается уменьшение расхода воздуха через зазор. Для получения большего понимания процессов, протекающих в подобных системах необходимо проведение дополнительных расчетов с меньшим количеством варьируемых параметров.

# Заключение

В работе описан процесс постановки задачи СЭМ сверхзвукового течения в эжекторе, численного моделирования, создания экспериментальной установки и предполагаемого эксперимента.

Решение автором поставленной задачи позволит получить следующие научные результаты:

* Критериальные зависимости параметров сверхзвукового струйного течения от геометрических характеристик трубы эжектора и конфигураций соплового насадка;
* Времена выхода установки на устойчивый эжекционный режим работы, в зависимости от выбранных определяющих параметров;
* Влияние геометрических характеристик кольцевого зазора на возникновение автоколебательного режима истечения;
* Обоснование выбора эквивалентных гидравлических сопротивлений, обеспечивающих реализацию неустановившихся режимов течения.

Результаты проводимого исследования могут быть полезны для разработки методик проектирования различных технических устройств, в которых реализуется принцип эжектора, на ранних этапах разработки новых изделий РКТ различного назначения и применения, а также расширением базы аналитических и полуэмпирических математических моделей, описывающих элементы сверхзвуковых струйных течений.

Был проведен ряд численных экспериментов, по результатам которых можно получить дальнейшее направление развития работы по поиску критериальных зависимостей и нестационарных режимов работы сопла. К сожалению второй расчетный случай на данный момент не увенчался успехом, но продолжаются попытки по поиску автоколебательного режима для данной конструкции. В будущих работах будет учтен факт того, что для получения более полной картины событий и успешного сопоставления результатов необходимо варировать не более одного геометрического параметра за итерацию поиска ключевых характеристик. Таким образом было выявлено, что изменение более одного параметра за одну итерацию расчета приводит к трудносопоставимым результатам и оставляет больше пространства для построения догадок и предположений, а не получения полного и явного ответа на поставленные перед экспериментов вопросы.

**Список использованной литературы:**

1. *Продан Н.В.* Нестационарное взаимодействие сверхзвуковых струй между собой или с преградой: дис. … канд. физ.-мат. Наук. СПб., СПбГУ – 2016. – 141с.
2. *Афанасьев Е.В., Балобан В.И., Бобышев С.В., Добросердов И.Л.* Структурно-элементный метод расчета газоструйных процессов. // Математическое моделирование. – 1998. – Т.10, №1. – С. 31-43.
3. *Бобышев С.В.* Структурно-элементное моделирование газоструйных систем: дис. … д-ра техн. наук. СПб., Балт.Гос.Техн.ун-т. – 2003. – 269с.
4. *Маштаков А.П.* Выделение в сверхзвуковом потоке скачка уплотнения, присоединенного к вершине конуса // «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 15-17 декабря 2015 г. - М.: ИПРИМ РАН, 2015. - 652 с. с. 391-393
5. *Афанасьев Е.В., Балобан В.И., Бобышев С.В., Добросердов И.Л.* Структурно-элементное моделирование газодинамических процессов при старте ракет // Спб., Балт.Гос.Техн.ун-т. – 2004. – 416с.
6. *Батурин О.В., Батурин Н.В., Матвеев В.Н.* Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent: учеб. пос;Самар. гос. аэрокосм. ун-та, - Самара.2009. – 151с.
7. *Исмагилов Д.Р., Сидельников Р.В.* Особенности численного моделирования гиперзвукового обтекания простых тел. //Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей»|№2, 2015. 49 – 54 с.
8. *Бирюков Г.П., Бут А.Б., Хотулев В.А., Фадеев А.С.* Газодинамика стартовых комплексов / М.: Рестарт, 2012. 364 с.
9. *Енютин Г.В., Лашков Ю.А., Шумилкина Е.А.* Исследование эжекторных систем // Сборник работ – Труды ЦАГИ Выпуск 2260. М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1984.
10. *Афанасьев Е. В., Бобышев С. В., Добросердов И. Л., Соколова Т. Т.* Структурно-элементное моделирование эжекционных процессов при старте космических ракет-носителей. // Математическое моделирование. – 2001. – Т.13, №7. – С. 104–109.
11. *Булат П.В., Продан Н.В.* Управление акустическими характеристиками струйных течений. // Технические науки – от теории к практике: сб.ст. по матер. XL междунар. Науч.-пркт. Конф. №11(36). – Новосибирск: СибАк, 2014.
12. *Маштаков А.П., Левченко Г.Е.* Постановка задачи структурно-элементного моделирования сверхзвукового струйного течения в эжекторе. // Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ’2018), 24–31 мая 2018 г., г. Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2018. — С. 64–66.