

# Анализ результатов параметрических расчетов задачи невязкого обтекания конуса в пакете OpenFOAM

Копылов М.С., Кувшинников А.Е., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН  
 kopylov@gin.keldysh.ru, kuvsh90@yandex.ru

## Аннотация

В данной работе приводятся результаты оценки численных расчетов солверов пакета OpenFOAM при помощи программного комплекса ViDaExpert. Для анализа использовался алгоритм отображения исходного многомерного объема в упругих картах. Показано, что ошибки солверов rhoCentralFoam и pisoCentralFoam можно грубо аппроксимировать плоскостью.

## 1 Введение

В ИПМ им. М.В. Келдыша ведется работа по созданию технологии решения задач обтекания удлиненных тел вращения (УТВ) сверхзвуковым потоком газа под углами атаки. Одной из частей этой технологии является нахождение  $C_p$  — сопротивления УТВ при невязком обтекании. Для этого было необходимо решить задачу обтекания УТВ, для которой существовало аналитическое или табличное решение. Была выбрана задача невязкого обтекания конуса под нулевым углом атаки. Результатом работы явилась статья [Bondarev, Kuvshinnikov, 2018], где были приведены таблицы норм ошибок поля давления для данной задачи в разностном аналоге нормы  $L_2$ .

## 2 Постановка задачи

Исследовались 4 солвера программного пакета OpenFOAM — rhoCentralFoam, pisoCentralFoam, sonicFoam, rhoPimpleFoam. Все эти солверы обладают разными аппроксимационными и вычислительными свойствами. В качестве точного решения для сравнения использовались табличные данные [Бабенко и др., 1964], сравнение проводилось с помощью аналога нормы  $L_2$ . Таким образом, были получены наборы ошибок для разных чисел Маха и углов полураствора конуса. Примеры таких данных можно увидеть в Табл. 1 и Табл. 2.

Данные таблицы можно рассматривать как многомерный набор данных. Анализ этих данных сводится к задаче классификации. При решении задач классификации очень полезными оказываются подходы визуальной аналитики

— представление многомерных данных в качестве двумерных или трёхмерных изображений. Был выбран алгоритм отображения исходного многомерного объема в упругих картах [Зиновьев, 2000; Bondarev, Bondarenko, Galaktionov, 2018]. Визуализация проводилась с помощью программного комплекса ViDaExpert [ViDaExpert], позволяющего проводить построение и визуальное представление упругих карт. Данные, полученные в [Bondarev, Kuvshinnikov, 2018], были анализированы, используя описанную в [Bondarev, Bondarenko, Galaktionov, 2018] систему процедур обработки многомерных объемов данных.

Табл. 1. Отклонение от точного решения для давления  $p$  при числе Маха  $M = 2$

Угол полураствора конуса	rCF	pCF	sF	rPF
10	<b>0.006090</b>	0.006973	0.010153	0.010341
15	0.012654	<b>0.014446</b>	0.019646	0.020645
20	<b>0.016623</b>	0.019353	0.022283	0.024951
25	<b>0.018678</b>	0.020948	0.020779	0.025426
30	<b>0.020695</b>	0.023130	0.025614	0.023267
35	<b>0.020483</b>	0.023193	0.032913	0.020621

Табл. 2. Отклонение от точного решения для давления  $p$  при числе Маха  $M = 3$

Угол полураствора конуса	rCF	pCF	sF	rPF
10	<b>0.015309</b>	0.019537	0.027152	0.027177
15	<b>0.024608</b>	0.030041	0.047813	0.041444
20	<b>0.030440</b>	0.035858	0.070564	0.045760
25	<b>0.032486</b>	0.038658	0.074849	0.043179
30	<b>0.034040</b>	0.040603	0.077408	0.040006
35	<b>0.026334</b>	0.029821	0.044853	0.027077

На Рис. 1 представлен многомерный массив данных для давления, полученных в результате параметрических расчетов, в пространстве первых главных компонент [ViDaExpert]. Желтым цветом представлены результаты для солвера rhoCentralFoam, красным — для pisoCentralFoam, зеленым — для sonicFoam и голубым — для rhoPimpleFoam. На Рис. 2

представлена упругая карта для этого же массива.

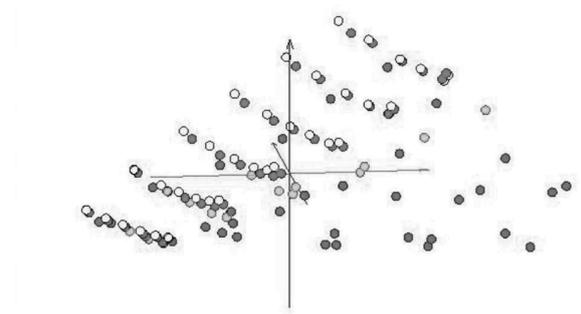


Рис. 1. Массив ошибок по давлению для 4-х солверов OpenFOAM при вариации числа Маха и угла полураствора конуса в пространстве главных компонент

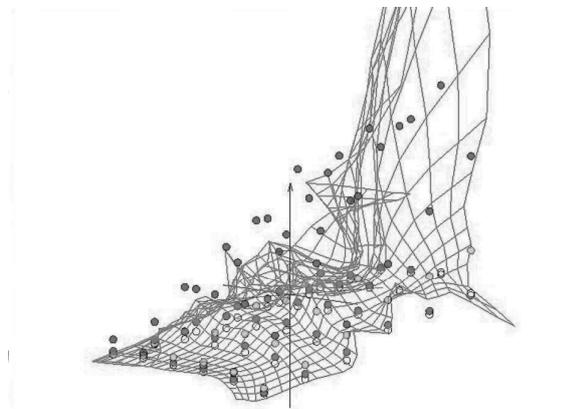


Рис. 2. Упругая карта для массива ошибок по давлению для 4-х солверов OpenFOAM

### 3 Заключение

Из приведенных рисунков можно увидеть, что ошибки для rhoCentralFoam и для pisoCentralFoam можно грубо аппроксимировать плоскостью, отражающей зависимость ошибки от числа Маха и угла полураствора. Результаты для sonicFoam и в особенности для rhoPimpleFoam существенно отделяются от результатов для двух первых солверов. Для более точного изучения массива ошибок для солверов в аналоге нормы  $L_2$  предполагается увеличить размерность рассматриваемого массива путем проведения всех сделанных ранее расчетов при вариации угла атаки набегающего потока.

### 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.

*Пространственное обтекание гладких тел идеальным газом* / Бабенко К.И., Воскресенский Г.П., Любимов А.Н., Русанов В.В. — М.: Наука, 1964. — 505 с.

Зиновьев А.Ю. *Визуализация многомерных данных* — Красноярск: Изд-во КГТУ, 2000. — 168 с.

Bondarev A.E., Bondarenko A.V., Galaktionov V.A. *Visual analysis procedures for multidimensional data* // Scientific Visualization. — 2018. — Vol. 10, Issue 4. — P. 120–133.

*Software package ViDaExpert*. URL: <http://bio-info.curie.fr/projects/vidaexpert/> (дата обращения 01.02.2019).