ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 141 за 2019 г.

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

**Бондарев А.Е., Кувшинников А.Е.,
Михайлова Т.Н., Рыжова И.Г.**

**Моделирование течения
перед струйной преградой**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Моделирование течения перед струйной преградой / А.Е.Бондарев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 141. 12 с. <http://doi.org/10.20948/prepr-2019-141>
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-141>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

А.Е. Бондарев, А.Е. Кувшинников, Т.Н. Михайлова,
И.Г. Рыжова

Моделирование течения
перед струйной преградой

Москва — 2019

Бондарев А.Е., Кувшинников А.Е., Михайлова Т.Н., Рыжова И.Г.

Моделирование течения перед струйной преградой

В работе рассматриваются результаты численного моделирования задачи о взаимодействии сверхзвукового потока со струйной преградой. Задача решается в рамках системы уравнений Навье–Стокса. Рассматриваются ламинарные течения. Исследуется изменение качественной картины течения при вариации скорости поперечной струи, образующей струйную преграду. Расчеты проводились с помощью открытого программного пакета OpenFOAM.

Ключевые слова: сверхзвуковое течение, уравнения Навье–Стокса, струйная преграда, OpenFOAM

Alexander Evgenyevich Bondarev, Artem Evgenyevich Kuvshinnikov, Tatiana Nikolaevna Mikhailova, Irina Gennadievna Ryzhova

Modelling of the flow in front of the jet obstacle

The paper considers the numerical simulation results for the problem of a supersonic flow interaction with a jet obstacle. The problem is solved within the framework of the Navier–Stokes system of equations. The simulation considers laminar flows. The change in the flow pattern with velocity variation of the transverse jet forming the jet obstacle is investigated. The calculations were carried out using the open software package OpenFOAM.

Key words: supersonic flow, Navier-Stokes equation, jet obstacle, OpenFOAM

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 19-01-00402-а.

1. Введение

Задача расчета отрывного течения перед преградой входит в комплекс задач аэроакустики, таких как обтекание космических кораблей при спуске в атмосферу или создание энергоэффективных реактивных самолетов нового поколения. Подобные задачи являются многопараметрическими и связаны с характеристиками набегающего потока. Благодаря современным компьютерным технологиям возможно полноценное проведение параметрических исследований. Такого рода исследования предполагают многократное решение прямой задачи математического моделирования при вариации определяющих параметров задачи. К определяющим параметрам задачи можно отнести характерные числа, такие как число Маха, число Рейнольдса, число Струхала и т.п., и геометрические параметры задачи. Для исследования подобных задач был разработан подход обобщенного вычислительного эксперимента [1–5].

Обобщенный вычислительный эксперимент позволяет получить в дискретном виде решение сразу целого класса задач. Класс задач определяется диапазонами изменения определяющих параметров. Предположим, что существует надежный численный метод решения двумерных и трехмерных нестационарных задач вычислительной газовой динамики. Тогда мы можем получить численное решение $F(x, y, z, t, A_1, \dots, A_n)$ для любой точки в пространстве вычислительной области, где x, y, z — пространственные координаты, t — время, $A_1, \dots, A_n$ являются определяющими параметрами задачи. Определяя параметры задачи, мы будем иметь в виду характерные числа, описывающие свойства рассматриваемого потока, такие как числа Маха, Рейнольдса, Прандтля, Струхала, а также характерные геометрические параметры. Каждый из характерных параметров ограничен определенным диапазоном:

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

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 невозможно без использования параллельных вычислений в многозадачном режиме. На практике число N обычно не превышает 5, что соответствует вычислительным возможностям в настоящее время.

В результате реализации обобщенного численного эксперимента и выполнения параллельных вычислений мы получаем большой набор данных, представляющий собой набор численных решений $F(x, y, z, t, A_1, \dots, A_n)$ для каждой точки $(A_1^*, \dots, A_n^*)$ разбиения многомерного объема определяющих

параметров $(A_1, \dots, A_n)$ в рассматриваемой задаче. Этот объем в первоначальном виде довольно сложен в использовании. Для извлечения полезной информации из такого объема данных следует применять методы анализа многомерных данных и визуальной аналитики. Такой подход позволяет получить ценную информацию о зависимости интересующих газодинамических функций или ценных функционалов (подъемная сила, сила сопротивления) от определяющих параметров. Следует отметить, что, как правило, при изучении условий возникновения физического эффекта (например, возникновения пространственно-временной структуры) предметом первичного интереса являются не газодинамические поля, а определенные маркеры или целевые функции, определяемые с помощью этих полей.

2. Гибридный солвер pisoCentralFoam программного пакета OpenFOAM

Многочисленные проблемы газовой динамики требуют моделирования турбулентных сжимаемых течений в широком диапазоне чисел Маха. Возможность обеспечения монотонности для решения с большими градиентами является одним из основных критериев оценки качества метода при вычислительном моделировании таких потоков. При решении практических вопросов это достигается использованием таких специальных схем, как схемы, использующие приближенное решение проблемы Римана, схема Курганова-Тадмора.

Реализация этих схем в коммерческих пакетах, а также в пакете программного обеспечения с открытым исходным кодом OpenFOAM различных версий [6,7] хорошо зарекомендовала себя при решении проблем течений вязкой и невязкой жидкости. Единственным недостатком его использования является ограничение скорости среды на нижней границе диапазона применимости: минимальное число Маха должно приближаться к околосзвуковым условиям. Использование этих моделей для моделирования вязкого течения с малыми числами Маха ($<0,3$) невозможно даже при достаточном уменьшении временного шага, чтобы акустические критерии Куранта не превышали $1/2$. Такие ограничения создают несколько препятствий для изучения аэродинамики устройств в предельных условиях с помощью одной модели, например, при переходе от дозвуковых к сверхзвуковым условиям потока.

В то же время существует ряд полуневязных методов решения дозвуковых задач, которые успешно применяются в промышленности для потоков с большим числом Маха - PISO, SIMPLE и их комбинации [8]. Неудобство этих методов состоит в возникновении численных колебаний в областях разрывов свойств потока, которые имеют место в высокоскоростных потоках — например, схема Курганова-Тадмора и алгоритм PISO сравниваются в [9].

Решение может быть найдено в реализации гибридной схемы, 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.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0,$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = \nabla \cdot \Pi,$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} E) = \nabla \cdot (\Pi \cdot \vec{U}),$$

где ρ — плотность, $\vec{U}$ — вектор скорости с компонентами (u, v, w) , $E = e + |\vec{U}|^2/2$ — удельная полная энергия газа, e — удельная внутренняя энергия газа, Π — тензор вязких напряжений.

Авторы [10] решили обратить внимание на схему Курганова-Тадмора, которая, с одной стороны, была реализована в пакете OpenFOAM и неоднократно тестировалась, а с другой — была достаточно простой, чтобы использоваться как часть гибридной схемы. Другой важной особенностью этой схемы является независимость аппроксимирующих выражений для потоков физических величин от характеристик исследуемой системы уравнений. Иными словами, нет необходимости каждый раз решать задачу Римана о распаде произвольного разрыва. Ограничением схемы Курганова-Тадмора (КТ) является необходимость поддержания акустического числа Куранта менее 1/2, что приводит к заниженным временным шагам в случае низкоскоростной среды. Кроме того, при решении дозвуковых задач возникают нефизические осцилляции.

Предлагаемая в [10] гибридная схема, основанная на PISO и КТ, с одной стороны, отвечает требованию монотонности, а с другой стороны, она позволила бы моделировать течение в широком диапазоне чисел Маха $0 < M < 6$. В этом случае моделирование в диапазоне малых и очень низких чисел Маха ($M < 0,5$) было бы возможно при акустическом числе Куранта, намного превышающем 1. Идея метода заключается во введении переключателя, который при приближении к дозвуковому диапазону скоростей переключал бы приближенное выражение для потоков к стандартной форме, используемой в методе PISO.

Как уже упоминалось, схема КТ, реализованная в OpenFOAM, является явной, что делает ее непригодной для изучения потоков с небольшими числами $M < 0,5$. Для достижения возможности моделирования потоков в этом диапазоне, в том числе с небольшими временными шагами, авторы [10] предложили гибридную схему, которая позволяет комбинировать свойства

алгоритмов PISO/SIMPLE и KT с использованием функции переключения. Идея гибридной схемы заключается в следующем:

- 1) формулировка массовых потоков по схемам KT;
- 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 KT.

Использование этого подхода не только значительно упрощает реализацию схем в OpenFOAM, но также позволяет учесть турбулентность с помощью встроенных функций библиотеки. Чтобы смешать дозвуковые и сверхзвуковые составы, была определена функция смешивания κ_f .

3. Постановка задачи

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 . 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 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 $T = 300$ К, скорость равна $(u_x, 0, 0)$, где $u_x = 868.125$ м/с ($2.5M$). 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 δ . 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 изменяется от 694.5 м/с ($2M$) до 868.125 м/с ($2.5M$). 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

Таблица 1

Граничные условия

Грань	P	T	U
inlet1	101325	300	2.5M
inlet2	101325	300	профиль скорости в пограничном слое
outlet	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
top	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
bottom	zeroGradient	zeroGradient	0
nozzle	zeroGradient	zeroGradient	от 2M до 2.5M
front&back	wedge	wedge	wedge

4. Результаты расчетов

Численные расчеты проводились при единой для всех вариантов скорости входного потока $2.5M$. Скорость истечения сверхзвуковой струи вязкого сжимаемого газа варьировалась. Были рассмотрены 3 варианта, где скорость истечения из сопла равнялась $2M$, $2.25M$, $2.5M$. Для всех вариантов были получены качественные картины течения, представленные на рис. 2—рис. 4 для

вариантов $2M$, $2.25M$, $2.5M$ соответственно. Рисунки представляют поле давления установившегося течения и линии тока.

На рис. 2 показано поле давления для скорости входного потока $2.5M$ и скорости истечения из сопла $2M$. 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. 2. Поле давления для скорости потока из сопла $2M$

На следующем рисунке представлено поле давления и линии тока для варианта расчета, где задана скорость набегающего потока $2.5M$ и скорость истечения струи из сопла $2.25M$. Общая картина течения схожа с предыдущим вариантом, однако здесь горизонтальный размер отрывной зоны увеличивается. Для данного случая образуется отрывная зона размером 0.00375 метра, что в 1.5 раза больше, чем в предыдущем случае.

Рис. 3. Поле давления для скорости потока из сопла 2.25M

На рис. 4 аналогичным образом представлено поле давления и линии тока для варианта расчета, где задана скорость набегающего потока 2.5M и скорость истечения струи из сопла 2.5M. В этом случае, когда скорость набегающего потока и истечения струи из сопла сравниваются, резко меняется характер течения. Возникает отраженная ударная волна, которая влияет на характеристики потока. Размер отрывной зоны уменьшается до 0.00175 метра. Также возникает множество вторичных отрывных зон

Рис. 4. Поле давления для скорости потока из сопла 2.5M

По результатам расчетов, область отрывного течения увеличивается по мере увеличения скорости истечения струи из сопла. Однако при достижении равенства скорости набегающего потока и скорости истечения струи из сопла отрывная область уменьшается в размере и разбивается на несколько мелких отрывных областей.

Заключение

Проведено численное моделирование взаимодействия сверхзвукового вязкого ламинарного потока со струйной преградой. Струйная преграда была образована за счет впрыска поперечной струи в набегающий поток. Задача решалась в рамках полной системы уравнений Навье–Стокса на основе открытого программного пакета OpenFOAM. Для численного решения задачи 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.

Данная работа является начальным этапом построения масштабного обобщенного вычислительного эксперимента по моделированию 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, ширина пограничного слоя набегающего потока.

Подобный численный эксперимент должен позволить изучить изменение качественной картины течения при вариации определяющих параметров. Следует отметить, что для получения надежных количественных характеристик требуются дальнейшие численные исследования влияния размеров счетной области, задания краевых условий и сеточного разбиения.

Библиографический список

1. 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.
2. 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 Rejkjavik, Iceland, June 01-03 2015, Procedia Computer Science. Vol. 51. pp. 1801–1810. doi:10.1016/j.procs.2015.05.396.
3. Bondarev A.E. On the Construction of the Generalized Numerical Experiment in Fluid Dynamics // Mathematica Montisnigri. 2018. Vol. XLII. pp. 52–64.

4. 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.
5. 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.
6. Implementation of semi-discrete, non-staggered central schemes in a colocated, polyhedral, finite volume framework, for high-speed viscous flows. / Christopher J. Greenshields, Henry G. Wellerr, Luca Gasparini, Jason M. Reese // *Int. J. Numer. Meth. Fluids*. 2010. Vol. 63. № 1. pp. 1–21. doi:10.1002/fld.2069.
7. Chun S., Fengxianb S., Xinlin X. Analysis on capabilities of density-based solvers within OpenFOAM to distinguish aerothermal variables in diffusion boundary layer // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2013. Vol.26. № 6. pp. 1370–1379. doi:10.1016/j.cja.2013.10.003.
8. Ferziger J.H., Peric M. *Computational methods for fluid dynamics*, 3rd Edition. Springer. 2002.
9. Gutierrez L. F. M., Tamagno J. P., Elaskar S. A. High speed flow simulation using OpenFOAM // *Mecanica Computacional*. 2012. Vol. XXXI. pp. 2939–2959.
10. 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	6
4. Результаты расчетов	7
Заключение.....	10
Библиографический список.....	10