

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Институт естественных и точных наук  
Факультет Математика, механика и компьютерные технологии  
Кафедра вычислительной механики

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой ВМ,  
д. ф.-м. н., профессор  
\_\_\_\_\_/Ю.М. Ковалев  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

**Исследование газодинамических течений при возмущении плотности в  
тонких протяженных каналах перед фронтами ударных волн**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
ЮУрГУ – 01.03.03.2020.306-01-020.ВКР

Руководитель  
к. ф.-м. н., доцент кафедры ВМ  
\_\_\_\_\_/Н.Л. Клиначева  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы студент группы ЕТ-410  
\_\_\_\_\_/Д.О. Щенников  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролер  
к.ф.-м.н., доцент кафедры ВМ  
\_\_\_\_\_/Н.Л. Клиначева  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Челябинск 2020

## АННОТАЦИЯ

Щенников Д.О. Обтекание тел в сверхзвуковом потоке при наличии тонкой области энерговыведения перед телом. – Челябинск: ЮУрГУ, ЕТ-410, 68с., 8 ил., библиогр. список – 13 наименований, 1 прил.

Дипломная работа выполнена с целью исследования взаимодействия источника энерговыведения с головной ударной волной. В выпускной квалификационной работе проанализирована задача моделирования взаимодействия разреженного канала энерговыведения с головной ударной волной, расположенной прямо перед телом. При помощи программы Microsoft Visual Studio 2019 разработан программный комплекс, реализующий выполнение поставленной задачи.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| АННОТАЦИЯ.....                             | 4  |
| ВВЕДЕНИЕ.....                              | 6  |
| 1.ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....                    | 7  |
| 2.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....                 | 35 |
| 2.2 ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД.....                   | 37 |
| 2.3 МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА КРУПНЫХ ЧАСТИЦ..... | 40 |
| 2.4 ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА.....  | 41 |
| 4.РЕЗУЛЬТАТЫ.....                          | 43 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....                            | 47 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                     | 48 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ.....                            | 50 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

Было обнаружено, что тонкий разреженный канал, находящийся в потоке, чья скорость больше скорости звука значительно влияет на режим обтекания тела и иногда приводит к изменению течения целиком. Рассматривается способ применения эффекта, включающего в себя значительное воздействие, которое оказывает поток с модификациями на силу, препятствующую движению тел в жидких и газообразных средах по отношению к телам, имеющим затупленный профиль для управления параметрами объекта, который обтекается, в желании модифицировать способ, которым можно уменьшить лобовое сопротивление летательных аппаратов.

В данной выпускной квалификационной работе изучается формирование режимов обтекания объектов с затупленным профилем, когда в системе динамика переменных не меняется во времени, а также, в случаях при которых поток, движущийся со скоростью больше скорости звука имеет постоянный вытянутый тонкий канал с пониженным параметром плотности, который имитирует источник энерговыделения. Для создания данного разреженного канала можно применять СВЧ-разряд при помощи повышения температуры в газовой среде.

## 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В статье [1] было систематически изучено то, как физико-химические превращения влияют на развитие нестационарных ударноволновых конфигураций в задачах, где происходит обтекание с источником энергии находящимся снаружи при  $\gamma$  в диапазоне от 1.1 до 1.4. Этот подход не использовался ранее. В результате данные которые были получены могут использоваться, например, при разработке новых или улучшении уже существующих способов управления перемещением тела в пространстве имеющим скорость выше скорости звука используя локальное добавление энергии в поток используя СВЧ-разряд или импульс от лазера.

Данное моделирование базируется на Эйлеровой системе уравнений для идеального газа с постоянным отношением удельных теплоемкостей. Моделирование источника энергии происходило с помощью разреженного канала, который был разогрет. Данный способ моделирования источника энергии хорошо показал себя во время моделирования как микроволновых, так и экспериментов с использованием лазера по управлению сверхзвуковыми потоками.

Было обнаружено, что во время первой стадии процесса взаимодействия цилиндрического ударного слоя с источником энергии возникает нестационарная маховская трехударная конфигурация в режиме течения близкого к автомодельному. В расчетах, полученных в процессе моделирования было установлено, что угол, который образовался благодаря фронту предвестника с направлением потока, никак не зависит от  $\gamma$ . Одновременно с этим углы, которые были образованы при помощи падающей волны и направлением потока вместе с направлением линии, практически не зависят от  $\gamma$ . Для тех значений  $\gamma$  которые были рассмотрены на первой стадии было обнаружено, что на изменение силы

сопротивления падение давления торможения не оказывает никакого влияния. Однако, на следующей стадии вихревое воздействие, оказываемое на силу сопротивления, значительно усиливается с уменьшением  $\gamma$ , т. е. для малых  $\gamma$  было выявлено качественно иное поведение силы сопротивления.

Кроме того, было продемонстрировано, что чем меньше  $\gamma$ , тем сильнее эффекты уменьшения сопротивления и падения давления торможения за счет воздействия внешнего источника энергии. Также было продемонстрировано, что чем меньше  $\gamma$ , тем более начинает преобладать механизм падения сопротивления за счет вихревого воздействия.

В работе [2] изучается становление стационарных режимов обтекания при обтекании тел, имеющих затупленный и заостренный профиль в тех ситуациях, когда в потоке, который имеет скорость больше скорости звука все время наличествует источник энергии, смоделированный как тонкий протяженный разреженный канал. Такой канал можно создать как результат нагрева газовой среды при помощи СВЧ-разряда.

Эта статья является продолжением моделирования того, как различные источники энергии воздействуют на обтекание тел при сверхзвуке в целях улучшения управления аэродинамическими свойствами тел. Данное моделирование основано на Эйлеровой системе уравнений для идеального газа, которое было решено численно. Сама постановка задачи и методы для расчета идентичны предыдущей статье. На оси OX были выставлены условия отражения, а на оставшихся границах было задано полное отсутствие отражения в направлении, которое перпендикулярно границе. На поверхностях, тел, которые были рассмотрены были выставлены условия полного отсутствия соответствующих потоков через

границу этих тел. Граничные условия были интегрированы в данный расчет не нарушая консервативность самого расчета.

Разрезанный канал был смоделирован с использованием граничного условия на входной границе, и был разогрет и задан таким же способом, как и в прошлой статье. Энергетические характеристики данного канала были согласованы с параметрами, на областях, которые были разогреты, и были получены в экспериментах где исследовался СВЧ-разряд.

Во всех ситуациях, которые подлежали рассмотрению расчеты проводились до стадии установления стационарного режима обтекания и затем было проведено исследование полученной картины течения при стационарных режимах обтекания тел, которые имеют затупленную и заостренную форму. Во время моделирования отчетливо видно то, что, если источник энергии действует постоянно, то во время становления стационарного режима перестраивается абсолютно всё течение, а также отчетливо видно, что структура течения становится вихревой в области расположенной между головной ударной волной и телом. Одновременно с этим наблюдается изменение формы головной ударной волны, и кроме того можно наблюдать существенное увеличение ее отхода от стационарного положения, которое было установлено без источника энергии. Было выявлено, что при установлении стационарного фронт, принадлежащий головной ударной волне, становится прямолинейным. Вместе с этим было проведено исследование стационарных режимов для разреженных каналов имеющих меньший диаметр. Для этого были использованы сетки, включавшие в себя ячейки меньших размеров.

Проанализировав полученные результаты были получены следующие выводы: для принятого способа моделирования источника энергии, который оказывает постоянное воздействие

стационарные значения для таких параметров как давление торможения и координаты головной ударной волны устанавливаются быстрее, а для таких параметров как значения плотности в точке торможения устанавливаются медленнее. Это связано с тем, что происходит счетное размытие контактного разрыва (границы разогретого канала), которое различается для разных значений радиуса канала. Кроме того, было рассмотрено несимметричное расположение разреженного канала относительно оси ОХ.

Было выявлено, что до того, как стационарный режим установится возникает сложная вихревая структура течения, и вместе с этим можно наблюдать, что вблизи поверхности тела возникает серия слабых ударных волн. До того, как будет установлен стационарный режим такой параметр как давление торможения испытывает на себе несколько колебаний до того, как стационарный режим будет установлен, аналогичное явление наблюдается и с силой сопротивления торцевой поверхности. Когда стационарный режим уже установлен значения параметров давления, торможения и координаты головной ударной волны почти не отличаются от аналогичных параметров если источник имел симметричное расположение. Если же рассматривать значения параметра плотности в точке торможения, то можно обнаружить, что они отличаются разительно, что указывает на то, что стационарное значение температуры торможения уменьшается в случае, когда разреженный канал был расположен несимметрично.

Вместе с этим было рассмотрено стационарное обтекание тела с клиновидным профилем, где угол при вершине был равен  $18.4^\circ$ . При обтекании без источника энергии, можно наблюдать образование присоединенная косая головная ударная волна. Но если в сверхзвуковой поток добавить постоянно действующий источник



энергии, то картина течения значительно изменяется. Ударная волна имеет тенденцию отодвигаться от тела под воздействием разреженного канала, а также происходит излом ее фронта. Далее можно наблюдать установление стационарного режима, в котором головная ударная волна не будет являться присоединенной, кроме того ее фронт также будет являться прямолинейным и для фронта головной ударной волны будет установлен новый угол наклона.

Вместе с этим была обнаружена зависимость, что если головная ударная волна отрывается от тела, то лишь в этом случае происходит уменьшение сопротивления тела, имеющего заостренный профиль.

В статье [3] изучалось то, как и какое воздействие разреженный канал оказывает на обтекание тел с профилем, имеющим клиновидный выступ в сверхзвуковом потоке. Симуляция обтекания базировалась на уравнениях Эйлера, которые были решены численно.

В результате были получены данные описывающие то, как изменилась структура течения, а также была получена информация по параметрам сил сопротивления на поверхности тела в ситуациях, когда головная ударная волна присоединена или наоборот отошла от тела. На оси ОХ были заданы условия отражения, а на остальных границах задавалось отсутствие отражения в направлении, которое было перпендикулярно к границе. На самих границах, относящихся к телу были выставлены условия отсутствия протекания соответствующих потоков через границу данного тела. Источник энергии имел вид протяженного разреженного канала, и задавался при помощи того, что на входной границе изменялись граничные условия.

Благодаря тому, что разреженный канал задавался при помощи граничного позволило сделать размеры расчетной области более оптимизированными. Параметры разогретой области, которая была получена при помощи СВЧ разряда полностью согласовывались с

энергетическими и пространственными характеристиками разреженного канала. При моделировании ну были учтены различия уравнений состояния для идеального газа и уравнения состояния в горячей области. При этом методика расчета идентична методике расчета из предыдущих статей.

При симуляции обтекания в стационарном режиме, где головная ударная волна отошла от тела были получены данные свидетельствующие о том, что взаимодействие разреженного канала и стационарной ударной волны, создает течение имеющее вихревой характер в области, которая расположена между телом и самой головной ударной волной. Было обнаружено, что временное увеличение отхода влево от своего первоначального положения головной ударной волны в стационарном состоянии связано с этим процессом. Данное увеличение тем больше возрастает, чем больше становится пространственная длина области куда выделяется энергия и уменьшается значение, что соответствует тому, что в канале увеличивается температура.

В дальнейшем вихрь продвигается по направлению к телу и происходит дробление данного вихря в непосредственной близости от верхней точки торца тела. Вихревое образование, после взаимодействия с волной разрежения находящейся в верхнем углу тела и отражаясь от торца данного тела, в итоге создает не слабую ударную волну, которая движется по направлению к головной ударной волне. В итоге данная ударная волна объединяется с головной ударной волной. Одновременно с этим головная ударная волна снова оказывается в прежнем положении, при этом вторая ударная волна не оказывает почти никакого влияния на неё.

В непосредственной близости от верхней поверхности тела можно пронаблюдать, то как появляется слабая ударная волна, которая после этого выпадает из рассматриваемой расчетной области после выпадения из этой области вихревого образования. При рассмотрении процесса взаимодействия также можно увидеть, что наблюдается локальная деформация фронта головной ударной волны, и данная деформация

становится больше, с ростом длины разогретой области и с уменьшением значения параметра плотности внутри данной разогретой области.

Кроме того, изучалось и стационарное обтекание тела с профилем, имеющим клиновидный выступ в случае, когда головная ударная волна была присоединена к телу. В этой ситуации можно обнаружить, что отсутствует образование возвратной ударной волны, а также не наблюдается дробление вихря. При наблюдении за тем, как вихрь проходит волну разрежения центр которой находится в верхней точке торца заметно образование акустической волны, которая двигается по направлению к головной ударной волне, а также наблюдается ударная волна, находящаяся в непосредственной близости от верхней поверхности тела, и которая после этого выносится совместно с потоком из расчетной области после того как оттуда выносится вихрь.

Важно обратить внимание на то, что фронт головной ударной волны претерпевает локальную деформацию и вместе с тем наблюдается временный отход этой волны от своего стандартного расположения в стационарном режиме, таким образом ударная волна становится отошедшей. Была установлена зависимость между величинами этих эффектов, длиной канала и температурой в этом канале, т.е. эти эффекты становятся больше с увеличением длины канала и с ростом температуры в нем. А наличие в потоке имеющим скорость больше скорости звука тонкого протяженного разреженного канала при обтекании тел имеющих профили с клиновидными выступами самой разной конфигурации вызывает некоторые эффекты такие как: появление вихря расположенного в области между телом с этим профилем и головной ударной волной, отход головной ударной волны от своего стандартного расположения в стационарном режиме и деформация фронта головной ударной волны.

Кроме того, возникают различные дополнительные ударные волны из-за указанных ранее механизмов, а также рождаются акустические волны, которые расположены в области верхней точки торца.

Проанализировав результаты, которые были получены благодаря численному моделированию воздействия, которое оказывает протяженный тонкий разреженный канал на обтекание тел с клиновидными выступами при скорости потока выше скорости звука были получены выводы, представленные ниже:

- можно добиться уменьшения силы сопротивления поверхности имеющего профиль с клиновидным выступом до 50%;
- для увеличения эффективности воздействия разреженного канала требуется уменьшить плотность газа в этом канале;
- зависимость которая описывает уменьшение силы сопротивления тела, имеющего профиль с клиновидным выступом от синуса угла при вершине данного клина, имеет линейный характер;
- на первом этапе воздействия разреженного канала изменение параметров, характеризующих силы сопротивления поверхности с профилем, имеющим форму клиновидного выступа обуславливается тем, что головная ударная волна отходит от своего стандартного положения при стационарном обтекании;
- на первом этапе угол при вершине клиновидного выступа и радиус разреженного канала не влияют на параметр скорости отхода головной ударной волны, а сам этот параметр не изменяется с течением времени;
- в основном сила сопротивления поверхности с профилем, имеющим форму клиновидного выступа уменьшается за счет воздействия которое оказывает образующийся вихрь, а сила данного вихря возрастает с ростом угла при вершине клиновидного выступа (и с уменьшением значения параметра плотности газа в разреженном канале);
- существует промежуток времени, на котором эффекты, рассмотренные ранее зависят только от степени разреженности газа в канале, и при этом почти не зависят ни от радиуса канала, ни от угла при вершине клиновидного выступа (для ситуаций, когда головная ударная волна отошла от).

В работе [4] имеет большую актуальность в наше время, поскольку в наши дни исследования, посвященные различным воздействиям на газовый поток с идеей изменения и взаимодействия с характеристиками и параметрами этого потока, представляют огромный интерес и актуальность для аэродинамики больших скоростей. Организованные области энерговыделения в потоке газа является одним из этих способов. Энергоподвод в данных локальных областях осуществляется благодаря тому, что осуществляется поглощение электромагнитной энергии в следствие электрического разряда различной природы. Создавая такие области рядом с воздушным транспортом, можно изменять их теплообмен и аэродинамические по своему усмотрению.

При постановке задачи подразумеваем то, что в потоке газа имеющим скорость выше скорости звука имеется локальная область, в которой энергия будет выделяться по заданному закону. Как было продемонстрировано предыдущими экспериментами и моделированиями, таким образом можно смоделировать реально существующий процесс испускания энергии в электрическом разряде. В том случае, когда энергетический источник осуществляет работу в стационарном режиме обтекания, то за этим источником создается след, имеющий низкую плотность и высокую температуру. Данная структура течения уже хорошо изучена если мы говорим о случае, когда форма осесимметрична, и не важно работает в стационарном или в импульсно-периодическом режиме.

Сама задача описывается тем, что плоская ударная волна падает на источник, фронт данной плоской ударной волны перпендикулярен набегающему потоку. Сама же задача основана на системе Эйлеровых уравнений с правой частью которая не равна нулю. Для того что бы построить систему конечно-разностных уравнений к консервативной системе дифференциальных уравнений использовался метод имеющий наименование метода конечных объемов. Как следствие после того как

потока газа про взаимодействовал с локально распределенным источником энерговыделения за ним создается след.

Расчеты были выполнены для случая, когда взаимодействие происходит с плоской ударной волной, которая движется вправо по оси  $Ox$ , с его следом и с источником. В следе, который образуется за источником температура газа повышается, а, следовательно, и падает плотность газа. В итоге после всего этого скачок становится слабее в области следа. В том случае, когда из-за достаточно интенсивного источника происходит разрушение ударной волны, а, следовательно, эта волна становится звуковой волной.

В результате моделирования было исследовано того, как ударная волна взаимодействует с источником, источающим энергию, а также было изучено то, что происходит со следом за источником энерговыделения при различных параметрах источника и потока в рамках уравнений Эйлера.

Так же было продемонстрировано, что ударная волна существенно ослабляется при наличии источника, источающего энергию, а также при интенсивности подвода энергии, которая превышает пороговое значение, разрушает ударную волну.

В работе [5] проводится исследование такого явления, как уменьшение сопротивления при локальном энерговыделении непосредственно перед обтекаемым телом. Сама же цель работы состоит в обнаружении связей между уменьшением или увеличением сопротивления тела, и вместе с тем локального параметра, который подлежит измерению и включает в себя нестационарные процессы, возникающие в отрывной зоне, расположенной спереди.

Кроме того, осуществляется численное моделирование того, как осуществляется взаимодействие области с повышенной температурой и структурой, расположенной перед цилиндром с плоским торцом имеющей ударно-волновую характеристику. При помощи полученных численных данных изучается изменения, которые возникают непосредственно перед

преградой отрывной области, вместе с этим осуществляется сопоставление численных результатов с картиной течения, которая была получена эмпирическим путем. Были обнаружены и сформулированы общие моменты с идентичным явлением, которое наблюдались на объекте имеющим вынесенную вперед иглу, что позволяет посмотреть на процесс, с другой стороны.

Вместе с этим был уточнен механизм осуществляющий подачу газа в отрывную область и вместе с тем связанного с ним увеличения размеров данной зоны. Так же учитывается влияние процессов друг на друга в области отрыва и в потоке, который обтекает данную область.

Сам по себе подвод энергии в поток, который имеют скорость выше скорости звука непосредственно перед обтекаемым телом является очень действенным способом по изменению тепловых и аэродинамических параметров тела. В научных трудах, которые посвящены тому, как неоднородности, расположенные внутри потока, взаимодействуют со структурами, характеризующимися как ударно-волновые, возникших с 80-х годов двадцатого века, изучалось обтекание различных объектов, как например конус, тело имеющее овальную форму, или тело, включающее в себя сферическое затупление. Тело имевшее последнюю форму вызывало самый большой интерес, поскольку при осуществлении локального энергоподвода в поток, который набегает на неё могут быть реализованы режимы в которых образовывается развитая передняя зона отрыва. Такой тип перестройки течения приводит к тому, что сопротивление существенно снижается, не смотря на то что сам по себе энэрговклад относительно мал.

Вместе с этим известно, что в случае, когда рассматривается плоский торец эффект уменьшения давления на рассматриваемой торцевой поверхности может проявляться сильнее, чем при случае, когда рассматривается тело имеющее профиль более обтекаемой формы, как например цилиндр имеющий сферическое затупление.

Данное явление изучалось на примере объекта, имеющего цилиндрический профиль, ось данного объекта идентично направлению вектора скорости набегающего потока. На свободных границах действует обычное условие характерное для дальнего поля, а нижняя граница идентична оси.

В начале расчет осуществлялся до тех пор, пока не установится стационарный режим обтекания, где головная ударная волна расположена непосредственно перед торцевой поверхностью цилиндра. После этого в рассматриваемой области расчета на оси базовыми методами программы была выделена маленькая цилиндрическая область. В данной области происходила запись большего значения температуры если сравнивать с главным потоком, а так же происходил перерасчет газодинамических параметров. Сам перерасчет осуществлялся следующим образом: статическое давление и скорость сохранялись без изменения, но уменьшалась плотность, а это значит, что уменьшалось как полное давление, так и число Маха.

Поскольку в потоке присутствовала неравномерность, в том случае, когда полное давление непосредственно вблизи оси меньше, чем полное давление на периферии, что в конечном счете формирует отрывное течения прямо перед торцевой поверхностью. Кроме того, осуществлялся анализ тех зависимостей, которые выводились в процессе поверхности торца, которая была усреднена по площади относительно величины давления в зависимости от числа шагов по времени как в вязких, так и в невязких постановках для некоторых выбранных режимов. Заметных расхождений не было обнаружено ни в характере изменения данного параметра, ни в его величине, собственно отображающего то, как сопротивления тела изменяется во времени, вследствие чего основные расчеты были проведены в постановке без вязкости.

В итоге механизм того, как формируется, развивается и разрушается отрывная область был досконально изучен. Было обнаружено, что данный



механизм очень похож на механизм осуществляющий эволюцию зоны отрыва на автоколебательных режимах обтекания потоком чья скорость выше скорости звука тела, имеющего затупленный профиль и иглу, которая выдается вперед. Данный процесс если рассматривать его целиком, имеет две фазы: фазу затекания газа и фазу истечения газа в зону отрыва из обтекающего ее периферийного потока.

Далее, когда область, имеющая повышенную температуру, где число Маха и полное давление меньше, чем в окружающей среде, приближается к головной ударной волне, в следствие чего по ней движется ударная волна, с которой согласуется косая ударная волна, находящаяся во внешнем потоке. Эта ударная волна выходит на головную ударную волну, которая находится прямо перед торцом преграды, в итоге порождая так называемую  $\lambda$ -конфигурацию ударных волн. После того, как отрывная зона проходит область газа, имеющего низкий напор, она получает законченный вид. Поток газа находящийся на периферии который ее обтекает (ППГ) в итоге замедляется на отошедшей головной ударной волне, затем косая ударная волна отклоняется по направлению к оси на скачке, и большая ее часть присоединяется к возвратному течению относительно преграды.

Одновременно с этим в формирующемся встречном потоке происходит разгон газа в волне разрежения. При этом в данной волне разрежения, которая выходит к оси течения и согласовывается с ударной волной в периферийном потоке. Перепад давления в данной волне достаточен для того, чтобы газ во встречном потоке увеличивал свою скорость до сверхзвука.

В конечном счёте, внутренний скачок уплотнения и внутренняя сверхзвуковая зона появляются в области отрыва. В данной области при столкновении с основным потоком происходит торможение встречного потока. После того, как будет пройдена область газа под низким напором будет прекращен рост отрывной зоны вверх по основному потоку продольных размеров, но будут продолжаться увеличиваться радиальные

размеры. Тут главную роль имеет скачок уплотнения, находящийся во встречном потоке газа. В периферийном же потоке со скачком уплотнения совпадает волна разрежения. В данной волне периферийный поток, который обтекает отрывную область, прошедший ударную волну и изначально имеющий отклонение относительно оси, снова разворачивается в её сторону. Данному развороту помогает и появившаяся область пониженного давления в зоне отрыва у поверхности контакта, что связано с увеличением радиальных размеров области отрыва.

Сам же характер течения в последующем очень похож на то, что наблюдается во время изучения автоколебаний на цилиндрическом профиле с иглой в фазе, когда газ затекает в область отрыва из потока на периферии. Сам же периферийный поток теперь натекает на поверхность торца, что создает периферийный максимум давления во время распределения давления на преграде, что обеспечивает в начале активную подачу газа в область отрыва из потока, находящегося на периферии.

Само появление периферийного максимума давления связано с тем, что газ начинает замедляться на преграде, при том что газ прошёл два косых скачка уплотнения, и, следовательно, он сохранил большее полное давление. Теперь во встречный поток включён весь газ, находящийся в приосевой области вплоть до самой поверхности преграды. В итоге это приводит к тому, что вблизи центра преграды начинает уменьшаться давление.

Кроме того, следует указать, что в фазе затекания, газ, который поступает с периферии в область отрыва начиная с некоторого момента времени, перестаёт доходить до оси течения, и при этом совершает разворот относительно локального минимума давления, находящегося под контактной поверхностью. Вследствие чего, периферийный максимум давления не поддерживает в центре преграды высокий показатель давления. В дальнейшем количество поступающего газа, находящегося на периферии в область с пониженным показателем давления со стороны преграды под

контактной поверхностью, сокращается пока со временем совсем не иссякает.

Вместе с этим продолжается увеличение радиальных размеров области встречного течения, становясь сравнимыми с размерами самой преграды. Так же осуществляется перемещение газа в области отрыва от преграды к вершине зоны отрыва. Привлечение во встречное движение все большего количества газа в конечном счёте приводит к тому, что на данном временном отрезке быстро сокращается давление, которое было усреднено по площади. Что приводит к тому, что скорость газа во встречном течении, а также интенсивность утекания газа от преграды на оси намного меньше, чем на периферии. Из-за этого и само давление в центре преграды падает слабее, чем на периферии, что сказывается и на степени уменьшения сопротивления тела. Данная степень оказывается намного больше, чем уровень уменьшения центрального давления. В этом и кроется отличие от картины, которую мы наблюдаем во время формирования отрывной зоны, которая наблюдалась на объекте с иглой.

Когда контактная поверхность, которая разделяет две области течения (внешнюю и внутреннюю), приближается к кромке преграды, возникают условия необходимые для того, чтобы перейти к фазе истечения. Взаимное влияние процессов друг на друга во внешней и внутренней областях течения наблюдается еще и в том, что внешний поток во время фазы затекания изменяет свое направление к оси в волне разрежения, которая согласованна с внутренней ударной волной, что в дальнейшем приводит к тому, что сход контактной поверхности, разделяющей эти области, с торца преграды затягивается.

Снижение скорости встречного потока газа, вызванное сокращением давления у преграды, в итоге приводит к тому, что внутренний скачок уплотнения в зоне отрыва уменьшается и перемещается к преграде. В области где давление повышено между вершиной зоны отрыва и данным скачком газ плавно присоединяется к движению по направлению к преграде.

Этому благоволит и характер того, как давление распределено у поверхности контакта, объединяющийся в периферийном потоке, с минимумом непосредственно рядом с преградой. В результате, после того, как контактная поверхность сойдет с кромки преграды, раскроется область отрыва и истечения газа из нее картина обтекания примет исходный вид.

Итоги: было осуществлено численное моделирование и по полученным данным был выбран механизм создания и изменения зоны отрывного течения, которое возникает при локальном увеличении температуры газа в потоке, который набегает на тело.

Также были рассмотрены черты, которые объединяют эту задачу с задачами об автоколебаниях в неравномерном потоке, который набегает на преграду (которые уже были изучены ранее). Были выделены фазы затекания и истечения газа в отрывную область и роста ее размеров. Кроме того, было выявлено, что увеличение радиальных размеров области отрыва тесно связан с увеличением размеров встречного (от преграды) потока.

Характер изменения ударно-волновой структуры перед объектом обусловленный этим вполне соответствует эмпирическим наблюдениям, что свидетельствует том, что полученные численные данные релевантны. Одним из главных моментов является то, что процессы влияют друг на друга в области отрыва и потоке, который обтекает эту область. От их взаимодействия сильно зависит как продолжительность процесса целиком, так и его характеристики. В итоге, обнаруженные особенности позволяют получить более точное представление об эффекте, снижения давления на поверхности тела, а также его сопротивления который наблюдается при локальном подводе энергии.

В статье [6] было осуществлено численное моделирование в трехмерной постановке, того как взаимодействует конус с затупленным профилем, имеющий скорость выше скорости звука с областью, которая имеет пониженную плотность в атмосфере земли. Кроме того, был исследован процесс возникновения течения в непосредственной близости от

объекта. В результате была получена информация о том, как аэродинамические параметры объекта зависят от плотности, которую имеет воздушная среда в разреженной области с высокой разреженностью и размерами этой самой области.

В наши дни все так же актуальны исследования, посвященные движению объектов со скоростью выше скорости звука в атмосфере земли с параметрами, которые являются неоднородными. Заинтересованность данным вопросом можно объяснить тем, что неоднородности, которые были созданы искусственно, с которыми своё взаимодействие осуществляет объект, могут иметь большое влияние движение этого объекта, или порождая увеличенную силу подъема и вращающий момент или влияя на коэффициент сопротивления тела. В трудах, которые посвящены данной проблематике, наибольшему интересу подвержены неоднородности, имеющие вид областей разрежения, которые были созданы благодаря тому, что к газу подводится тепловая энергия.

Вместе с тем считается, что во время взаимодействия объекта с областью разрежения осевая симметрия обтекания объекта неизменна. В данной статье изучается частный случай того, как ударная волна конической формы взаимодействует с областью разрежения, при котором осесимметричное обтекание тела имеющего профиль конуса с затупленной формой перестает соблюдаться. Считается, что область пониженного давления, с которой взаимодействует ударная волна, имеет форму в виде канала, чья ось соответственно ортогональна оси конуса. Как уже было исследовано, во время взаимодействия ударной волны с каналом разрежения, который вытянут по направлению движения волны, рождается структура газодинамического вида, имеющая название предвестника.

Из себя данная газодинамическая структура представляет возмущение ударной волны конусообразного вида, чьи размеры имеют тенденцию к постоянному увеличению. Во время взаимодействия ударной волны конического вида с областью пониженного давления, которая имеет

несимметричное положение по сравнению с осью волны, возникает течение имеющее заметный нестационарный пространственный характер.

Метод исследующий такие виды течений называется трехмерным численным моделированием. В данной работе данным методом исследуется изменение предвестника на поверхности имеющей боковое расположение относительно ударной волны, имеющей коническую форму и то, как он влияет на аэродинамические параметры тела имеющего профиль конуса с затоплением.

В постановке изучается ударная волна конической формы, которая порождается объектом, имеющим форму затупленного конуса, который летит в атмосфере, имеющей однородный состав под углом атаки равным нулю. В начальный момент времени участок поверхности, принадлежащий головной ударной волне, взаимодействует с областью пониженного давления, которая расположена в атмосфере. Область, имеющая низкую плотность, выглядит как канал, который имеет сечение прямоугольной формы. Ось данного канала является ортогональной относительно оси конуса, а характерный размер данного канала в поперечине в несколько раз меньше чем длина рассматриваемого объекта конусообразной формы. Параметр давления в области разрежения совпадает с параметром давления в атмосфере без возмущений, а параметр плотности меньше чем невозмущенная плотность.

Во время решения задачи о том, как формируется предвестник головной ударной волне конической формы считается, что происходит обтекание тела потоком, имеющим скорость больше скорости звука. Кроме того, в данном потоке расположена область имеющая пониженный параметр плотности. Данная область интегрирована в поток, чей параметр скорости равен параметру скорости в невозмущённом течении. Газ обтекающий тело считается невязким, не имеющим теплопроводность и чей характер движения можно описать трехмерной нестационарной системой

уравнений Эйлера, где для того что бы система была замкнута применялось уравнение состояния для идеального газа.

Численное решение задачи было реализовано в цилиндрической системе координат, где ось  $OZ$  совпадает с осью конуса.

Канал разрежения задавался граничными условия, которые зависят от времени, и расположены на поверхности головной ударной волны.

На головном скачке применялись базовые параметры и условия. Условия параметров течения для начального времени расположенные между поверхностью тела и головной ударной волной были добыты во время расчёта осесимметричного обтекания тела конусообразной формы потоком, который полностью однороден. Интегрирование трехмерных нестационарных уравнений Эйлера выполнялось с использованием разностной схемы Годунова. Вместе с тем была введена расчетная сетка, которая подвижна, благодаря чему удалось получить явно выделенную головную ударную волну. Решение находилось в области, которая была ограничена плоскостью расположенной вертикально относительно симметрии заданной, поверхностью объекта, поверхностью самой головной ударной волны, и которая была замкнута полностью, была перпендикулярна оси тела с профилем конуса, и которая проходила через данный срез.

Во время показа полученных данных использовались безразмерные переменные. Все варианты расчетов сохраняли постоянную скорость лета конусообразной формы.

В итоге была реализована пространственно-временная картина, того как предвестник развивается на головной ударной волне. Было установлено, что во время пересечения предвестника с главной ударной волной рождалась трехударная конфигурация. Третья же ударная волна разворачивала поток, который прошёл через сам предвестник, параллельно относительно потока, который прошел через главную ударную волну. Параметр давления внутри предвестника имеет примерно вдвое большую ширину, чем параметр давления в ударном слое, который не возмущён.

Важное значение имеет то, что параметр плотности воздуха на поверхности тела конической формы находящимся непосредственно под предвестником почти не имеет отличий от невозмущенного случая. Это происходит из-за того, что в начальный момент времени профиль плотности в ударном слое на конусе является неоднородным. А также из-за этого давление на поверхности тела под предвестником почти не зависит от параметра плотности воздуха в канале с пониженным давлением.

В статье [7] проводилось изучение обтекания, в том случае, когда в течении, параметры не постоянны. Плоское течение с непостоянными параметрами, образуется во время воздействия области с газовой средой, которая разрежена и прямого скачка уплотнения друг на друга. Было осуществлено численное решение, которое базируется на уравнениях сохранения Эйлера. Было обнаружено, что после того, как скачок начнет взаимодействовать с областью, где рождаются и изменяются автомодельные течения. Если их воздействие друг на друга происходит с частыми повторениями, то возникает надлом начального скачка в области разрежения. Можно наблюдать, как начальные скачки, скачки с повышенным параметром скорости, и частично поляризованный разрыв на контакте соединяются в точке, которая общая для всех них. Если взаимодействие происходит не регулярно, то рождается сложное течение, которое включает в себя скачки двух типов: косые и искривленные, вместе с тем образуется контактный разрыв изломанного типа, несколько точек совмещения, струю, в которой повышенный параметр давления и вихрь, в котором четко прослеживаются слои. Была досконально изучено строение вихря и струи. Были выделены направления изменения структур, называемых газодинамическими во время изменения параметров, которые являются основными для данной задачи. Была предложена более простая схема, которая оценивает углы наклона для главных скачков и характеристик газа за этими скачками.



Задачи в которых рассматривается воздействие областей с газовой средой разрежения и скачками уплотнения появляются в самых разных разделах газовой динамики. При энерговкладе с постоянными параметрами в поток, который движется со скоростью больше скорости звука создается след с повышенным параметром температуры, чье влияние на ударный слой создает передние зоны отрыва. При рассмотрении простой модели газа стационарные передние отрывные зоны обязаны образовываться при любой ширине следа. Однако, для тепловых игл могут быть можно реализовать только передние отрывные зоны пульсирующего типа. Для изучения данной темы одним из факторов выступала нужда в обнаружении механизма, отвечающего за создание и развития струи с высоким параметром давления.

В этом исследовании проводилось изучение течения с меняющимися параметрами плоского типа. Данный тип течения рождается благодаря воздействию скачка уплотнения плоского типа и разреженной области с газом. Вместе с тем известно, что данная область, содержащая в себе разреженный газ, занимает одну четвертую зону плоскости.

Для решения был применен явный конечноразностный метод Маккормика, на решениях гладкого типа была реализована точность второго порядка как по времени, так и пространству. Для избавления от осцилляций значений в непосредственной близости от фронтов УВ, была применена сглаживающая процедура, а число Куранта обеспечило устойчивость схемы.

Как для нижней, так и для верхней границы сетки возникали течения одномерного типа. Для верхней границы возникал невозмущенный скачок прямого типа, а для нижней границы возникал распад газодинамического разрыва. Большая площадь области, где производился расчет, была занята ударно волновой структурой сложного типа. За внутренним скачком формировалась струя с высоким параметром давления, которая разворачивалась из-за перепада давлений на разрывах, как внешнем, так и внутренним. Непосредственно в центре течения рождался большой вихрь и

скачок уплотнения слабого типа. Данный скачок имел тенденцию к распространению с параметром скорости, сопоставимым с параметром скорости лидирующего скачка. Из-за того, что в постановке отсутствовал линейный масштаб течение было автомодельно.

Численное решение осуществлялось в координатах не автомодельного типа, и во время перестроения на переменные автомодельного типа, можно было увидеть, то что параметры газа совпадают с точностью до “размазывания” скачков и разрывов тангенциального типа на несколько узлов в сетке. Расчет был осуществлен на гораздо более мелкой, сетке, что предоставило возможность обнаружить рождение, и развитие струи с повышенным параметром давления, само строение этой струи, и рассмотреть характер образования вихря слоистого типа. Параметр давления, отвечающий за торможения газа, который прошел два косых скачка и создающего струю, во много раз больше параметра давления торможения газа непосредственно за начальным и главными скачками. Внутреннее строение струи выглядит как центрированные волны Прандтля–Майера, которые замыкаются на надломах внутреннего разрыва тангенциального типа и отражающихся от внешнего разрыва такого же типа. Сам же вихрь включает в себя слои газа с разными параметрами плотности.

В рассмотренном диапазоне основных параметров, было выявлено, что наступление регулярного режиму почти не зависит от числа Маха. При непостоянном воздействии угол, на который наклонен косой скачок и его длина вообще не зависят от числа Маха. Чем больше становится число Маха, тем больше становится угол, на который разворачивается поток находясь за косым скачком. Данная тенденция приводит к тому, что, струя с высоким показателем давления становится уже. Вместе с тем была реализована схема, позволяющая оценить главные параметры течения без необходимости в проведении численного моделирования. В данной статье реализована схема, которая позволяет оценить параметры газа за всеми

основными типами скачков. Сама схема базируется на методике ударных поляр. Если нам известен параметр скорости, то в связанной с данным параметром системе отсчета можно найти две поляры с конкретными координатами как для начального, так и для потока с пониженным параметром давления, которые находятся в противоположных сторонах контактного разрыва. Параметр скорости тройной точки высчитывается, базируясь на параметре скорости распространения и угла на который наклонен кривой скачок, если искривлением исходного скачка пренебрегается.

В итоге, схема, оценивающая параметры газа, представляет из себя последовательное решение систем уравнений. Максимальное значение погрешности оценки параметра давления непосредственно за внутренним скачком, достигает 10%.

Заключение. На базе уравнений Эйлера, было изучено течение с переменными параметрами плоского типа, которое возникает из-за воздействия скачка уплотнения прямого типа с областью газа в которой параметр плотности понижен, занимающей одну четвертую часть плоскости. Было продемонстрировано, что, с того момента как скачок соприкасается с областью развиваются двумерные течения двух разных типов. Тип течения зависит от дефекта параметра плотности. Во время постоянного воздействия, которое происходит при малых дефектах плотности, исходный скачок преломляется в области с пониженным параметром плотности. Скачки двух типов начальные и лидирующие вместе с разрывом контактного типа совпадают в общей точке. Если взаимодействие непостоянно, то образуется течение сложного типа, которое включает в себя скачки косые и искривленные, контактные разрывы изломанного типа, струя с высоким параметром давления и вихрь слоистого типа. Изменение траектории струи в центр течения осуществляется в системе волн сжатия и разрежения с переменными параметрами централизованного типа. Рождение, развитие и поворот струи происходит из-

за интерференции рождающихся УВ, а тело в потоке никакого влияния не оказывает. Данный алгоритм применяющий метод ударных поляр для точек совпадения скачков, который сводится к решению систем уравнений алгебраического типа, с довольно хорошей точностью оценить главные параметры газодинамического течения.

В статье [8] рассматривалось изменение конфигурации режима обтекания затупленного тела потоком, имеющим скорость больше скорости звука при установке на его фронтальной поверхности иглы. Сама игла моделировалась при помощи локального возмущения плотности, что точно так же меняет режим обтекания. Данный эффект изучается при помощи экспериментов и численных методов еще со второй половины двадцатого века. В итоге, после воздействия отошедшего скачка уплотнения с вязким пограничным слоем, находящимся в непосредственной близости от поверхности иглы, образуется срыв потока, а перед самым телом образуется зона отрывного течения, вместе с этим меняется головная ударная волна и изменение претерпевают аэродинамические характеристики тела. Сам же эффект изменения конфигурации течения в среде, которая содержит области с низким параметром плотности в наше время известен, как "теплый слой"

В эмпирических исследованиях и теоретических теплый слой изучался в задачах о сильном локальном взрыве и поршне. При решении этих задач было выявлено, что изменяющиеся двумерные течений с изменяющимися параметрами выходят на максимальный автомоделный режим. Данный режим совпадает с нулевой шириной канала. При рассмотрении мощных УВ общая переборка течения происходит при уменьшении параметра плотности внутри канала на 10—15% если сравнивать с окружающей средой.

Точно такой же эффект обязан наблюдаться в течениях, которые изначально стационарны, например, если рассматривается обтекание препятствия потоком, чья скорость больше скорости звука. В начале

воздействие, которое головной скачок и газом с пониженным параметром плотности находящийся в канале оказывают друг на друга, возникающее перед телом, примерно соответствует случаю двумерного автомодельного течения, которое плоским безграничным профилем. Перед наблюдаемым объектом рождается предвестник. Однако после того, как струя с газом, который прошел непосредственно через поверхность предвестника расположенную с боку, выходит непосредственно за границу обтекаемого объекта, предвестник перестанет заполняться ударно-сжатым газом, а также прекратит увеличиваться в своих размерах.

Вообще, не представляется очевидным, что картина обтекания с каналом имеет постоянные параметры. Теоретически могут существовать нестационарные режимы течения. Из-за этого соображения, которые были проведены выше подлежат проверке численно так и эмпирически.

После проведения расчетов, варианта, чьи параметры близки параметрам эксперимента, включая параметры потока и канала, демонстрируется удовлетворительное совпадение данных расчёта и эксперимента, это говорит о том, что явления, заложенные в численную модель, не противоречат физическим.

Данные полученные путем эксперимента и расчета показывают эффект перебора течения, имеющего скорость больше скорости звука, если перед объектом появляется тонкий канал с пониженным давлением имеющий название "тепловой иглы".

Расчеты продемонстрировали, что данный эффект остается, но с увеличением числа  $M$  колебательный характер процесса возрастает и за то время, которое длился расчет стационарный режим так и не появился, что требует дальнейших исследований.

В заключении хочется отметить, что невязкий механизм изменения течения,двигающегося со скоростью больше скорости звука, который был рассмотрен в данной статье отличается от вязкого механизма, который

формируется под действием иглы наличествует свободный параметр и "бесконечная" длина канала.

В [9] работе проявляется заинтересованность в исследовании перемещения газовых сред с подведенным источником энергии. Если соответствующим образом расположить тепло подвод в непосредственной близости с поверхностью обтекаемого объекта, то можно наблюдать уменьшение волнового сопротивления данного объекта, можно генерировать тягу, или получать усилия аэродинамического характера. Например, при получении тяги можно использовать увеличение параметра давления на корме тела вследствие подвода тепла. Механизм поглощения лазерного излучения может выступать в роли механизма подвода тепла к потоку.

В текущей статье изучалась задача об обтекании тела сверхзвуковым потоком, при наличии источника тепла, распределенного объемно, и находящегося перед телом.

В потоке ИГ имелись источники энерговыделения, которые были распределены. Мощность источников энерговыделения, принимается, как известной функцией по координатам и по времени.

На УВ, которые возникают в потоке выполняются стандартные законы сохранения, на поверхностях объектов выставлены условия не протекания, на оси симметрии выставлено условие превращения в ноль нормальной компоненты скорости и производных по нормали от газодинамической функции. А если рассматривается область без возмущения, то поток считается однородным.

Рассматривалось обтекание тонкого тела вращения. Известно, что перед данным телом осуществляется тепловыделение. Само тепловыделение реализовано при помощи сверхзвукового газового потока. Такая конфигурация называется объектом с «тепловой иглой». При рассмотрении теплового источника, становится ясно, что источник тепла, не оказывает сопротивления потоку, а в конической области, находящейся

сзади него параметр давление ниже параметра давления в истоке. Из-за этого сопротивление объекта, расположенного в данной области пониженного давления, должно уменьшаться.

В итоге, осуществив подвод тепла перед носовой частью объекта, можно существенно снизить лобовое сопротивление и получить дополнительную тягу.

Так же в статье была рассмотрена задача о том, как теплоподвод влияет на волновое сопротивление объектов с осе-симметрическим затупленным профилем, если эти объекты находятся вниз по потоку.

До этого была исследована задача об обтекании области энерговыведения сферической формы с подвода тепла, осуществляемым по гауссовскому закону. Было продемонстрировано, что протяженная область газа с очень высоким параметром температуры, с пониженным параметром плотности и давления возникает за тепловым пятном. На окраине потока рождается скачок уплотнения всякого вида и максимальный параметр плотности расположен вне оси симметрии. Если теплопровод достаточно большой, то местная зона до звука рождается в тепловом пятне. Частицы, которые прошли через цент пятна тем быстрее теряют полное давление для частиц, чем больше растет энерговклад. Одновременно с этим существует эффект «насыщения потока теплом». Данный эффект состоит в том, что существует некоторый порог энерговклада, при котором параметр полного давления почти не уменьшается. С ростом потерь полного давления уменьшается волновой тип сопротивления тел, находящихся ниже по потоку.

В статье для подсчёта параметров течения применялась схема Маккормака со вторым порядком точности. Выделялся головной скачок уплотнения и установление происходило в ударном слое по физическому времени. Маршевый метод использовался для расчета течения находящегося перед УВ, в случае сверхзвукового течения. А если в течении

появлялись местные зоны до звука, то применялся метод установления по времени.

Подвод тепла значительно влияет на строение потока. Если газ разогревается сильно, находясь внутри теплового пятна, то плотность газа падает сильно. В итоге наблюдается возрастание параметров местных скоростей, и снижение числа Маха. В случае, когда сфера находится далеко сзади источника тепловыделения, то ее обтекание осуществляется потоком, чья плотность уменьшена, вместе с числом Маха. Вместе с этим данный поток неоднороден, поскольку частицы расположенные вблизи оси симметрии проходят через центр пятна, а значит получили больший нагрев, по сравнению с частицами, расположенными на периферии потока. Из-за данной неоднородности, появляются зоны отрыва, с течением возвратного вида, поскольку параметр давления торможения в точке, являющейся критической для сферы получается меньше, чем давление по ее обводу. Уменьшение параметра давления на поверхности создает уменьшение сопротивления.

В [10] статье исследовалось то, какое влияние оказывает показатель адиабаты на частные особенности отражения УВ. В частности, было проведено исследование, то какое влияние оказывает показатель адиабата на зависимость между критическим углом и того, какой интенсивностью обладает падающая волна. Было продемонстрировано, возрастание данного влияния с увеличением параметра интенсивности.

Аналитическим способом были изучены предельные случаи для слабых УВ, при случайных параметрах показателя адиабаты, и сильных волн, если показатель адиабаты равен единице.

Были приведены данные, полученные после расчета критического угла для разных показателей адиабаты, при максимально возможном диапазоне параметра интенсивности падающей волны.



## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

### 2.1 Постановка задачи

Рассматривалась задача об обтекании тела с затупленным профилем, при наличии в области источника энерговыделения.

В начальный момент времени внутри расчетной области и на входной границе задавались параметры невозмущенного течения  $\rho_0=1$ ,  $p_0=0.2$ ,  $u_0=1$  и  $v_0=0$ . Таким образом, параметры газа в набегающем потоке соответствовали нормальным условиям. На оси OX ставились условия отражения, на остальных границах – условия отсутствия отражения в направлении, перпендикулярном к границе. На поверхностях рассматриваемых тел ставились условия отсутствия соответствующих потоков через границу. Граничные условия встраивались в расчет без нарушения его консервативности.

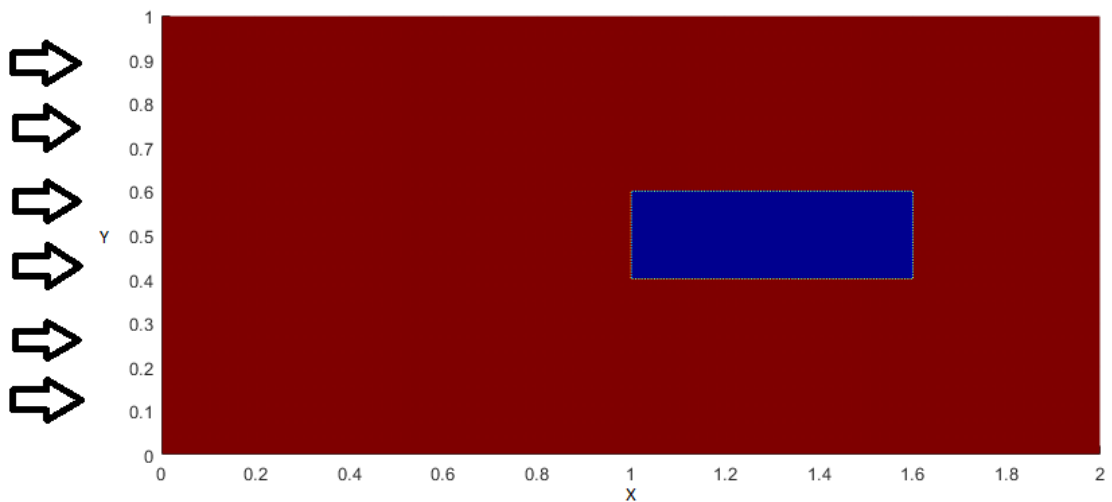


Рис.1 Схема расчетной области в начальный момент времени

С помощью изменения граничного условия на входной границе моделировался источник энергии, имеющий вид протяженного разреженного канала. Начиная с момента времени  $t_i$ , когда стационарный режим обтекания уже установился, на входной границе задавалось значение плотности  $\rho(0,y,t)=\rho_i =\alpha_\rho\rho_0$ , для  $0\leq y\leq R_i$ , где  $R_i$ – радиус канала. Это граничное условие задавалось при  $t_i\leq t\leq t_i+\Delta t$ . Другие параметры задавались равными их значениям в невозмущенном потоке. Такое

граничное условие порождало в набегающем потоке протяженный канал пониженной плотности ширины  $R_i$ . Отметим, что задание разреженного канала через граничное условие позволяет оптимизировать размеры расчетной области. Отличие уравнений состояния в горячей области от уравнений состояний идеального газа не учитывалось. Параметр  $\alpha_p$  характеризует степень разреженности газа в канале. Другие параметры задавались равными их значениям в невозмущенном потоке.

## 2.2 Численный метод

Численное решение проводилось с использованием метода крупных частиц, который был описан в работе [12].

Основная идея данного метода заключается в том, что исходная нестационарная система уравнений Эйлера, записанная в форме законов сохранения, расщепляется по физическим процессам. В данном методе среда представляет из себя систему жидких (крупных) частиц. Данные частицы совпадают в данный момент времени с ячейкой эйлеровой сетки. Если стационарное решение задачи существует, то оно в результате установления, из-за этого весь процесс вычислений состоит из цикла шагов по времени. Расчет каждого шага по времени (вычислительного цикла) в свою очередь разбивается на три этапа:

1– Эйлеров этап, когда пренебрегаются все эффекты, связанные с перемещением элементарной ячейки (отсутствует поток массы через границы ячеек), и учитываются только эффекты ускорения жидкости только за счет давления;

2– Лагранжев этап, где при движении жидкости вычисляются потоки массы через границы эйлеровых ячеек;

3– Заключительный этап, где определяются окончательные значения газодинамических параметров потока в новый момент времени на основе законов сохранения массы, импульса и энергии для каждой ячейки, и всей системы в целом на фиксированной расчетной сетке.

Теперь рассмотрим каждый из этих этапов подробнее.

Эйлеров этап. На этом этапе вещество предполагается моментально заторможенным, а рассчитываются лишь величины, относящиеся к ячейке в целом. На данном этапе ведется расчёт скорости и энергии

$$\widetilde{u}_{i,j}^n = u_i^n - \left( \frac{p_{i+\frac{1}{2},j}^n - p_{i-\frac{1}{2},j}^n}{dx} \right) \left( \frac{dt}{\rho_{i,j}^n} \right),$$

$$\widetilde{v}_{i,j}^n = v_i^n - \left( \frac{p_{i+\frac{1}{2},j}^n - p_{i-\frac{1}{2},j}^n}{dy} \right) \left( \frac{dt}{\rho_{i,j}^n} \right),$$

$$\widetilde{E}_{i,j}^n = E_{i,j}^n - \left[ \frac{p_{i+\frac{1}{2},j}^n * u_{i+\frac{1}{2},j}^n - p_{i-\frac{1}{2},j}^n * u_{i-\frac{1}{2},j}^n}{dx} + \frac{p_{i+\frac{1}{2},j}^n * v_{i+\frac{1}{2},j}^n - p_{i-\frac{1}{2},j}^n * v_{i-\frac{1}{2},j}^n}{dy} \right] * \left( \frac{dt}{\rho_{i,j}^n} \right).$$

Здесь величины с дробными индексами, которые относятся к границам ячеек, вычисляются по формулам

$$u_{i+\frac{1}{2},j}^n = \frac{(u_{i,j}^n + u_{i+1,j}^n)}{2},$$

$$v_{i+\frac{1}{2},j}^n = \frac{(v_{i,j}^n + v_{i+1,j}^n)}{2},$$

$$p_{i+\frac{1}{2},j}^n = \frac{(p_{i,j}^n + p_{i+1,j}^n)}{2}.$$

Лагранжев этап. На данном этапе находятся потоки массы через границы ячеек. За время  $\Delta t$  находятся потоки массы  $\Delta M$  через границы эйлеровых ячеек.

$$\rho_i^n \Delta x = \rho_i^n \Delta x - (\Delta M_{i+1/2} - \Delta M_{i-1/2}),$$

где поток массы через правую грань  $\Delta M_{i+1/2}$ , плотность  $\rho_i^n$ , шаг в рассматриваемой области  $\Delta x$

$$\Delta M_{i+1/2,j}^n = \begin{cases} \rho_{i,j}^n \frac{\tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n}{2} \Delta x \Delta t, & \text{если } \tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n > 0, \\ \rho_{i+1,j}^n \frac{\tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n}{2} \Delta x \Delta t, & \text{если } \tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n < 0, \end{cases}$$

аналогично для потока массы через левую грань  $\Delta M_{i-1/2}$ .

Если ни одно из условий не выполняется, то полагаем  $\Delta M_{i+\frac{1}{2},j}^n = 0$ .

Заключительный этап. На этом этапе находятся финальные поля эйлеровых параметров потока в момент времени  $t^{n+1}$ . Уравнения этого этапа представляют из себя законы сохранения массы, импульса и полной

энергии. При определении направления потока через стороны ячейки применяется формула:

$$D_{i,j}(K) = \begin{cases} 1, & \text{если вещество втекает в ячейку } (i, j) \text{ через сторону } K; \\ 0, & \text{если вещество вытекает из ячейки } (i, j) \text{ через сторону } K; \end{cases}$$

В итоге, окончательные значения параметров потока  $\rho$ ,  $v$ ,  $u$ ,  $E$  на новом временном слое определяются следующим образом:

$$\rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{i,j}^n + \frac{\Delta M_{i-1/2,j} + \Delta M_{i,j-1/2} - \Delta M_{i,j+1/2} - \Delta M_{i+1/2,j}}{\Delta x \Delta y},$$

$$\begin{aligned} X_{i,j}^{n+1} = & (D_{i,j}(1)\tilde{X}_{i-1,j}^n \Delta M_{i-1/2,j}^n + D_{i,j}(2)\tilde{X}_{i,j-1}^n \Delta M_{i,j-1/2}^n - D_{i,j}(3)\tilde{X}_{i+1,j}^n \Delta M_{i+1/2,j}^n \\ & + D_{i,j}(4)\tilde{X}_{i,j+1}^n \Delta M_{i,j+1/2}^n + \tilde{X}_{i,j}^n (\rho_{i,j}^n \Delta x \Delta y - [1 - D_{i,j}(1)] \Delta M_{i-1/2,j}^n \\ & - [1 - D_{i,j}(2)] \Delta M_{i,j-1/2}^n - [1 - D_{i,j}(3)] \Delta M_{i+1/2,j}^n - [1 \\ & - D_{i,j}(4)] \Delta M_{i,j+1/2}^n) / \rho_{i,j}^{n+1} \Delta x \Delta y \end{aligned}$$

Давление  $p_i^{n+1}$  на новом временном слое рассчитывается из уравнения состояния:

$$p_i^{n+1} = (\gamma - 1) \rho_i^{n+1} \left( E_i^{n+1} - \frac{1}{2} v_i^{n+1} \right)$$

Вычислительный цикл закончен.

### 2.3 Модификация метода крупных частиц

Модификация метода крупных частиц, предложенная Д.В. Садиным повышает порядок аппроксимации метода крупных частиц до второго по времени и пространству, на гладких решениях, что позволяет повысить точность решения, убрать осцилляции. Данная схема второго порядка точности имеет высокую устойчивость алгоритма из-за неявного расчета межфазных взаимодействий, низкий уровень численных диссипаций, монотонность, возможность детального разрешения особенностей сложных структурно течений газозвесей.

Данная модификация из статьи [11] водится перед началом эйлерова этапа, для того что бы вычислить искусственную псевдовязкость, а также добавляет в расчет вспомогательный параметр давления

$$Q_{i\pm 0,5}^n = -\sqrt{\gamma p_{i\pm 0,5}^n \rho_{i\pm 0,5}^n} (U_{i\pm 1}^n - U_i^n).$$

После добавления псевдовязкости, выражение, отвечающее за вспомогательные значения давления на эйлеровом этапе будет иметь следующий вид

$$p_{i+\frac{1}{2},j}^n = \frac{(p_{i,j}^n + p_{i+1,j}^n)}{2} + Q_{i+0,5}^n.$$

### 3. ВЕРИФИКАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Для проверки корректности работы численного алгоритма проводится верификацию вычислений. Т.е. проводится сравнение численного и аналитического решения. Численное решение и аналитическое всегда отличаются, поскольку данные, которые были получены при помощи численного метода, являются аппроксимацией результата, полученного аналитическим путем. На рисунке 2 синий сплошной линией изображен профиль давления  $P$ , рассчитанный при помощи метода крупных частиц, с использованием модификации Саина. Красной пунктирной линией изображено решение, полученное аналитически. Также на рисунке 3 синей сплошной линией изображен профиль скорости  $U$ , полученный при помощи метода крупных частиц, а аналитическое решение изображено красной пунктирной линией. Сетка равномерная с числом ячеек  $N = 1500$  и числом Куранта  $K = 0,4$ .

Начальные условия были взяты из статьи [13] на 190 странице:

$P = 1,83333$ ,  $\rho = 1,42857$ ,  $E = 1,925$ ,  $U = 0,5$  на левой границе,

$P = 1,0$ ,  $\rho = 1,0$ ,  $E = 1,50$ ,  $U = 0$  по всей области.

Результаты полученные, численным алгоритмом совпадают, с аналитическим решением. Этот факт означает, что численный алгоритм крупных частиц с модификацией Саина работает корректно, и его можно использовать для решения задач.

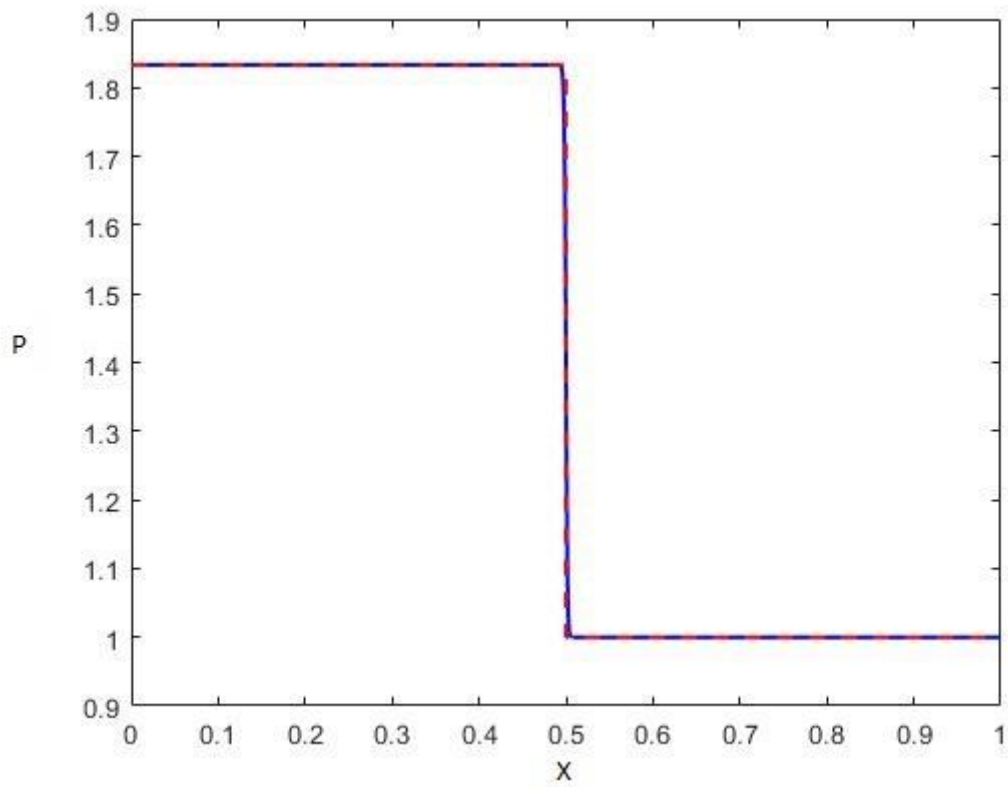


Рисунок 2. Профиль давления на момент времени  $t = 0.3$

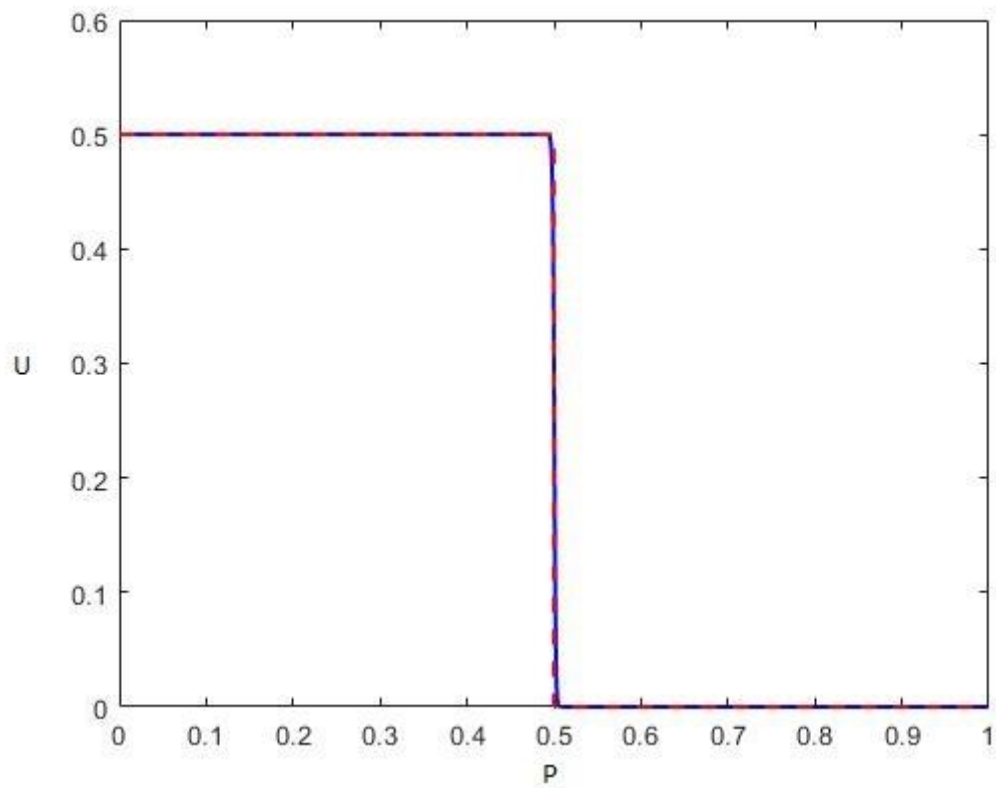


Рисунок 3. Профиль скорости на момент времени  $t = 0.3$



#### 4.РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные для расчёта и анализа были взяты из статьи [2] с симметричным расположением объекта и источника энерговыделения.

Было рассмотрено обтекание тела с затупленным профилем в стационарном режиме. В случае, когда тело и бесконечный разреженный канал расположены симметрично относительно оси  $x$ . Тело имело отношение продольного размера к поперечному, равное 3:2 (координаты тела  $x_b \leq x \leq x_d$ ,  $0 \leq y \leq y_d$ ,  $x_b=0.93$ ,  $x_d=1.29$ ,  $y_d=0.12$ ). Отношение диаметра канала к ширине тела равнялось 1:4,  $R_1=0.03$ ,  $t_1=6.43$ ,  $\alpha_p=0.4$ .

Можно наблюдать, что при постоянном источнике энергии в процессе становления стационарного режима обтекания перестраивается все течение. Одновременно происходит изменение формы головной ударной волны, и вместе с тем наблюдается значительно увеличивается ее отхода от стационарного положения, устанавливающегося в отсутствие источника энергии. В стационарном режиме фронт головной ударной волны становится прямолинейным.

На рис.8 для значения плотности в разреженном канале  $\alpha_p=0.4$  и  $R_1=0.03$  представлена динамика установления стационарного значения давления в точке торможения.

Полученные данные совпадают с результатами [2], и позволяют утверждать, что данный алгоритм можно применять для решения задач, об обтекании тел в сверхзвуковой среде, с наличием источника энерговыделения перед телом.

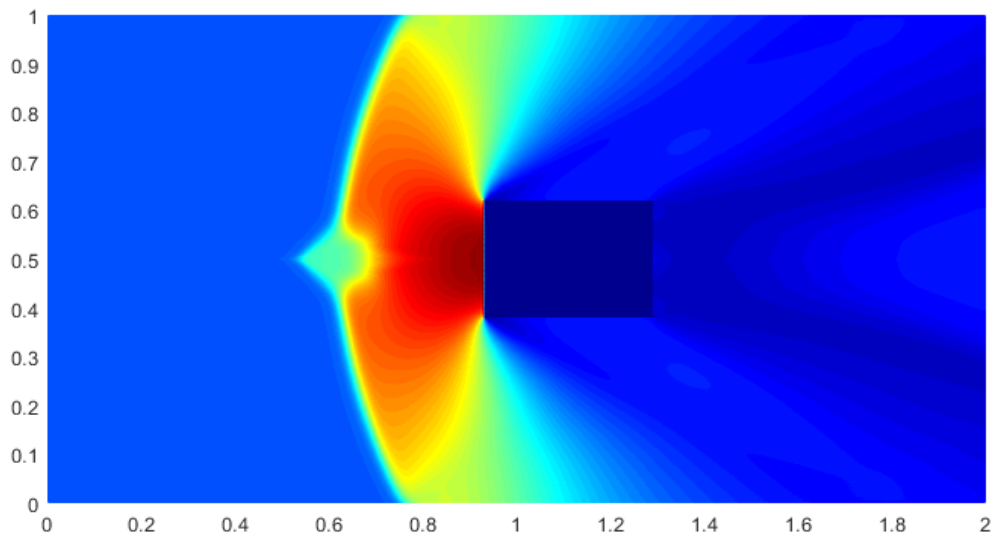


Рисунок 4. Профиль давления для  $t=7.7$

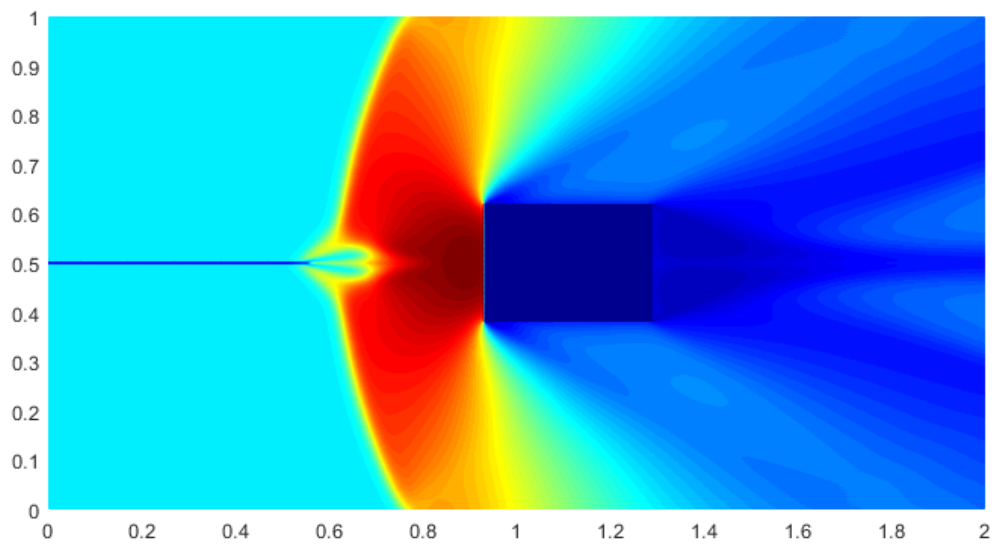


Рисунок 5. Профиль плотности для  $t=7.7$

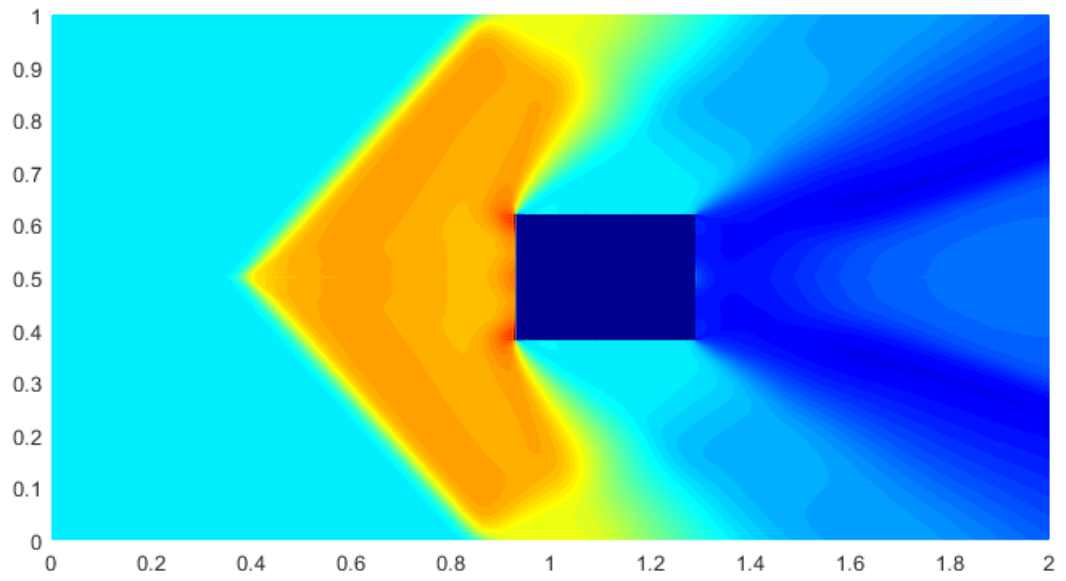


Рисунок 6. Профиль давления для  $t=16.7$

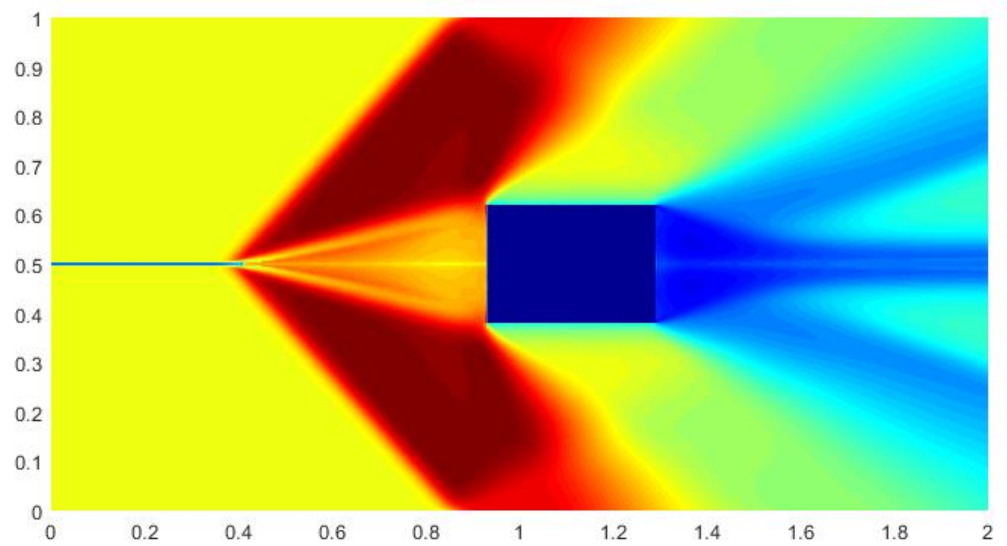


Рисунок 7. Профиль плотности для  $t=16.7$

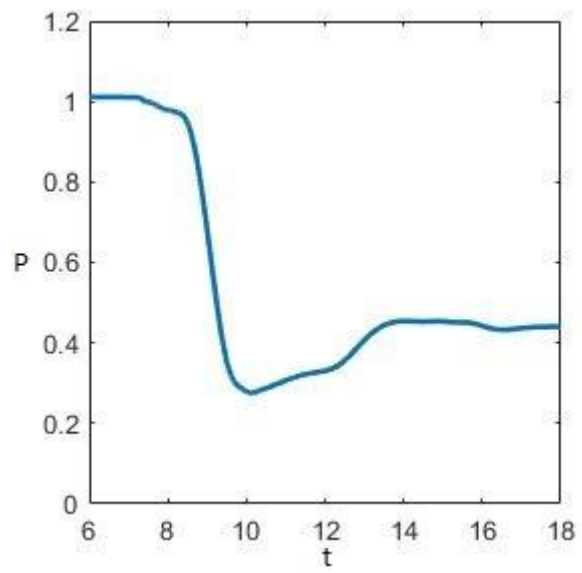


Рисунок 8. Динамика давления торможения

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Построена математическая модель, описывающая газодинамические последствия наличия в сверхзвуковом потоке, натекающем на тело, протяженного по пространству источника энергии в виде канала с пониженной плотностью и постоянным давлением, равным давлению в невозмущенном потоке.
2. В среде разработки Microsoft Visual Studio 2016 реализован численный алгоритм для решения поставленной задачи.
3. Результаты, отраженные в работе, подтверждают возможность уменьшения лобового сопротивления тела, путем добавления в виде канала с пониженной плотностью и постоянным давлением, равным давлению в невозмущенном потоке.
4. Полученные результаты совпадают с результатами авторов работ, представленных в литературе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О.А. Азарова, Л.Г. Гвоздева “Нестационарные трехударные конфигурации и контактно-вихревые структуры, инициированные взаимодействием источника энергии с ударным слоем в газах”, Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 15, 3-66
2. О. А. Азарова, В. Г. Грудницкий, Ю. Ф. Колесниченко, “Стационарное обтекание тел сверхзвуковым потоком газа, содержащим бесконечный тонкий разреженный канал”, Матем. моделирование, 2006, том 18, номер 1, 79–87
3. О. А. Азарова, В. Г. Грудницкий, Ю. Ф. Колесниченко, “Численное исследование воздействия тонкого разреженного канала на сверхзвуковое обтекание тел с клиновидным выступом”, Матем. моделирование, 2005, том 17, номер 10, 104– 112
4. В. А. Анненков, В. А. Левин, Е. В. Трифонов “Разрушение ударных волн при их взаимодействии с локальным источником энерговыделения”, Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47, № 2, 3-7
5. К. В. Бабарыкин “Исследование структуры отрывного течения перед затупленным телом, создаваемого путем локального энергоподвода в набегающий поток”, Вестник Санкт-Петербургского университета, 2015 Сер. 1. Том 2 (60). Вып. 3, 405-414
6. О.М. Величко, В.Д. Урлин, Б.П. Якутов, “Взаимодействие головной ударной волны конического тела с областью низкой плотности в атмосфере”, Журнал технической физики, 1995 Т. 65, в. 5, 31-40
7. П. Ю. Георгиевский, В. А. Левин, О. Г. Сутырин “Двумерные автомодельные течения, порожденные взаимодействием скачка уплотнения с областями газа пониженной плотности”, Механика жидкости и газа № 2, 2010, 126-134
8. В. И. Артемьев, В. И. Бергельсон, И. В. Немчинов, Т. И. Орлова, В. А. Смирнов, В. М. Хазинс, “Эффект “тепловой иглы” перед затупленным

телом в сверхзвуковом потоке”, Докл. АН СССР, 1990, том 310, номер 1, 47–50

9. П. Ю. Георгиевский, В. А. Левин, “Сверхзвуковое обтекание тела при подводе тепла перед ним”, Тр. МИАН СССР, 1989, том 186, 197–202

10. Арутюнян Г.М., Белоконов В.А., Карчевский Л.В. “О влиянии показателя адиабаты на отражение ударных волн”// ПМТФ. 1970. № 1. С. 62– 66.

11. Д. В. Садин “Модификация метода крупных частиц до схемы второго порядка точности по пространству и времени для ударно-волновых течений газовзвеси”, Вестн. ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование, 12:2 (2019), 112–122

12. О. М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов “Метод крупных частиц в газовой динамике”, М. Наука, 1982. 392 с.

13. Основы численных методов механики сплошной среды: монография / В.Ф. Куропатенко, Е.С. Шестаковская. – Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 254 с., 190