



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинов)

Факультет «А» РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
Кафедра ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА
Дисциплина Б1.В.03 - Внутренняя газодинамика энергоустановок

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА
на тему:
**ГАЗОДИНАМИКА НАЧАЛЬНЫХ УЧАТСКОВ
СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ**

(пояснительная записка)

Студент группы
А9М31

подпись, дата И.А. Мачульский

Руководитель

подпись, дата В.Н. Емельянов

Санкт-Петербург, 2018

Реферат

Пояснительная записка 18 стр., 5 рис., 00 табл., 9 источников,

ЧИСЛО МАХА JETWIN СВЕРХЗВУКОВЫЕ СТРУИ

Цель работы — расчёт сверхзвуковых струй при различных параметрах стандартной атмосферы. В работе используется маршевый метод, основанный на технологии контрольного объема с вычислением потоков по схеме распада разрыва, что позволяет получать результаты за короткое время с большой точностью. В рамках работы проведены расчеты сверхзвуковых струй при различных параметрах стандартной атмосферы.

СОДЕРЖАНИЕ

Нормативные ссылки	4
Определения, обозначения и сокращения	5
Введение	6
1 Работа в программе JETWIN.	7
1.1 Начало работы	7
2 ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУ- ЛЕНТНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ	12
2.1 Классификация струйных течений	13
2.2 Структура турбулентной струи	14
2.2.1 Условия истечения	14
2.2.2 Дозвуковая струя	15
2.2.3 Сверхзвуковая струя	16
Заключение	17
Список использованной литературы	17

Нормативные ссылки

Настоящая пояснительная записка составлена в соответствии со стандартом организации:

БГТУ.СМК-П-4.2-12 ПОЛОЖЕНИЕ ПО СОДЕРЖАНИЮ, ОФОРМЛЕНИЮ, ОРГАНИЗАЦИИ ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ И КУРСОВЫХ РАБОТ

При выполнении курсового проекта и оформлении пояснительной записки руководствовались следующими стандартами:

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.

Определения, обозначения и сокращения

В настоящей пояснительной записке применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Перечень обозначений и сокращений, применяемых в данной
пояснительной записке

Обозначения

γ	—	показатель адиабаты
ν	—	кинематическая вязкость
Re	—	число Рейнольдса
M	—	число Маха
P	—	давление

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы - расчёт сверхзвуковых струй при различных параметрах стандартной атмосферы. В работе используется маршевый метод, основанный на технологии контрольного объема с вычислением потоков по схеме распада разрыва, что позволяет получать результаты за короткое время с большой точностью. В рамках работы проведены расчеты сверхзвуковых струй при различных параметрах стандартной атмосферы.

1 Работа в программе JETWIN.

Приложение предназначено для расчета стационарных сверхзвуковых течений идеального газа. Программа служит для расчёта сопловый и струйных течений в плоской или осесимметричной постановках. Используется маршевый метод, основанный на технологии контрольного объема с вычислением потоков по схеме распада разрыва, что позволяет получать результаты за короткое время с большой точностью.

1.1 Начало работы

Система меню приложения имеет три раздела:

1. Раздел меню Файл предназначен для общего управления файлами. Оно содержит следующие команды: о команда Создать предназначена для открытия диалогового окна "Исходные данные"; о команда Сохранить слой сохраняет распределение газодинамических параметров текущего слоя (сечения) в текстовый файл в виде файла начальных данных (этот файл можно будет использовать в качестве начальных данных), под именем, которое можно указать в появившемся стандартном диалоговом окне (возможно, указав и новый путь для сохранения файла); о команда Сохранить поле сохраняет распределение параметров поля течения (выходные данные) файл (для обработки данного файла лучше всего использовать программу TecPlot), под именем которое также можно указать в появившемся стандартном диалоговом окне; о команда Выход завершает работу и закрывает окно программы.

2. Раздел меню Расчет позволяет управлять процессом счета, содержит следующие команды: о команда Пуск запускает процесс расчета течения; о команда Стоп приостанавливает процесс расчета течения; о команда Обновить возвращает в исходное состояние;

3. Раздел меню Справка содержит команды: о команда Описание открывает описание программы; о команда О программе выводит диалоговое окно с номером версии и информацией об авторских правах. Расчёт начинается с создания нового проекта (Файл > Создать). Открывается окно задания исходных данных рис.1.1. Формирование файла с граничными условиями Граничные условия записываются в отдельный файл с расширением .brd

Файл должен содержать две строки определяющие условия на верхней и нижней границах (для плоской постановки) и на внешней границе и оси (для осесимметричной постановки). Первая строка определяет граничные условия на верхней границе области течения, вторая строка - на нижней границе. Общая структура граничных условий следующая:

1 строка x-координата первой точки верхней границы y-координата

Рисунок 1.1 – Предлагается задать: граничные условия, начальные условия, значения показателя адиабаты, тип течения (плоское или осесимметричное).

первой точки верхней границы Дополнительные параметры

2 строка x-координата первой точки нижней границы y-координата первой точки нижней границы Дополнительные параметры

Возможны различные конфигурации: верхняя и нижняя границы могут быть свободными; одна из границ может быть свободной, а другая - стенкой; обе границы - стенки. В случае задания свободной границы в качестве дополнительного параметра задаётся давление (в Па) на границе. Например: 0 0.1 101325 0 0 101325 означает, что координаты первой точки нижней границы $[0,0]$, а первой точки верхней границы $[0,0.1]$; давление на нижней и на верхней границах одинаковое и равно 1 атм.

В качестве дополнительных параметров может задаваться геометрия канала: дополнительный параметр первой строки для задания верхней стенки, дополнительный параметр второй строки - для нижней. Для задания геометрии стенки используются 3 объекта: прямая, дуга окружности, кривая Безье. Каждый объект имеет свои параметры. ПРЯМАЯ: - адресация к прямой осуществляется с помощью буквы "l" параметрами прямой являются длины катетов: x1 и y1 рис.1.2

- Синтаксис: xA0 yA0 1 x1 y1 Пример: 0 0.1 101325 0 0 1 1 0.3 означает, что верхняя граница свободная (с координатами первой точки $[0,0.1]$ и давлением на границе 1атм), а на нижней границе задана стенка (с ко-

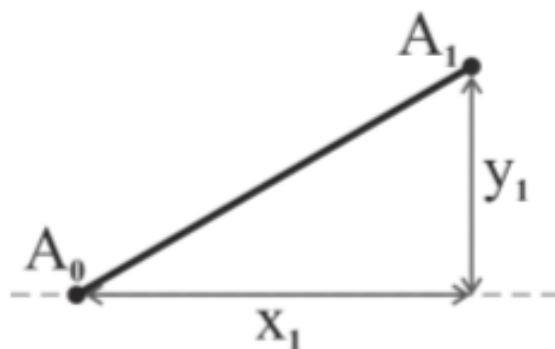


Рисунок 1.2 – Прямая

ординатами первой точки $[0,0]$) и геометрия стенки определяется прямой (буква "l") с параметрами $x_1 = 1$ и $y_1 = 0.3$.

ДУГА ОКРУЖНОСТИ - адресация к дуге окружности осуществляется с помощью буквы "с" параметрами дуги окружности являются радиус R и два угла: f_0 и f_1 (рис. 3) - Синтаксис: $xA_0 yA_0 c R f_0 f_1$

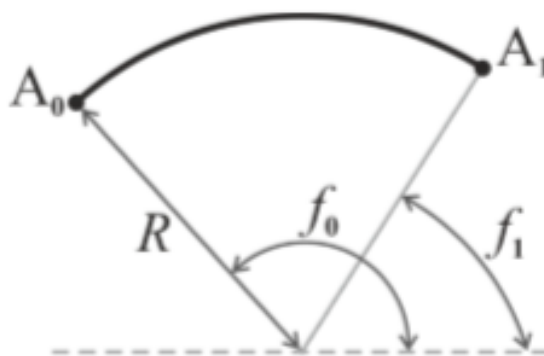


Рисунок 1.3 – Дуга окружности

Пример: 0 0.1 101325 0 0 c 7 2.0218 1.5708 означает, что верхняя граница свободная (с координатами первой точки $[0,0.1]$ и давлением на границе 1атм), а на нижней границе задана стенка (с координатами первой точки $[0,0]$) и геометрия стенки определяется окружностью (буква "с") с параметрами $R = 7$, $f_0 = 2.0218$ и $f_1 = 1.5708$.

КРИВАЯ БЕЗЬЕ - адресация к кривой Безье осуществляется с помощью буквы "b" параметрами кривой Безье являются координаты точек: x' и y' , x'' и y'' , x_1 и y_1 (рис. 4)

Пример: 0 0.1 101325 0 0 b 2 0 5 -1 8 -1 означает, что верхняя граница свободная (с координатами первой точки $[0,0.1]$ и давлением на границе 1атм), а на нижней границе задана стенка (с координатами первой точки $[0,0]$) и геометрия стенки определяется кривой Безье (буква "b") с параметрами $x' = 2$, $y' = 0$, $x'' = 5$, $y'' = -1$, $x_1 = 8$, $y_1 = -1$.

Для описания сложной геометрии стенки возможно произвольное ком-

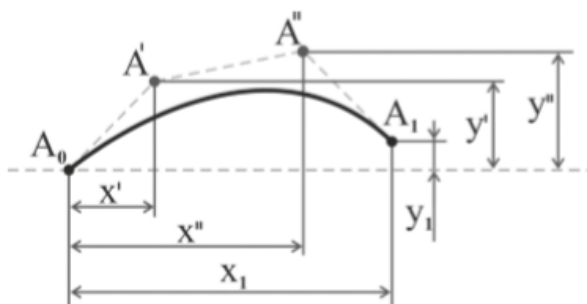


Рисунок 1.4 – кривая Безье

бинирование объектов: прямая, дуга окружности, кривая Безье. Например: 0 2 101325 0 0 1 1 0 с 2.3 3.0218 2.1 b 0.2 0.25 2 -1 3 -1.7 Формируется стенка на нижней границе (координата начальной точки $[0,0]$), где сначала задаётся прямая ("l 1 0") с параметрами $x_1 = 1$ и $y_1 = 0$; затем задаётся дуга окружности ("с 2.3 3.0218 2.1") с параметрами $R = 2.3$, $f_0 = 3.0218$ и $f_1 = 2.1$; и завершает построение стенки кривая Безье ("b 0.2 0.25 2 -1 3 -1.7") с параметрами $x' = 0.2$, $y' = 0.25$, $x'' = 2$, $y'' = -1$, $x_1 = 3$, $y_1 = -1.7$. Последняя точка объекта служит начальной для следующего.

Профиль рассматриваемый в примере стенки изображён на 1.5



Рисунок 1.5 – Красная прямая является входной границей расчётной области с координатами нижней точки $[0,0]$ и верхней точки $[0,2]$.

В случае осесимметричного расчёта нижняя граница не должна выходить в отрицательные значения по y . Программа создана для расчёта стационарных сверхзвуковых течений, и в случае замедления потока до дозвуковых скоростей может вылететь. Формирование файла с начальными условиями (распределение параметров в начальном сечении) Начальные условия записываются в отдельный файл с расширением .DAT Файл с начальными условиями содержит 4 столбца данных: Число Маха $tg\varphi$ Давление Плотность Количество строк определяет число равномерных разбиений начального сечения по оси ординат. Число Маха: $M = \omega/a$, где ω - скорость потока; $a = \sqrt{\gamma RT}$ - местная скорость звука. $tg\varphi = u/v$ - тангенс угла направления потока, где u и v - проекции скорости потока ω на оси

координат. Давление в паскалях. Плотность в кг/м³.

Пример: 4.200860 0.204028 5056.414841 0.266280 4.183715 0.203835
5170.371926 0.270553 4.166763 0.203643 5285.835253 0.274855 4.150000
0.203452 5402.808361 0.279186 4.133424 0.203260 5521.294673 0.283546
4.117029 0.203069 5641.297493 0.287934 4.100814 0.202879 5762.820005
0.292351 4.084774 0.202689 5885.865281 0.296796 4.068907 0.202499
6010.436277 0.301270 4.053210 0.202309 6136.535834 0.305771

Означает, что начальное сечение будет разбито на 10 точек (т.к. число строк равно 10). Проведение расчёта Запуск расчёта осуществляется нажатие на кнопку "Пуск". Начинается расчет, в графической области появляются сечения в которых расчёт уже закончился. В любой момент расчёт можно закончить, нажав на кнопку "Стоп".

Для дальнейшей работы по визуализации расчёта необходимо сохранить результаты: Файл> Сохранить поле. Вкладка "Сохранить слой" позволяет сохранить параметры в последнем сечении в формате начальных условий для последующего расчета в программе. Обработка результатов Результаты расчёта сохраняются в директории с программой в формате *tec*

Для визуализации расчётов можно воспользоваться программами : - *Tecplot* - *missfild.m* (самописная программа для *Matlab*). Для работы с программой *missfild.m* необходимо

1. провести ручное редактирование файла с результатами расчёта: в этом файле должны быть закоментированы (символом %) первые 2 информационных строки;
2. после запуска программы *missfild.m* и загрузки файла с результатами расчёта появляется диалоговое окно "I J data" в котором нужно указать количество разбиений начального сечения по оси ординат (I) и количество сечений по оси абсцисс (J).

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Струйные течения являются распространенной формой движения жидкости и газа в природе и технике и характеризуются широким разнообразием. Большинство струйных течений, встречающихся в природе и технике, являются турбулентными. Турбулентность оказывает влияние на процессы смешения, горения, генерации шума, распространение излучения и перенос частиц дисперсной примеси.

К настоящему времени разработано большое количество полуэмпирических и численных методов расчета течения в газовых струях, дающих возможность рассчитать ламинарные и турбулентные, дозвуковые и сверхзвуковые (в том числе нерасчетные) струи с учетом двухфазности, химических реакций в слое смешения, неравновесности течения и других процессов. В имеющихся расчетных методах для получения решения используются эмпирические законы турбулентного перемешивания, скорости химических реакций, интенсивности излучения, полученные в условиях, не позволяющих считать эти законы универсальными.

Традиционные модели турбулентности не описывают многие эффекты (даже на качественном уровне), связанные с вихревой структурой и теплообменом в трехмерных струйных течениях. Для повышения точности численного моделирования и повышения информативности описания турбулентных течений жидкости и газа вместо решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых при помощи той или иной модели турбулентности, используются методы прямого численного моделирования и моделирования крупных вихрей.

В данной главе излагаются некоторые сведения о теории турбулентных струйных течений, а также обсуждаются модели и методы расчета параметров турбулентных струй различного класса (интегральные методы, полуэмпирические модели турбулентности, прямое численное моделирование, моделирование крупных вихрей). На основе сравнения расчетных и экспериментальных данных выявляются их достоинства и недостатки. Для анализа расчетных методов используются следующие критерии: полнота и достоверность получаемой информации (степень адекватности модели); степень универсальности модели (возможность использования в расчетах различных типов турбулентных струй); универсальность и количество опытных зависимостей, вводимых в модель; простота вычислительной процедуры и программной реализации; наличие и объем информации, получаемой в процессе расчета.

2.1 Классификация струйных течений

Струя представляет собой форму течения жидкости (газа), при которой жидкость (газ) течет в окружающем пространстве, заполненном жидкостью (газом) с отличающимися от струи параметрами (скоростью, температурой, плотностью, составом). В приближенной модели течения идеальной жидкости граница струи является поверхностью тангенциального разрыва и вещество струи не смешивается с веществом окружающего пространства. В реальных течениях ввиду неустойчивости тангенциального разрыва и влияния вязкости между струей и окружающим ее внешним пространством возникает слой вязкого перемешивания, в котором имеют место непрерывные изменения параметров течения, а также происходит генерация вихревых структур. При этом ширина области смешения вдоль направления распространения струи увеличивается, а поля скорости и других газодинамических переменных постепенно сглаживаются. При моделировании струйных течений рассматриваются изменения параметров потока как в самой струе, так и в окружающей среде.

Классификация струйных течений проводится по наиболее существенным признакам, характеризующим течение в струе.

Практическое значение имеют струи, вытекающие из сопла или отверстия в стенке сосуда. В зависимости от формы поперечного сечения отверстия (сопла) различают круглые, квадратные, плоские и другие виды струй, а в зависимости от направления скорости течения на срезе сопла — осевые, веерные и закрученные струи.

В соответствии с характеристиками вещества рассматриваются струи жидкости, газа и плазмы. В особый класс выделяются двухфазные струи, например, струи газа, содержащие жидкие или твердые частицы, или струи жидкости, заполненные пузырьками газа.

Сжимаемость среды характеризуется числом Маха (отношение скорости истечения струи к скорости звука на срезе сопла). В зависимости от значения числа Маха на срезе сопла различают дозвуковые струи ($M < 1$) и сверхзвуковые струи ($M > 1$). Такая же классификация в зависимости от числа Маха проводится и для скорости среды, в которую вытекает струя.

В зависимости от направления скорости течения жидкости (газа) в окружающей среде различают струи, вытекающие в спутный (направленный в ту же сторону), встречный и сносящий потоки (например, струя жидкости, вытекающая из трубы во внешний поток и направленная, соответственно, по течению, против течения и под углом к скорости внешнего течения). При идентичном составе жидкости (газа) в струе и окружающей ее неподвижной среде струя называется затопленной (например, струя воздуха, вытекающая в неподвижную атмосферу). Струя называется свободной, если она вытекает в среду, не имеющую ограничивающих

поверхностей, полуограниченной, если она течет вдоль плоской стенки, и стесненной, если она вытекает в среду, ограниченную твердыми стенками (например, струя, вытекающая в трубу большего диаметра, чем диаметр сопла).

В соответствии с физическими особенностями веществ струи и внешней среды различают смешивающиеся струи (струя газа, вытекающая в воздух) и несмешивающиеся струи (струя воды, вытекающая в атмосферу). Поверхность несмешивающейся струи является неустойчивой, и на некотором расстоянии от среза сопла струя распадается на капли. Дальностью такой струи, под которой понимается расстояние, на котором струя сохраняется монолитной, зависит от физических свойств ее вещества, кинетической энергии и уровня начальных возмущений в сопле.

В случае, когда вещество струи смешивается с веществом внешней среды, на поверхности струи образуется область вязкого перемешивания (струйный пограничный слой). В зависимости от режима течения в струйном пограничном слое различают ламинарные и турбулентные струи. Ламинарные струи являются, скорее, исключением, а не правилом. Большинство струйных течений жидкостей, газов и плазмы, встречающихся в природе и технике, являются турбулентными. Турбулентность оказывает влияние на процессы смешения, горения и переноса частиц дисперсной примеси.

При наличии в продуктах сгорания топлива продуктов неполного окисления в струйном пограничном слое происходит догорание продуктов неполного окисления в воздухе, заносимом сюда турбулентными вихрями из окружающей среды, приводя к формированию диффузионного факела.

Струя, вытекающая из сопла реактивного двигателя летящего самолета, представляет собой пример сверхзвуковой турбулентной струи, вытекающей в спутный поток, который, в зависимости от скорости полета самолета, является дозвуковым или сверхзвуковым.

2.2 Структура турбулентной струи

2.2.1 Условия истечения

Начальные условия истечения характеризуются распределениями в выходном сечении сопла средней скорости, температуры, энергии и масштаба турбулентности. Применительно к затопленным струям с почти равномерными распределениями параметров по сечению (вне пограничного слоя на срезе сопла) для характеристики начальных условий истечения используются число Рейнольдса ($Re_a = u_a d_a / \nu$), число Маха ($Ma = u_a / a$), степень неизотермичности ($\vartheta_a = T_a / T_\infty$), степень турбулентности в центре выходного сечения сопла ($\theta_a = u' / u_a$), толщина вытеснения, толщина потери импульса и формпараметр пограничного слоя в выходном

сечении сопла (δ^* , δ_a и $H = \delta^*/\delta_a$). К начальным условиям истечения относится также режим течения в пограничном слое в выходном сечении сопла (ламинарный, переходный, турбулентный). Для струи в спутном потоке требуется знать параметры спутного потока в плоскости выходного сечения сопла и параметр спутности ($m = u_\infty/u_a$). В струях переменного состава задается отношение плотностей вещества струи и спутного потока.

При моделировании коаксильных струй используется геометрический параметр, равный отношению диаметров внутреннего и внешнего диаметров сопла.

Геометрические параметры устройства, формирующего струю (форма поперечного сечения струи в ее начальном сечении), оказывают существенное влияние на ее характеристики. Вместо сопла иногда используется диафрагма с отрывным характером обтекания острой кромки для генерации плоской, круглой и эллиптической струи. Для сравнения характеристик пространственных и круглых струй в качестве характерного геометрического параметра сопла сложной формы используется эквивалентный диаметр d_e , который соответствует площади его выходного поперечного сечения ($S = \pi d_e^2/4$).

В общем случае начальные условия истечения определяются заданием профилей скорости, температуры, концентрации примеси, интенсивности и масштаба турбулентности на срезе сопла, а также числа Рейнольдса. При числе Рейнольдса $> 10^4$ струя считается полностью турбулентной.

2.2.2 Дозвуковая струя

Теоретические исследования гидродинамической устойчивости ламинарных струй показали их сильную неустойчивость, обусловленную специфической формой профиля продольной скорости с точкой перегиба. Экспериментальные исследования также зафиксировали быстрый переход к турбулентности при сравнительно небольших числах Рейнольдса. Струя обычно считается турбулентной при $Re > 10^4$, что выполняется в большинстве практических приложений.

В дозвуковой турбулентной струе, истекающей в затопленное пространство или спутный поток, давление на срезе сопла p_a устанавливается равным давлению в окружающей среде p_∞ . Течение газа в струе является близким к изобарическому, и изменение параметров струи вызывается процессами турбулентного перемешивания.

Для расчетов турбулентных струй газа используется подход, основанный на расчетах характеристик соответствующих струй несжимаемой жидкости (введение эквивалентной струи несжимаемой жидкости, гипотеза универсальности эжекционных свойств).

Численные методы позволяют рассчитывать непрерывную деформацию

цию профилей газодинамических параметров вниз по потоку, не требуя деления струи на участки. В качестве исходного сечения для дозвуковых струй принимается срез сопла (начальное сечение изобарического участка), а изобарическая турбулентная зона смешения рассматривается как единая область.

2.2.3 Сверхзвуковая струя

Сверхзвуковая неизобарическая турбулентная струя представляет собой сложный газодинамический объект и характеризуется сильной пространственной неоднородностью полей скорости и давления, которая обусловливается наличием системы скачков уплотнения и сдвиговых слоев с большими градиентами скорости. Пространственная неоднородность потока способствует развитию неустойчивости, приводящей к интенсивным пульсациям скорости и давления, а формирование цепи обратной связи — к развитию автоколебаний, в результате которых в спектрах пульсаций появляются интенсивные дискретные составляющие

В случае, когда давление в сверхзвуковой струе на срезе сопла p_a отличается от давления в окружающей атмосфере p_∞ , струя называется нерасчетной, и к числу параметров, характеризующих течение в струе, добавляется нерасчетность истечения $n = p_a/p_\infty$, определяющая картину ударных волн в струе и во внешнем пространстве. При сверхзвуковых скоростях истечения из сопла давление на выходе не зависит от давления в окружающей среде, поэтому нерасчетность истечения принимает любые значения, как меньшие единицы (на режиме перерасширения), так и большие единицы (на режиме недорасширения). При этом различают три режима: $n = 1$ — расчетный режим, $n < 1$ — режим перерасширения и $n > 1$ — режим недорасширения.

Модельные схемы струи отличаются от действительного течения, которое значительно сложнее, однако на их основе удастся создать методики расчета, позволяющие с достаточной степенью точности определить поля скорости, температуры и концентрации в струе и в окружающей среде.

Схема течения в сверхзвуковой изобарической расчетной спутной струе такая же, как и в дозвуковой струе. Скорость течения на оси изобарической струи остается постоянной в пределах начального (изоэнтропического) участка течения, а в дальнейшем монотонно изменяется, стремясь к значению скорости в окружающем пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В своей работе я рассчитывал сверхзвуковые струи при различных параметрах стандартной атмосферы. В работе использовался маршевый метод, основанный на технологии контрольного объема с вычислением потоков по схеме распада разрыва, что позволяет получать результаты за короткое время с большой точностью. В рамках работы проведены расчеты сверхзвуковых струй при различных параметрах стандартной атмосферы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Обзор ЦАГИ. Бюро науч.-техн. информ. Жуковский, 1969. № 290: Исследование течений с газовыми струями за 1953-1968 гг.
2. Дулов В. Г., Лукьянов Г. А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука.Сиб. отд-ние, 1984.
3. Глотов Г. Ф., Фейман М. И. Исследование параметров осесимметричных недорасширенных струй газа, истекающих в затопленное пространство // Учен. зап. ЦАГИ. 1971. Т. 2, № 4. С. 69-75.
4. Глазнев В. Н., Сулейманов Ш. Газодинамические параметры слабонедорасширенных свободных струй. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980.
5. Запрягаев В. И., Солотчин А. В. Экспериментальное исследование влияния шероховатости сопла на продольные вихревые образования в сверхзвуковой струе // ПМТФ. 1997. Т. 38, № 1. С. 86-96.
6. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974.
7. Запрягаев В. И., Солотчин А. В. Трехмерная особенность структуры течения в сверхзвуковой недорасширенной струе // ПМТФ. 1991. № 4. С. 42-47.
8. Запрягаев В. И., Крашенинников В. В., Певзнер А. С. Применение информационноизмерительной системы на основе системы КАМАК в учебных целях // Реализация новой парадигмы образования через образовательную область "технология": Тр. науч.-практ. конф.,г. Новосибирск, 18-19 окт. 2000 г. Новосибирск: Новосиб. гос. пед. ун-т, 2000. С. 136-143.
9. Шеломовский В.В. Сопла, реализующие на срезе поток свободного вихря, и особенности течения в них // Ученые записки ЦАГИ. 1982. 13, № 1. 103-107. 10. Гилерсон А.А., Панченко В.И., Рафиков В.Г., Сериков Р.И., Хайлов В.М. Исследование структуры потока и газодинамических характеристик аэродинамических окон со свободным вихрем // Ученые записки ЦАГИ. 1990. 21, № 4. 104-108.