

<u>ИПМ им.М.В.Келдыша РАН</u> • <u>Электронная библиотека</u> <u>Препринты ИПМ</u> • <u>Препринт № 79 за 2021 г.</u>



ISSN 2071-2898 (Print) ISSN 2071-2901 (Online)

### <u>А.Е. Бондарев, А.Е. Кувшинников,</u> <u>Т.Н. Михайлова, И.Г. Рыжова,</u> <u>Л.З. Шапиро</u>

Моделирование течения перед струйной преградой при вариации параметров набегающего потока

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Моделирование течения перед струйной преградой при вариации параметров набегающего потока / А.Е. Бондарев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. № 79. 14 с. <u>https://doi.org/10.20948/prepr-2021-79</u> <u>https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2021-79</u>

Ордена Ленина ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ имени М.В. Келдыша Российской академии наук

## А.Е.Бондарев, А.Е.Кувшинников, Т.Н.Михайлова, И.Г.Рыжова, Л.З.Шапиро

## Моделирование течения перед струйной преградой при вариации параметров набегающего потока

### Бондарев А.Е., Кувшинников А.Е., Михайлова Т.Н., Рыжова И.Г., Шапиро Л.З.

# Моделирование течения перед струйной преградой при вариации параметров набегающего потока

В работе рассматриваются результаты численного моделирования задачи о взаимодействии сверхзвукового потока со струйной преградой при вариации параметров входного потока. Задача решается в рамках системы уравнений Навье–Стокса. Рассматриваются ламинарные течения. Исследуется изменение качественной картины течения при вариации скорости набегающего потока и толщины пограничного слоя в набегающем потоке. Расчеты проводились с помощью открытого программного пакета OpenFOAM.

*Ключевые слова:* сверхзвуковое течение, уравнения Навье–Стокса, струйная преграда, OpenFOAM, вариация входных параметров

### Alexander Evgenyevich Bondarev, Artem Evgenyevich Kuvshinnikov, Tatiana Nikolaevna Mikhailova, Irina Gennadievna Ryzhova, Lev Zalmanovich Shapiro Modelling of the flow in front of the jet obstacle at variation of oncoming flow parameters

The results of numerical simulation of the problem of interaction of supersonic flow with a jet obstacle under variation of input flow parameters are considered. The problem is solved in the system of Navier-Stokes equations. Laminar flows are considered. The qualitative flow pattern has been studied under the variation of incoming flow velocity and boundary layer thickness in the incoming flow. The calculations were performed using the OpenFOAM software package.

*Key words:* supersonic flow, Navier-Stokes equations, jet obstacle, OpenFOAM, variation of input parameters

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 19-01-00402-а и 20-01-00358-а.

### 1. Введение

Задачи взаимодействия внешнего потока со струйной преградой являются актуальными с точки зрения практических приложений. Подобные задачи на практике возникают при спуске космических аппаратов в атмосферу, при маневрировании атмосферы, в плотных слоях при созлании энергоэффективных реактивных самолетов. Как правило, перед струйной преградой в потоке возникает структура, состоящая из одной или нескольких отрывных зон. Такая структура способна трансформироваться в зависимости от характерных параметров как набегающего потока, так и самой струи, создающей струйную преграду. Интерес к задачам подобного рода возник еще в 60-х годах двадцатого века. Среди первых публикаций в данной области можно отметить работы [1-3]. Классическими работами по исследованию данных задач считаются работы [4-6], представляющие цикл исследований, выполненных под руководством В.С. Авдуевского. Эти задачи вызывают интерес у исследователей и в настоящее время, включая взаимодействие с учетом химических реакций и с учетом ударных волн [7,8].

Особый интерес вызывает рассмотрение задачи моделирования взаимодействия потока со струйной преградой в параметрической постановке, где основными определяющими параметрами являются параметры набегающего потока и струи, формирующей преграду.

Благодаря современным компьютерным технологиям возможно Такого полноценное проведение параметрических исследований. рода многократное предполагают решение прямой исследования задачи математического моделирования при вариации определяющих параметров задачи. Подобное исследование позволяет проследить изменения качественной картины течения, реализующейся при взаимодействии потока со струйной преградой, при вариации параметров набегающего потока и параметров струи.

Для численного исследования подобных многопараметрических задач был разработан и апробирован на различных классах задач подход обобщенного вычислительного эксперимента [9–14].

Согласно [14], обобщенный вычислительный эксперимент позволяет получить в дискретном виде решение сразу целого класса задач. Класс задач изменения определяется определяющих параметров. диапазонами численный Предположим, что существует надежный метод решения двумерных и трехмерных нестационарных задач вычислительной газовой динамики. Тогда мы можем получить численное решение  $F(x, y, z, t, A_1, ..., A_n)$ для любой точки в пространстве вычислительной области, где x, y, z пространственные координаты, *t* — время, *A*<sub>1</sub>, ..., *A*<sub>n</sub> являются определяющими характерных параметров задачи. Каждый ИЗ параметрами ограничен определенным диапазоном:

$$A_i^{min} \le A_i \le A_i^{max}; \quad i = 1, \dots, N.$$

Разобьем каждый из параметров  $A_i$  на k-1 частей, т.е. для каждого параметра получим разбиение, состоящее из k точек. Объем *N*-мерного пространства, образованного набором определяющих параметров  $A_i$ , заполняется набором из  $k^N$  точек.

Легко видеть, что это потребует решения  $k^N$  газодинамических задач, что требует использования параллельных вычислений в многозадачном режиме. Такой подход позволяет получить ценную информацию о зависимости интересующих газодинамических функций или ценных функционалов (подъемная сила, сила сопротивления) от определяющих параметров.

Применительно к задачам моделирования взаимодействия потока со струйной преградой нас интересует изменение качественной картины течения, особенно в области отрывных зон перед струйной преградой при вариации выбранных определяющих параметров.

В предыдущей работе [14] проводилось численное моделирование этой задачи при вариации параметра струи. Задача решалась в рамках системы уравнений Навье–Стокса. Рассматривались ламинарные течения. Исследовалось изменение качественной картины течения при вариации скорости поперечной струи, образующей струйную преграду.

В настоящей работе используется та же постановка задачи, но в качестве определяющих параметров рассматриваются параметры набегающего потока. Исследуется изменение качественной картины течения при вариации скорости набегающего потока и толщины пограничного слоя в набегающем потоке.

# 2. Гибридный солвер pisoCentralFoam программного пакета OpenFOAM

Для решения задачи использовался открытый программный комплекс [15,16], представляющий открытую OpenFOAM собой интегрируемую платформу для численного моделирования задач механики сплошных сред. На сегодняшний момент OpenFOAM позволяет решать множество различных задач механики сплошных сред, его популярность постоянно растет. В основе кода лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения дифференциальных уравнений В частных производных систем как В пространстве, так и во времени. Рабочим языком кода является С++. В терминах данного языка большинство математических дифференциальных и тензорных операторов в программном коде (до трансляции в исполняемый файл) уравнений может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора может быть выбран уже пользователем в процессе расчёта. Таким образом, в коде полностью разделяются расчетной инкапсулируются И понятия сетки (метод дискретизации), дискретизации основных уравнений и методов решения алгебраических уравнений. Вместе с кодом поставляется набор программ -

солверов, в которых реализованы различные математические модели механики сплошных сред.

Наряду со стандартными солверами, содержащимися в составе открытого программного комплекса OpenFOAM, возможна разработка и интеграция в программный комплекс солверов, разработанных сторонними коллективами. Именно к таким солверам относится разработанный в Институте системного В.П. Иванникова солвер pisoCentralFoam программирования ИМ. [17]. используемый В настоящей работе для численного моделирования взаимодействия потока со струйной преградой. Этот солвер реализует гибридную схему, для которой используются алгоритмы PISO/SIMPLE для неявного интегрирования уравнений сохранения массы, импульса и энергии в сочетании с соответствующими схемами для неосциллирующей дискретизации конвективных членов. Гибридная схема позволяет комбинировать свойства алгоритмов PISO/SIMPLE и Курганова-Тадмора с использованием функции переключения. Идея гибридной схемы заключается в следующем:

1) формулировка массовых потоков по схемам Курганова-Тадмора;

2) введение функции смешивания, которая позволяет «переключаться» между формулами для сжимаемого и несжимаемого потока;

3) создание уравнения сохранения массы и импульса и энергии в полудискретной форме, пригодной для вывода уравнения давления;

4) применение метода PISO/SIMPLE для дискретизации уравнений, в которых конвективные члены аппроксимируются с помощью «переключающей» функции и схемы Курганова-Тадмора.

Солвер pisoCentralFoam к настоящему моменту апробирован на большом количестве модельных и практических задач вычислительной аэрогазодинамики и хорошо себя зарекомендовал.

### 3. Постановка задачи

Постановка задачи рассматривается по аналогии с постановкой, использованной в работе [14]. Рассматривается задача моделирования отрывного течения перед преградой. Сверхзвуковой ламинарный поток вязкого сжимаемого газа взаимодействует со струйной преградой. Струйная преграда образована поперечной сверхзвуковой струей аналогичного газа, истекающей из сопла, имеющего ширину L =0.001 метр. В результате взаимодействия перед струйной преградой образуются отошедшая ударная волна и область отрывного течения.

На рис. 1 представлена расчетная область. Постановка граничных условий представлена в таблице 1, их формулировка дается в терминах открытого программного пакета OpenFOAM.

На верхней границе, обозначенной в таблице «top», задается условие нулевого градиента для газодинамических функций, обозначаемое в таблице «zeroGradient». Такие же условия задаются на правой границе, обозначаемой «outlet». На левой границе, обозначаемой «inlet1», заданы параметры набегающего потока: давление P = 101325 Па, температура T = 300 K, скорость равна ( $u_x$ , 0, 0), где  $u_x$  изменяется от 694.5 м/с (2*M*) до 868.125 м/с (2.5*M*). На границе «inlet2» для скорости заданы условия в виде профиля ламинарного пограничного слоя, где скорость изменяется от 0 на нижней границе до  $u_x$  на границе пограничного слоя с заданной толщиной  $\delta$ . Условия для давления и температуры аналогичны условиям для границы «inlet1». На нижней границе, обозначенной в таблице «bottom», для скорости задано условие прилипания (скорость равна 0 м/с), для давления и температуры задается условие нулевого градиента. На срезе сопла «nozzle», задается скорость V = (0,  $v_y$ , 0). В проведенной серии расчетов  $v_y$  равна 694.5 м/с (2*M*). Так как задача является двумерной, для передней «front» и задней «back» границ используется специальное граничное условие OpenFOAM «empty». Это условие задается в случаях, когда вычисления в заданном направлении не проводятся.



Рис. 1. Расчетная область задачи

Грань	Р	Т	U
inlet1	101325	300	от 2М до 2.5М
inlet2	101325	300	профиль скорости в пограничном слое
outlet	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
top	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
bottom	zeroGradient	zeroGradient	0
nozzle	zeroGradient	zeroGradient	2M
front&back	empty	Empty	empty

#### Граничные условия

Численные расчеты проводились при единой для всех вариантов скорости истечения сверхзвуковой струи вязкого сжимаемого газа 2М. Скорость входного потока варьировалась. Были рассмотрены 3 варианта: 2M, 2.25M, 2.5M. Также варьировалась толщина пограничного слоя δ = 0.5, 1.0, 1.5, 2.

Далее будем называть стандартным вариант со следующими параметрами: скорость истечения струи равна 2М, скорость набегающего потока равна 2М, задаваемая толщина пограничного слоя  $\delta = 1.0$ .

### 4. Результаты расчетов

Для всех вариантов вариации параметра скорости набегающего потока 2M, 2.25M, 2.5M были получены качественные картины течения, представленные на рисунках 2, 3, 4 соответственно. Для этого набора задач толщина пограничного слоя задается как  $\delta = 1.0$ . Рисунки представляют поле давления установившегося течения и линии тока, позволяющие отслеживать структуру образующихся отрывных зон.

На рис. 2 показано поле давления для скорости входного потока 2*M* и скорости истечения из сопла 2*M*. Возникает отраженная ударная волна, которая влияет на характеристики потока. Перед струйной преградой образуется отрывная зона размером приблизительно 0.003 метра.



Рис. 2. Поле давления для скорости входного потока 2 М

На следующем рисунке представлено поле давления и линии тока для варианта расчета, где задана скорость набегающего потока 2.25*M*. Общая картина течения схожа с предыдущим вариантом, однако здесь горизонтальный размер отрывной зоны существенно уменьшается. Для данного случая образуется отрывная зона размером 0.002 метра, что в 1.5 раза меньше, чем в предыдущем случае.



Рис. 3. Поле давления для скорости входного потока 2.25 М

На рис. 4 показано поле давления для скорости входного потока 2.5*M*. По представленной картине можно судить о том, что поперечная струя под влиянием внешнего потока изгибается и уносится потоком. Перед струйной преградой образуется отрывная зона размером приблизительно 0.0025 метра.



Рис. 4. Поле давления для скорости входного потока 2.5 М

На рисунках 5, 6, 7, 8 представлены поля давления с линиями тока вариантов расчетов с вариацией задаваемой толщины пограничного слоя  $\delta$  для фиксированной скорости набегающего потока, равной 2*M*, и фиксированной скорости истечения струи из сопла, равной 2*M*. Варьировалась толщина пограничного слоя  $\delta = 0.5$ , 1.0, 1.5, 2. Соответственно, рис. 6 ( $\delta = 1.0$ ) совпадает с рис. 2.



Рис. 5. Поле давления, толщина пограничного слоя х0.5

Как представлено на рис. 5, при толщине пограничного слоя, равной 0.5 от стандартного варианта, образуется отрывная зона размером 0.002 метра. Вторичных отрывных зон не образуется.



Рис. 6. Поле давления, толщина пограничного слоя х1

На рис. 6, при стандартной толщине пограничного слоя, образуется отрывная зона размером 0.003 метра. Вторичных отрывных зон также не образуется.



Рис. 7. Поле давления, толщина пограничного слоя х1.5

При дальнейшем увеличении толщины пограничного слоя можно заметить, что характер течения, представленного на рис. 7, изменился. При толщине пограничного слоя  $\delta = 1.5$  образуется отрывная зона размером 0.002 метра. Также образуется вторичная отрывная зона.



Рис. 8. Поле давления, толщина пограничного слоя х2

При толщине пограничного слоя δ = 2.0 образуется отрывная зона размером 0.0035 метра. Также увеличивается размер вторичной отрывной зоны. Это показано на рис. 8.

Таким образом, при увеличении толщины пограничного слоя происходит увеличение размера отрывных зон. Если пограничный слой толще, чем в стандартном варианте, происходит образование вторичных отрывных зон.

### Заключение

Проведено численное моделирование взаимодействия сверхзвукового вязкого ламинарного потока со струйной преградой при вариации параметров набегающего потока. Струйная преграда формировалась за счет впрыска поперечной струи в набегающий поток. Задача рассматривалась в рамках решения полной системы уравнений Навье-Стокса на основе открытого OpenFOAM. Для численного программного пакета решения залачи использовался гибридный солвер pisoCentralFoam, сочетающий в себе свойства схемы Курганова-Тадмора и метода PISO. Показано, что с помощью гибридного солвера pisoCentralFoam может быть получена качественная картина течения. Исследовано изменение качественной картины течения при вариации скорости набегающего потока и толщины пограничного слоя в набегаюшем потоке.

Данная работа продолжает исследования по построению масштабного обобщенного вычислительного эксперимента для моделирования взаимодействия сверхзвуковых потоков со струйными преградами. Подобный эксперимент предполагает вариацию ряда определяющих параметров, в числе которых могут рассматриваться: число Маха набегающего потока, скорость истечения струи, число Рейнольдса, нерасчетность струи, ширина сопла, толщина пограничного слоя набегающего потока.

Подобный численный эксперимент должен позволить изучить изменение качественной картины течения при вариации набора определяющих параметров в заданных диапазонах.

### Библиографический список

- 1. Шец Д., Хокинс П.Ф., Леман Х. Структура поперечных струй, истекающих в сверхзвуковой поток с большой степенью недорасширения // Ракетная техника и космонавтика. 1967. № 5. С. 65–69.
- 2. Спейд Ф., Зукоски Е.Е. Исследование взаимодействия газовой струи, вытекающей из поперечной щели, со сверхзвуковым потоком // Ракетная техника и космонавтика. 1968. № 2. С. 16–25.
- 3. Глаголев А.И., Зубков А.И., Панов Ю.А. Взаимодействие струи газа, вытекающей из отверстия в пластине, со сверхзвуковым потоком // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1968. № 2. С. 99–102.
- 4. Авдуевский В.С., Медведев К.И., Полянский М.Н. Взаимодействие сверхзвукового потока с поперечной струей, вдуваемой через круглое отверстие в пластине // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1970. № 5. С. 193–197.
- 5. Авдуевский В.С., Крюков В.Н., Осипов Ю.А., Солнцев В.П. Исследование течения в отрывных зонах перед сверхзвуковыми струями в дозвуковом потоке // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1975. № 2. С. 64–70.
- 6. Авдуевский В.С., Крюков В.Н., Осипов Ю.А., Солнцев В.П. Исследование теплообмена в отрывных зонах перед сверхзвуковыми струями в дозвуковом сносящем потоке // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1975. № 4. С. 68–72.
- Бруель П., Найманова А.Ж. Расчет нормального вдува струи водорода в сверхзвуковом потоке воздуха // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 4. С. 531–541.
- 8. Бекетаева А.О., Моисеева Е.С., Найманова А.Ж. Численное моделирование взаимодействия ударной волны с пограничным слоем в плоском сверхзвуковом потоке со вдувом струи // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 2. С. 181–191.
- Bondarev A.E. Analysis of unsteady space-time structures using the optimization problem solution and visualization methods // Conference proceedings of 22-th International Conference on Computer Graphics and Vision, Lomonosov Moscow State University, October 01–05, 2012. pp. 184–188.
- 10.Bondarev A.E., Galaktionov V.A. Analysis of Space-Time Structures Appearance for Non-Stationary CFD Problems / Proceedings of 15-th International Conference On Computational Science ICCS 2015 Reykjavik,

Iceland, June 01-03 2015, Procedia Computer Science. Vol. 51. pp. 1801–1810. doi:10.1016/j.procs.2015.05.396

- 11.Bondarev A.E. On the Construction of the Generalized Numerical Experiment in Fluid Dynamics // Mathematica Montisnigri. 2018. Vol. XLII. pp. 52–64
- 12.Bondarev A.E. On visualization problems in a generalized computational experiment // Scientific Visualization. 2019. Vol. 11. № 2. pp. 156–162. doi:10.26583/sv.11.2.12
- 13.Bondarev A.E. On the Estimation of the Accuracy of Numerical Solutions in CFD Problems // ICCS 2019, Lecture Notes in Computer Science (LNCS). 2019. Vol. 11540. pp. 325–333. doi:10.1007/978-3-030-22750-0\_26
- 14.Бондарев А.Е., Кувшинников А.Е., Михайлова Т.Н., Рыжова И.Г. Моделирование течения перед струйной преградой // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 141. 12 с. doi:10.20948/prepr-2019-141
- 15. OpenFOAM Foundation, OpenFOAM: Free CFD software, 2021, URL: http://www.openfoam.org.
- 16.Jasak H. OpenFOAM: Open source CFD in research and industry // Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. 2009. Vol. 1. Issue 2. pp. 89–94. doi:10.2478/IJNAOE-2013-0011
- 17.Kraposhin M., Bovtrikova A., Strijhak S. Adaptation of Kurganov-Tadmor numerical scheme for applying in combination with the PISO method in numerical simulation of flows in a wide range of Mach numbers. // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 66. pp. 43–52. doi:10.1016/j.procs.2015.11.007

### Оглавление

1.	Введение	3
2.	Гибридный солвер pisoCentralFoam программного пакета OpenFOAM	4
3.	Постановка задачи	5
4.	Результаты расчетов	7
3aı	слючение	12
Би	блиографический список	13