

Сравнение солверов пакета OpenFOAM для задачи невязкого обтекания конуса при вариации угла атаки

Бирюков Е.Д, Кувшинников А.Е., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
birukov@gin.keldysh.ru, kuvsh90@yandex.ru

Аннотация

Научная статья посвящена анализу численных результатов решения задачи обтекания конуса при вариации угла атаки для ряда солверов пакета OpenFOAM. Результаты, полученные с помощью различных солверов OpenFOAM, сравниваются с известным численным решением задачи. Данная работа является частью проекта, направленного на создание надежной вычислительной технологии для моделирования потоков вокруг удлиненных тел вращения (УТВ).

1 Введение

Данная работа является частью цикла статей [Bondarev, Kuvshinnikov, 2018; Бондарев, Кувшинников, 2017], направленных на создание новой методики расчета обтекания удлиненных тел вращения (УТВ). Подобные разработки обусловлены тем, что в настоящее время существует множество программных пакетов, решающих подобные задачи. Тем самым, у исследователя возникает вопрос, какой пакет лучше подходит для подобных вычислений. Авторами было предложено воссоздать на уровне современных высокопроизводительных вычислительных средств вычислительную технологию, разработанную ранее в ИПМ им. М.В. Келдыша А.Е. Бондаревым и В.А. Черкашиным под руководством А.В. Забродина. Суть данной технологии заключалась в том, что коэффициент аэродинамического сопротивления УТВ C_x рассматривается как сумма трех других коэффициентов: C_p – сопротивления УТВ при невязком обтекании, C_f – коэффициента сопротивления трения и C_d – донного сопротивления. Подобный подход был широко распространен в задачах массового промышленного анализа аэродинамических свойств УТВ и показывал себя весьма эффективным [Красильщиков, Гурьяшкин, 2007].

Для расчета аэродинамических характеристик УТВ при невязком обтекании использовался программный пакет OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD

Toolbox) [OpenFOAM]. Это свободно распространяемый программный продукт, созданный для решения задач гидро и газодинамики. Его используют во многих областях науки и техники, как в коммерческих, так и в академических организациях. OpenFOAM содержит в себе ряд солверов обладающих различными вычислительными свойствами.

Стоит пояснить, что в OpenFOAM существует как заранее созданные разработчиками солверы [Kurganov, Tadmor, 2000; Greenshields et al, 2010; Issa, 1986], так и возможность создавать собственные солверы, что использовали авторы из ИСП РАН [Kraposhin, Bovtrikova, Strijhak, 2015; Github].

В качестве точного решения традиционно использовались табличные решения [Бабенко и др., 1964]. Решения, представленные в [Бабенко и др., 1964], получены с помощью конечно-разностных методов для обтекания гладких тел потоком невязкого газа в широком диапазоне чисел Маха и углов полураствора конуса с вариацией угла атаки. Решения представлены в виде таблиц, обладают высокой точностью и на протяжении многих лет используются в качестве точного решения при анализе вычислительных свойств того или иного численного метода.

В данный момент пройден этап вычисления задачи обтекания УТВ под нулевым углом атаки. Перешли к расчету задач при вариации угла атаки.

Следует отметить, что подобные сравнения солверов проводились в работах [Карвацкий и др., 2015; Gutierrez., Tamagno, Elaskar, 2012; Lorenzon, Elaskar, 2015]. Однако эти сравнения проводились на других примерах и не дают четких рекомендаций по выбору солвера для рассматриваемого класса задач.

2 Постановка задачи

Постановка задачи представлена в полном соответствии с работой [Бабенко и др., 1964], где рассматриваются результаты невязкого обтекания конусов с различными углами полураствора на различных числах Маха.

Исследуется обтекание УТВ равномерным сверхзвуковым потоком идеального газа под

углом атаки $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ при числе Маха $M = 3$. Исследуемое тело является конусом с углом полураствора $\beta = 20^\circ$. Условия набегающего потока на входе обозначаются индексом « ∞ », а на выходе — индексом ξ , так как решение является автомодельным и зависит от безразмерной переменной. Схема течения представлена на Рис. 1.

Для расчета используется система уравнений Эйлера. Система дополняется уравнением состояния идеального газа.

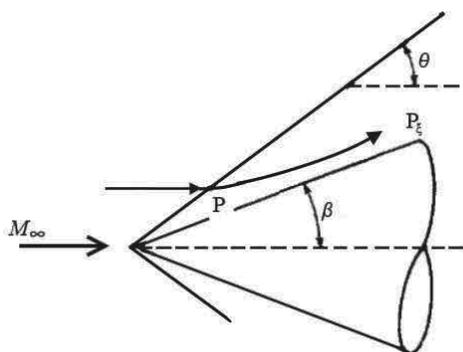


Рис. 1. Схема течения

3 Выбор солверов OpenFOAM

Для сравнения из программного пакета OpenFOAM были выбраны 3 солвера.

1) rhoCentralFoam — основан на центрально-противопотоковой схеме, которая является комбинацией центрально-разностной и противопотоковой схем [Kurganov, Tadmor, 2000; Greenshields et al]. Суть центрально-противопотоковых схем состоит в специальном выборе контрольного объема, содержащего области двух типов: вокруг граничных точек – первый тип; вокруг центральной точки – второй тип. Границы контрольных объемов первого типа определяются при помощи локальных скоростей распространения возмущений. Преимущество указанных схем состоит в том, что, применяя соответствующую технику уменьшения численной вязкости, можно добиться хорошей разрешимости и для разрывных решений – ударных волн в газовой динамике – и для решений, где основную роль играют вязкие явления.

2) sonicFoam — основан на алгоритме PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) [Issa, 1986]. Основная идея метода PISO заключается в том, что для расчета давления используются два разностных уравнения для поправки поля давления, полученных из дискретных аналогов уравнений моментов и неразрывности. Такой подход связан с тем, что

скорректированные первой поправкой скорости могут не удовлетворять уравнению неразрывности, поэтому вводится второй корректор, который позволяет вычислить скорости и давления, удовлетворяющие линейризованным уравнениям количества движения и неразрывности.

3) pisoCentralFoam — комбинация центрально-противопотоковой схемы с алгоритмом PISO [Kraposhin, Bovtrikova, Strijhak, 2015].

Солвер rhoPimpleFoam был исключен из рассмотрения в результате анализа расчетов обтекания УТВ в осесимметричной постановке.

Расчеты для всех солверов проводились с помощью программного пакета OpenFOAM версии 2.3.0.

4 Организация расчетов и полученные результаты

4.1 Построение сетки, начальные и граничные условия

На Рис. 2 представлена расчетная область. Постановка граничных условий представлена в Табл. 1. На границах, обозначенных в таблице «top», «bottom», «front» и «back», задается условие нулевого градиента для газодинамических функций, обозначаемое в таблице «zeroGradient». Такие же условия задаются на правой границе, обозначаемой «outlet». На левой границе, обозначаемой «inlet», заданы параметры набегающего потока: давление $P = 101325$ Па, температура $T = 300$ К, скорость $U = 1041.75$ м/с. На границе конуса «cone» для давления и температуры задается условие нулевого градиента, для скорости задается условие «slip», соответствующее условию непротекания для уравнений Эйлера. Число ячеек сетки 336000.

4.2 Параметры солверов

В пакете OpenFOAM существует два варианта аппроксимации дифференциальных операторов: непосредственно в коде решателя или с использованием файлов конфигурации fvSchemes и fvSolution. Для того, чтобы сравнение было правильным, мы использовали одинаковые параметры там, где это было возможно.

В файле fvSchemes: ddtSchemes – Euler, gradSchemes – Gauss linear, divSchemes – Gauss linear, laplacianSchemes – Gauss linear corrected, interpolationSchemes – vanLeer.

В файле fvSolution: solver – *smoothSolver*,
smoother *symGaussSeidel*, tolerance – 1e-09,
nCorrectors – 2, nNonOrthogonalCorrectors – 1.

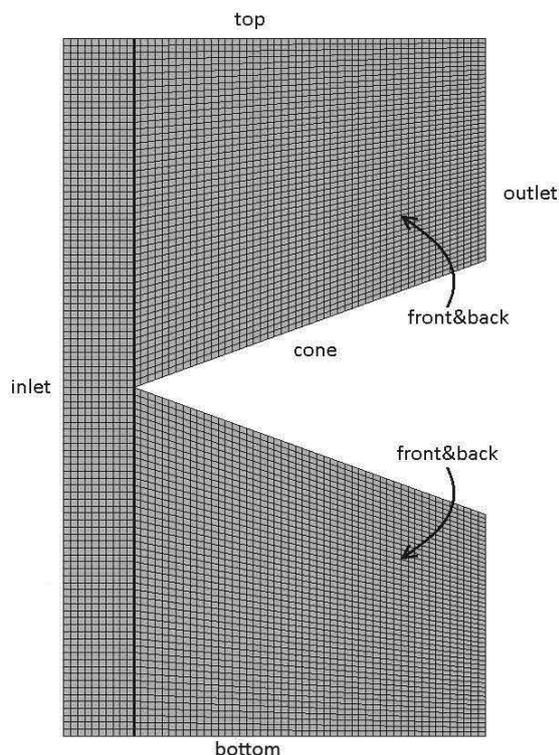


Рис. 2. Расчетная область

Табл. 1. Граничные условия

	P	T	U
inlet	101325	300	Mach 3
outlet	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
top	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
bottom	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
cone	zeroGradient	zeroGradient	slip
front	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
back	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient

4.3 Расчет осесимметричного течения

На Рис. 3 представлено поле установившегося течения для давления при использовании интерполяции табличного решения из [Бабенко и др., 1964].

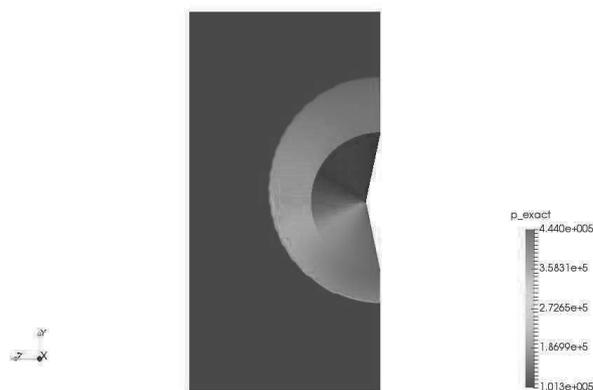


Рис. 3. Поле давления для установившегося течения

В Табл. 2–4 приведены результаты расчетов в форме аналога нормы L2:

$$\sqrt{\sum_m |y_m - y_m^{exact}|^2 V_m} / \sqrt{\sum_m |y_m^{exact}|^2 V_m}$$

где y_m — компоненты скорости U_x , давление p и плотность ρ в ячейке, V_m — объем ячейки для угла полураствора конуса $\beta = 20^\circ$ числа Маха $M = 3$, угол атаки $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$. Жирным выделены минимальные значения. Здесь значения y_m^{exact} получены интерполированием табличных значений из [Бабенко и др., 1964] на ячейки сетки. Следует отметить, что авторы таблиц [Бабенко и др., 1964] указывают на допустимость интерполяции по всем параметрам и значениям таблиц.

Далее для солверов будем использовать сокращенные обозначения: rCF (rhoCentralFoam), pCF (pisoCentralFoam), sF (sonicFoam).

Табл. 2. Отклонение от точного решения для давления p

Угол атаки	rCF	pCF	sF
0	0.060614	0.069128	0.123338
5	0.065373	0.075543	0.149785
10	0.072673	0.081022	0.172609

Табл. 3. Отклонение от точного решения для компоненты скорости U_x

Угол атаки	rCF	pCF	sF
0	0.017077	0.014436	0.022867
5	0.017155	0.015589	0.026898
10	0.020015	0.020474	0.031979

Табл. 4. Отклонение от точного решения для плотности ρ

Угол атаки	rCF	pCF	sF
0	0.048488	0.055532	0.107592
5	0.051132	0.059087	0.127270
10	0.054281	0.062283	0.141899

Рис. 5 представляет диаграмму отклонения от точного решения в аналоге нормы L_2 для давления для всех использованных солверов на примере задачи обтекания конуса с углом полураствора $\beta = 20^\circ$ при числе Маха $M=3$ в зависимости от угла атаки. Наименьшее отклонение от точного решения показывает солвер rhoCentralFoam, наибольшее отклонение показывает солвер sonicFoam.

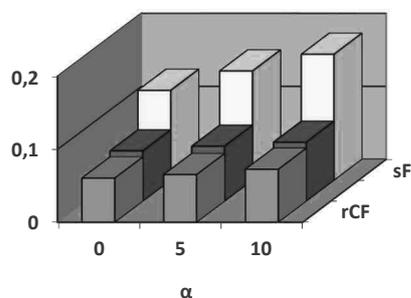


Рис. 5. Отклонение от точного решения для давления в зависимости от угла атаки и солвера для угла полураствора $\beta = 20^\circ$

5 Заключение

Для задачи обтекания конуса сверхзвуковым потоком идеального газа при вариации угла атаки было проведено сравнение трех солверов программного пакета OpenFoam с точным решением, полученным из таблиц [Бабенко и др., 1964]. Результаты расчетов были представлены в целях сравнительного анализа в форме аналога нормы L_2 .

Согласно полученным результатам солвер rhoCentralFoam обладает минимальной нормой погрешности поля почти во всех случаях. Единственным недостатком rhoCentralFoam является появление осцилляций у поверхности в головной части конуса. Солвер pisoCentralFoam находится на втором месте по точности, однако при использовании этого солвера появления осцилляций не наблюдается. Результаты качественно схожи с осесимметричным случаем.

Солвер sonicFoam более точно вычисляет компоненты скорости. Но в этом солвере наблюдаются осцилляции на фронте ударной волны. Это негативно сказывается на норме погрешности. Таким образом, можно утверждать, что солверы rhoCentralFoam и pisoCentralFoam обеспечивают лучшую точность для интересующего класса задач и могут быть использованы при построении вычислительной технологии расчетов обтекания удлиненных тел вращения.

Проведенное методическое исследование может служить основой для выбора солвера программного пакета OpenFoam при расчете невязкого сверхзвукового обтекания УТВ, а также может быть полезным для разработчиков программного контента OpenFoam.

В дальнейшем предполагается провести аналогичное сравнение солверов для задачи обтекания конуса под углом атаки при вариации угла атаки, угла полураствора и числа Маха набегающего потока. Следует также заметить, что в сравнительный анализ могут быть дополнительно включены результаты для новых солверов, полученных от разработчиков.

Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 18-31-00320-мол_а.

Список литературы

- Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E. *Analysis of the accuracy of OpenFOAM solvers for the problem of supersonic flow around a cone* // ICCS 2018, Lecture Notes in Computer Science (LNCS). 2018. Vol. 10862. P. 221–230. doi:10.1007/978-3-319-93713-7_18.
- Бондарев А.Е., Кувшинников А.Е. *Сравнительный анализ точности солверов пакета OpenFOAM для задачи невязкого обтекания конуса* // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 12. 16 с. doi:10.20948/prepr-2017-12.
- Красильщиков А.П., Гурьяшкин Л.П. *Экспериментальные исследования тел вращения в гиперзвуковых потоках.*— М.:ФИЗМАТЛИТ. 2007.-208 с.
- OpenFOAM, URL: <http://www.openfoam.org>. (дата обращения 01.03.2019).
- Kurganov A., Tadmor E. *New high-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection-diffusion equations* // J. Comput. Phys. 2000. Vol. 160. P. 241–282, doi:10.1006/jcph.2000.6459.
- 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. Issue 1. P. 1–21, doi:10.1002/fld.2069.
- Issa R. *Solution of the implicit discretized fluid flow equations by operator splitting* // J. Comput. Phys. 1986. Vol. 62. Issue 1. P. 40–65, doi:10.1016/0021-9991(86)90099-9.
- 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, P. 43–52. doi:10.1016/j.procs.2015.11.007.
- GitHub: United collection of hybrid Central solvers <https://github.com/unicfdlab/hybridCentralSolvers> (дата обращения 01.03.2019).
- Пространственное обтекание гладких тел идеальным газом.* / К. П. Бабенко, Г. П. Воскресенский, А. Н. Любимов, В. В. Русанов. — М.: Наука, 1964.
- Численное моделирование сверхзвукового обтекания клина с применением свободного открытого программного кода OpenFOAM.* / А. Я. Карвацкий, П. В. Пулинец, Т. В. Лазарев, А. Ю. Педченко // Космічна наука і технологія. — 2015 — Т. 21, № 2. — С. 47–52.
- Gutierrez L. F. M., Tamagno J. P., Elaskar S. A. *High speed flow simulation using OpenFOAM* // *Mecanica Computacional* Vol XXXI, Salta, Argentina, 2012. P. 2939–2959.
- Lorenzon D., Elaskar S. A. *Simulacion de flujos supersonicos bidimensionales y axialmente simetricos con OpenFOAM* // Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales, 2015. Vol. 2. no. 2. P. 65–76. URL: <http://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/11061>