

# Сравнительный анализ точности солверов OpenFOAM при моделировании обтекания двойного клина высокоскоростным потоком

А.Е. Бондарев<sup>1,А</sup>, А.Е. Кувшинников<sup>2,А</sup>, С.В. Андреев<sup>3,А</sup>, И.Г. Рыжова<sup>4,А</sup>

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-3681-5212, [bond@keldysh.ru](mailto:bond@keldysh.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1667-6307, [kuvsh90@yandex.ru](mailto:kuvsh90@yandex.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-8029-1124, [esa@keldysh.ru](mailto:esa@keldysh.ru)

<sup>4</sup> ORCID: 0000-0003-1613-3038, [ryzhova@gin.keldysh.ru](mailto:ryzhova@gin.keldysh.ru)

## Аннотация

Данная статья посвящена сравнительному анализу точности различных солверов программного пакета OpenFOAM при численном моделировании обтекания двойного клина сверхзвуковым потоком невязкого газа. Рассмотрена двумерная установившаяся задача образования течения с пересечением косых скачков уплотнения. Проведено сравнение стандартных солверов rhoCentralFoam и sonicFoam, а также сторонних разработок pisoCentralFoam и QGDFoam. Результаты, полученные в табличном виде, визуализируются в качестве поверхностей ошибок. Анализ показал наилучшую точность солверов rhoCentralFoam и QGDFoam как для поля плотности, так и для поля модуля скорости. Полученные результаты могут быть использованы как в фундаментальных исследованиях, так и при инженерных расчетах, требующих высокой достоверности моделирования сложных течений.

**Ключевые слова:** OpenFOAM, обобщенный вычислительный эксперимент, двойной клин, косой скачок.

## Введение

С развитием вычислительных технологий и увеличением доступных вычислительных ресурсов задачи, ранее решаемые исключительно аналитическими или экспериментальными методами, всё чаще переходят в область численного моделирования. Это позволяет значительно расширить диапазон исследуемых параметров, ускорить процесс поиска оптимальных решений и снизить затраты на проведение дорогостоящих экспериментов. Тем не менее, точность и достоверность численных расчетов во многом зависят от используемых алгоритмов аппроксимации, выбора расчетной сетки и корректности реализации граничных условий.

Решение задач газовой динамики, связанных с пересечением косых скачков уплотнения, имеет ключевое значение для развития вычислительной аэродинамики и моделирования сложных течений. Косые скачки широко встречаются в сверхзвуковых потоках, в различных устройствах, где реализуются резкие перепады давления и скорости. Правильное численное воспроизведение этих явлений требует применения эффективных и точных методов решения уравнений Эйлера и Навье–Стокса. Одной из популярных платформ для численного моделирования таких задач является программный пакет OpenFOAM [1], предоставляющий богатый набор солверов и инструментов для решения уравнений газовой динамики.

Однако, несмотря на широкий выбор реализованных в OpenFOAM солверов, вопрос сравнения их точности в задачах, связанных с пересечением косых скачков, остается

открытым. Сложность моделирования усугубляется наличием резких градиентов параметров, возникающих на фронтах скачков, а также их взаимодействием, что требует от численных методов высокой разрешающей способности. Известно, что различные солверы могут по-разному справляться с этими трудностями, что напрямую влияет на достоверность получаемых результатов и возможность их использования в инженерной практике. OpenFOAM, как одна из наиболее гибких и активно развиваемых платформ с открытым исходным кодом, предоставляет исследователям широкие возможности для настройки численных схем и модификации алгоритмов под конкретные задачи. Однако обилие доступных солверов и настроек зачастую затрудняет выбор оптимального подхода, особенно для задач с высокой чувствительностью к численным ошибкам, таких как пересечение косых скачков. В этой связи актуальным становится проведение систематического сравнительного анализа различных солверов OpenFOAM с целью выявления их преимуществ и ограничений при решении задач соответствующего класса. Такой анализ позволит не только повысить достоверность расчетов, но и оптимизировать вычислительные ресурсы, что особенно важно при проведении масштабных или многопараметрических исследований.

## **Предыдущие работы**

Данная работа является продолжением ряда работ авторов. В работах предыдущего периода рассматривались различные классы газодинамических задач, имеющих референтные решения. Все задачи рассматривались для сверхзвуковых течений.

Исследования, посвященные сравнительному анализу точности солверов при обтекании кругового конуса под углом атаки, представлены в работах [2].

Также рассматривались задачи образования косой ударной волны при падении сверхзвукового потока под определенным углом на пластину [3], задачи об образовании волны разрежения, образующейся при обтекании пластины под определенным углом [4], задачи обтекания конуса, имеющего сферическое затупление [5].

Все результаты получены с помощью построения обобщенного вычислительного эксперимента. Ключевые особенности и составляющие обобщенного вычислительного эксперимента подробно рассмотрены в работах [6-8].

## **Постановка задачи и организация расчетов**

В данной работе для сравнения солверов используется двумерная невязкая задача образования установившегося течения, полученного при обтекании двойного клина с углами  $\alpha$  и  $\beta$  сверхзвуковым потоком газа с числом Маха при нулевом угле атаки. Изменяемыми параметрами здесь служат число Маха и углы клина  $\beta$ . Диапазоны изменения варьируемых параметров и шаг изменения выбирались следующим образом: число Маха от 1,8 до 2,0 с шагом 0,1, углы двойного клина  $\alpha/\beta = 5^\circ/10^\circ, 5^\circ/15^\circ, 10^\circ/15^\circ$ . Общая схема течения представлена на рис. 1. Для расчета взята система уравнений Эйлера, замыкаемая уравнением состояния идеального газа. Также отметим, что у задачи существует аналитическое решение [8, 9].

В исследовании были рассмотрены четыре солвера: два стандартных – rhoCentralFoam и sonicFoam, а также два созданных сторонними авторами – pisoCentralFoam и QGDFoam. Последние разработаны специалистами Института системного программирования РАН и Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Все сравниваемые солверы реализуют численные методы различной природы [10-13], то есть в работе не сравниваются различные программные реализации одного метода.

Схема расчётной области для клина с углами  $10^\circ, 20^\circ$  представлена на рис. 2. Стоит отметить, что на указанном изображении для наглядности сетка крупнее, чем в реальных расчётах.

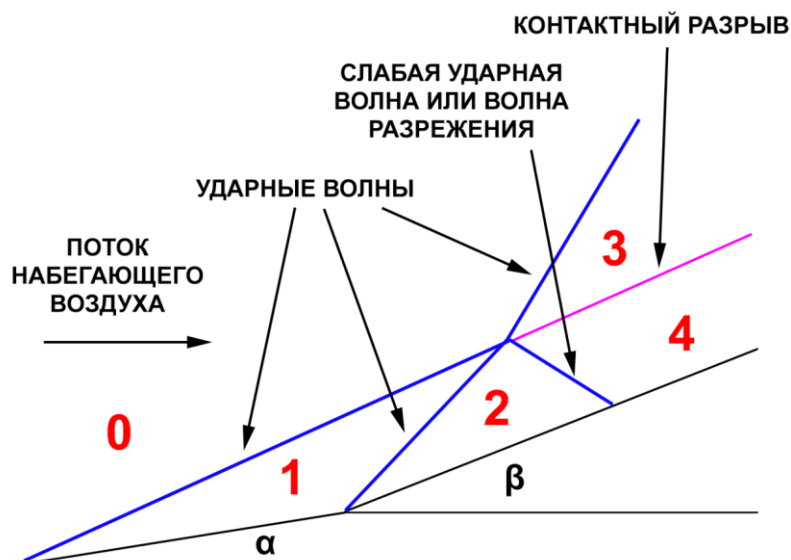


Рис. 1. Схема течения

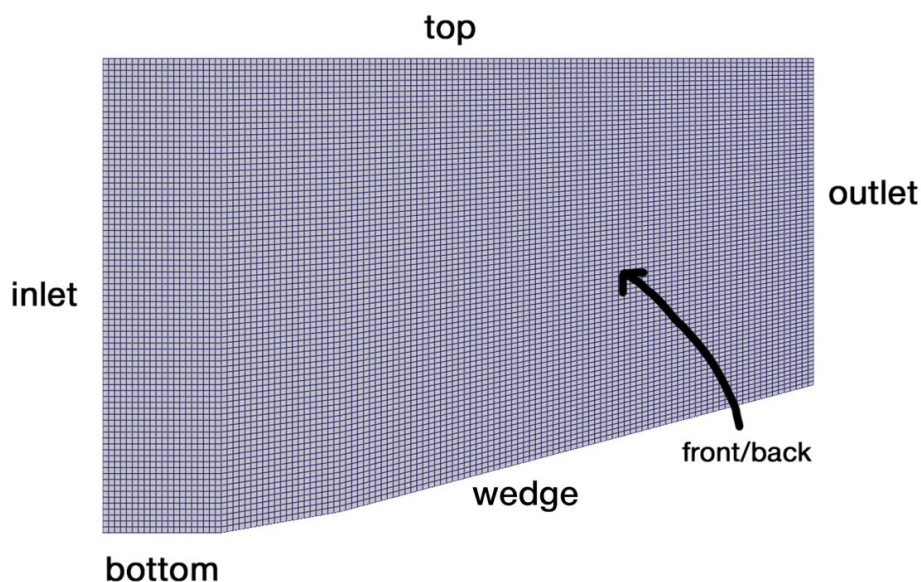


Рис. 2. Схема расчётной области

На входной границе «inlet» устанавливаются параметры невозмущённого набегающего потока: давление  $P = 101325$  Па, температура  $T = 300$  К,  $x$ -компонента скорости  $U_x$  варьируется в ранее указанном диапазоне,  $y$ -компонента скорости  $U_y$  принимается равной 0 м/с. На выходной границе («outlet»), а также на верхней («top») и нижней («bottom») границах для всех величин задаются условия нулевого градиента. Для границы клина («wedge») для давления и температуры задаётся условие нулевого градиента, а для скорости используется условие «slip», соответствующее условию непротекания в уравнениях Эйлера. На передней («front») и задней («back») границах применяется специальное граничное условие «empty», используемое в случаях, когда расчёты в данном направлении не выполняются. Число ячеек сетки – 90000. Начальные условия соответствуют граничным на грани inlet, то есть в качестве начальных условий используются параметры набегающего потока. В солвере QGDFoam параметр  $\alpha_{QGD}$ , влияющий на диссипативные свойства, устанавливался равным 0,1 (по умолчанию он равен 0,5).

## Результаты экспериментов

Картины течения представлены на рис. 3 и рис. 4 в виде распределения давления и плотности в расчетной области. Представленные распределения получены с помощью солвера rhoCentralFoam. Решение не разрушается ни для одного из солверов, что свидетельствует о высоких стабилизирующих свойствах всех солверов, участвующих в исследовании.

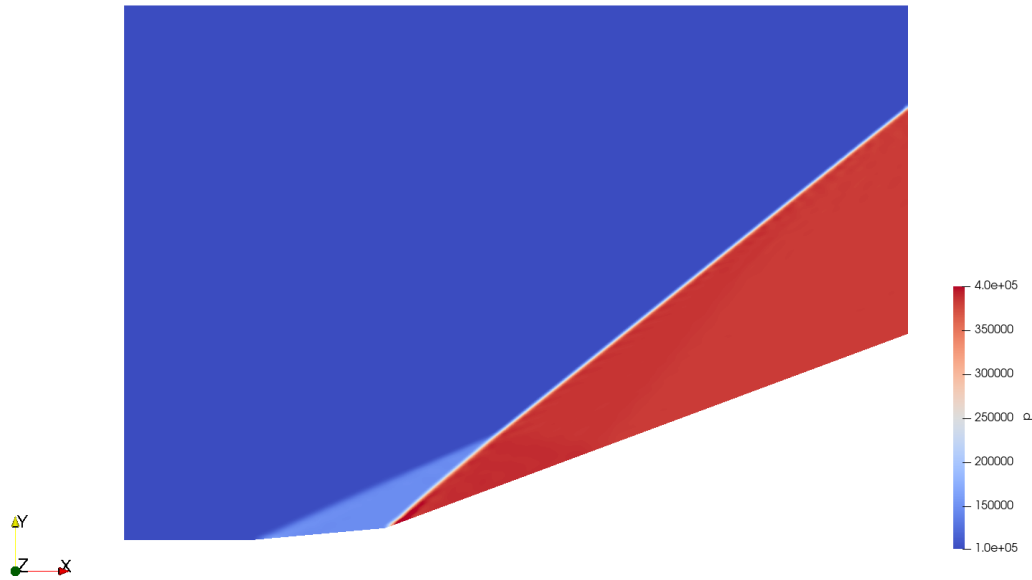


Рис. 3. Поле давления установившегося течения для солвера rhoCentralFoam,  $\alpha = 5^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$

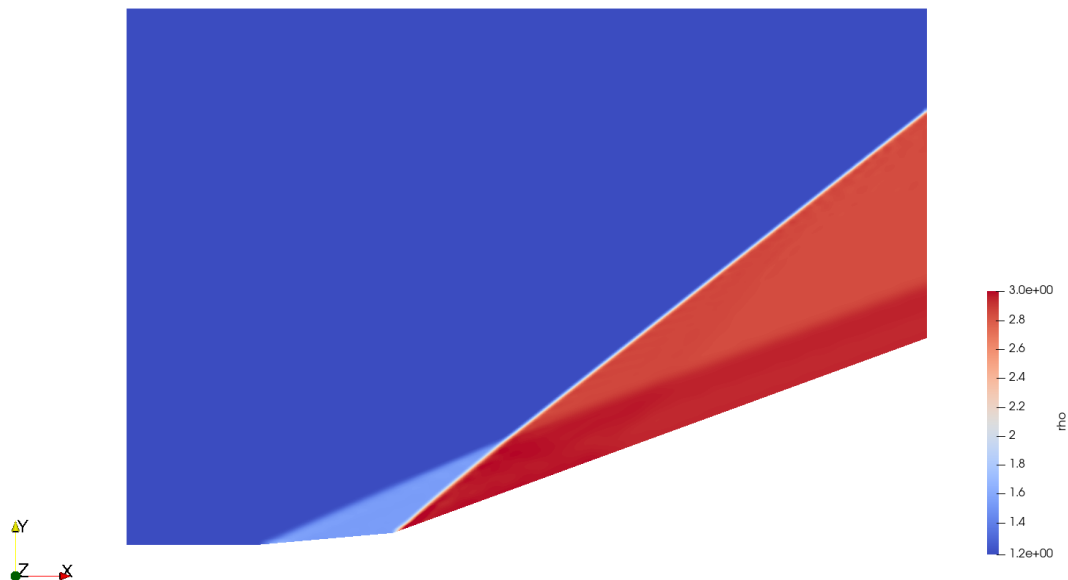


Рис. 4. Поле плотности установившегося течения для солвера rhoCentralFoam,  $\alpha = 5^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$

Построим оценки отклонения от точного решения для всей расчетной области в норме  $L_2$ . Для этого определим относительную погрешность  $Err$  для нормы  $L_2$  следующим образом

$$Err = \sqrt{\sum_m |y_m - y_m^{exact}|^2 S_m} / \sqrt{\sum_m |y_m^{exact}|^2 S_m} \quad (1)$$

где  $y_m$  – исследуемые величины (модуль вектора скорости и плотность), полученные при численном расчёте в ячейке  $m$ ,  $V_m$  – объём ячейки. Значения  $y_m^{exact}$  получены интерполяцией аналитического решения задачи. В анализе сравнительной точности участвовали солверы sonicFoam, QGDFoam, rhoCentralFoam и pisoCentralFoam. Значения отклонения от точного решения по всей расчетной области приведены в таблицах 1–3. Жирным выделены наименьшие значения в каждой строке. В таблице для солверов используются сокращенные обозначения: rCF (rhoCentralFoam), pCF (pisoCentralFoam), sF (sonicFoam), QGDF (QGDFoam). Жирным выделены наименьшие значения в каждой строке.

Табл. 1. Ошибки для  $M = 1,8$

Величина	Углы $\alpha/\beta$	<i>rCF</i>	<i>pCF</i>	<i>sF</i>	<i>QGDF</i>
Модуль скорости	5/10	<b>0.006476</b>	0.006831	0.009934	0.006510
	5/15	<b>0.009169</b>	0.009417	0.013579	0.009830
	10/15	0.007309	0.007734	0.012018	<b>0.006619</b>
Плотность	5/10	<b>0.009679</b>	0.009915	0.015727	0.010157
	5/15	0.010035	0.010582	0.014361	<b>0.009777</b>
	10/15	0.008180	0.008527	0.015914	<b>0.007864</b>

Табл. 2. Ошибки для  $M = 1,9$

Величина	Углы $\alpha/\beta$	<i>rCF</i>	<i>pCF</i>	<i>sF</i>	<i>QGDF</i>
Модуль скорости	5/10	<b>0.006283</b>	0.006579	0.009431	0.006478
	5/15	0.009247	0.009625	0.012744	<b>0.009120</b>
	10/15	0.007709	0.008042	0.009118	<b>0.006568</b>
Плотность	5/10	<b>0.009600</b>	0.009903	0.015304	0.010341
	5/15	0.011428	0.011852	0.015710	<b>0.010675</b>
	10/15	0.009540	0.009837	0.013656	<b>0.009179</b>

Табл. 3. Ошибки для  $M = 2,0$

Величина	Углы $\alpha/\beta$	<i>rCF</i>	<i>pCF</i>	<i>sF</i>	<i>QGDF</i>
Модуль скорости	5/10	<b>0.006336</b>	0.006598	0.009035	0.006557
	5/15	0.008936	0.009217	0.012018	<b>0.008562</b>
	10/15	0.007502	0.007924	0.008734	<b>0.006628</b>
Плотность	5/10	<b>0.010110</b>	0.010587	0.015884	0.011495
	5/15	0.011604	0.012043	0.015914	<b>0.010864</b>
	10/15	<b>0.010062</b>	0.010514	0.014583	0.010274

Для анализа таблиц визуализируем данные в виде поверхностей ошибок. Результат представлен на рис. 5 и рис. 6.

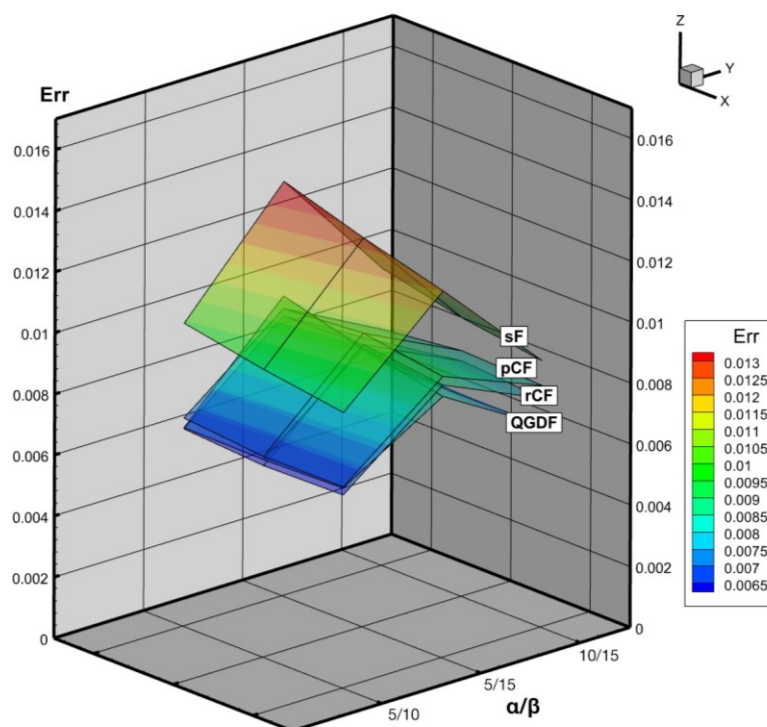


Рис. 5. Поверхности ошибок рассматриваемых солверов для модуля скорости

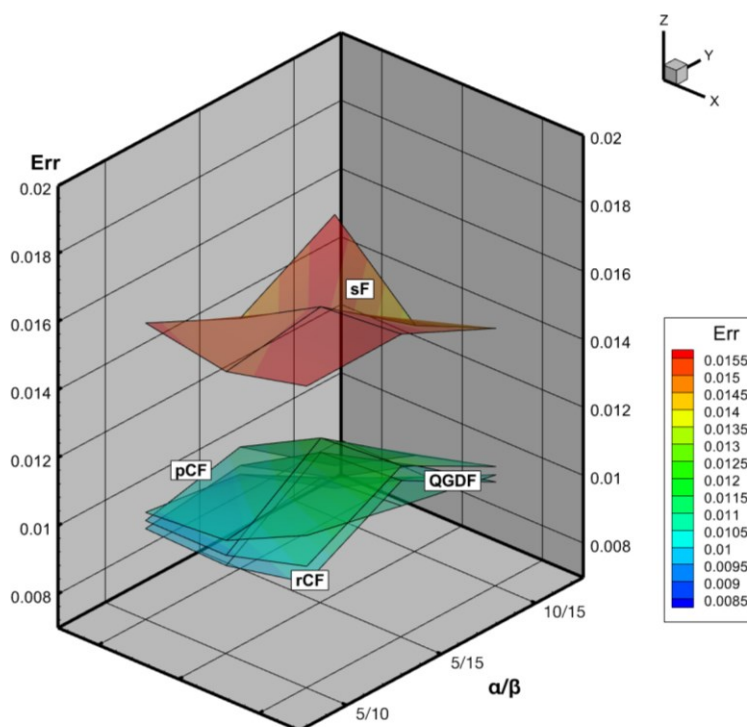


Рис. 6. Поверхности ошибок рассматриваемых солверов для плотности

Анализ представленных таблиц показал, что солверы rhoCentralFoam и QGDFoam дают схожие и чаще лучшие результаты по точности, pisoCentralFoam — чуть хуже rhoCentralFoam. Наибольшие ошибки у солвера sonicFoam, особенно для плотности. К примеру, для углов  $5^\circ$  и  $10^\circ$  ошибка для sonicFoam в 1,5 раза превышает ошибку наиболее точного в данном случае rhoCentralFoam. При увеличении скорости набегающего потока в данном диапазоне ошибка не растёт. Также стоит отметить, что ошибки для

модуля скорости для углов  $5^\circ$  и  $15^\circ$  в 1,3 раза больше ошибки для углов  $5^\circ$  и  $10^\circ$ . Ошибки углов  $10^\circ$  и  $15^\circ$  лишь немногим больше ошибок  $5^\circ$  и  $10^\circ$ . Это верно для всех солверов. Ошибки для плотности практически не зависят от углов и скорости набегающего потока. Однако стоит отметить, что для солвера QGDFoam большую роль играет диссипативный параметр. Он был подобран для интервала входных параметров, используемых в текущей задаче, но при выходе за интервал у солвера QGDFoam может ухудшиться точность. Авторы советуют солверы rhoCentralFoam и pisoCentralFoam как самые универсальные, или солвер QGDFoam, если есть время для подбора оптимального значения диссипативного параметра.

## Заключение

Проведенное исследование позволило комплексно оценить точность различных солверов OpenFOAM при решении актуальной задачи пересечения косых скачков, возникающих при обтекании двойного клина высокоскоростным потоком невязкого газа. Сравнительный анализ четырех солверов показал, что наименьшие значения численных ошибок по норме  $L_2$  демонстрирует rhoCentralFoam, что делает его предпочтительным выбором для задач, требующих высокой точности в воспроизведении сложных газодинамических структур. Отмечено, что увеличение скорости набегающего потока и углов клина не приводят к росту ошибок для всех решателей для плотности. Для давления изменение углов клина уже влияет на ошибку. Представленные результаты позволяют рекомендовать использование rhoCentralFoam и pisoCentralFoam для инженерных расчетов, где критична достоверность воспроизводимых скачков. Полученные данные могут быть полезны как для специалистов, занимающихся фундаментальными исследованиями в области вычислительной газовой динамики, так и для инженеров, внедряющих численные методы в практику проектирования аэродинамических устройств.

## Благодарности

Вычисления проведены с помощью гибридного суперкомпьютера K100, установленного в Суперкомпьютерном Центре коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

## Список литературы

1. OpenFOAM Foundation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://openfoam.org> (дата обращения 10.03.2025).
2. 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) 10862, 2018. P. 221–230.
3. Alekseev A.K., Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E. Comparative analysis of the accuracy of OpenFOAM solvers for the oblique shock wave problem // Matematica Montisnigri. 2019. V. XLV, P. 95–105.
4. Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E. Analysis and Visualization of the Computational Experiments Results on the Comparative Assessment of OpenFOAM Solvers Accuracy for a Rarefaction Wave Problem // Scientific Visualization. 2021. V. 13. № 3. P. 34–46.
5. Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E. Integrating Scientific Visualization in the Assessment of Openfoam Solvers for the Flow Around a Spherically Blunted Cone // Scientific Visualization. 2024. V. 16. № 4. P. 25–36.
6. Bondarev A.E. On the Construction of the Generalized Numerical Experiment in Fluid Dynamics // Matematica Montisnigri. 2018. T. XLII. P. 52–64.
7. Bondarev A.E., Galaktionov V.A. Generalized Computational Experiment and Visual Analysis of Multidimensional Data // Scientific Visualization. 2019. V. 11. № 4. P. 102–114.



8. Alekseev A.K., Bondarev A.E., Galaktionov V.A., Kuvshinnikov A.E. On the construction of a generalized computational experiment in verification problems // *Matematica Montisnigri*. 2020. T. XLVIII. С. 19–31.
9. Арутюнян Г.М. Отраженные ударные волны / Г.М. Арутюнян, Л.В. Карчевский. М.: Машгиз, 1973. 376 с.
10. Anderson J.D. *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective*. McGraw-Hill Education, 2021. 778 p.
11. Issa R. Solution of the implicit discretized fluid flow equations by operator splitting // *J. Comput. Phys.* 1986. Vol. 62. № 1. P. 40–65.
12. Kurganov A., Noelle S., Petrova G. Semidiscrete central-upwind schemes for hyperbolic conservation laws and Hamilton–Jacobi equations // *SIAM J Sci Comput.* 2001. Vol. 23 P. 707–740.
13. 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.
14. Истомина М.А. О реализации одномерного квазигазодинамического алгоритма в открытом программном комплексе OpenFOAM // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2018. № 001.



# Comparative Analysis of the Accuracy of OpenFOAM Solvers in Simulating High-Velocity Flow Around a Double Wedge

A.E. Bondarev<sup>1,A</sup>, A.E. Kuvshinnikov<sup>2,A</sup>, S.V. Andreev<sup>3,A</sup>, I.G. Ryzhova<sup>4,A</sup>

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-3681-5212, [bond@keldysh.ru](mailto:bond@keldysh.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1667-6307, [kuvsh90@yandex.ru](mailto:kuvsh90@yandex.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-8029-1124, [esa@keldysh.ru](mailto:esa@keldysh.ru)

<sup>4</sup> ORCID: 0000-0003-1613-3038, [ryzhova@gin.keldysh.ru](mailto:ryzhova@gin.keldysh.ru)

## Abstract

This article is devoted to a comparative analysis of the accuracy of various solvers of the OpenFOAM software package in numerical modeling of supersonic inviscid gas flow past a double wedge. A two-dimensional steady-state problem of flow formation with the intersection of oblique shock waves is considered. A comparison of standard solvers is made rhoCentralFoam and sonicFoam, as well as third-party developments pisoCentralFoam and QGD-Foam. The results obtained in tabular form are visualized as error surfaces. The analysis showed the best accuracy of solvers rhoCentralFoam and QGDFoam for both the density field and the velocity modulus field. The results obtained can be used both in fundamental research and in engineering calculations that require high reliability of complex flow modeling.

**Keywords:** OpenFOAM, generalized computational experiment, double wedge, oblique jump.

## References

1. OpenFOAM Foundation [Electronic resource]. Access mode: <https://openfoam.org> (date of access 03/10/2025).
2. Bondarev AE, Kuvshinnikov AE Analysis of the accuracy of OpenFOAM solvers for the problem of supersonic flow around a cone // ICCS 2018, Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 10862, 2018. P. 221–230.
3. Alekseev AK, Bondarev AE, Kuvshinnikov AE Comparative analysis of the accuracy of OpenFOAM solvers for the oblique shock wave problem // Matematica Montisnigri. 2019. V. XLV, pp. 95–105.
4. Bondarev AE, Kuvshinnikov AE Analysis and Visualization of the Computational Experiments Results on the Comparative Assessment of OpenFOAM Solvers Accuracy for a Rarefaction Wave Problem // Scientific Visualization. 2021. V. 13. No. 3. P. 34–46.
5. Bondarev AE, Kuvshinnikov AE Integrating Scientific Visualization in the Assessment of Openfoam Solvers for the Flow Around a Spherically Blunted Cone // Scientific Visualization. 2024. V. 16. No. 4. P. 25–36.
6. Bondarev AE On the Construction of the Generalized Numerical Experiment in Fluid Dynamics // Matematica Montisnigri. 2018. T. XLII. P. 52–64.
7. Bondarev AE, Galaktionov VA Generalized Computational Experiment and Visual Analysis of Multidimensional Data // Scientific Visualization. 2019. V. 11. No. 4. P. 102–114.
8. Alekseev AK, Bondarev AE, Galaktionov VA, Kuvshinnikov AE On the construction of a generalized computational experiment in verification problems // Matematica Montisnigri. 2020. T. XLVIII. pp. 19–31.
9. Arutyunyan G.M. Reflected shock waves / G.M. Arutyunyan, L.V. Karchevsky. Moscow: Mashgiz, 1973. 376 p.

10. Anderson JD Modern Compressible Flow: With Historical Perspective. McGraw-Hill Education, 2021. 778 p.
11. Issa R. Solution of the implicit discretized fluid flow equations by operator splitting // J. Comput. Phys. 1986. Vol. 62. No. 1. P. 40–65.
12. Kurganov A., Noelle S., Petrova G. Semidiscrete central-upwind schemes for hyperbolic conservation laws and Hamilton–Jacobi equations // SIAM J Sci Comput. 2001. Vol. 23 P. 707–740.
13. 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.
14. Istomina M.A. On the implementation of a one-dimensional quasi-gasdynamics algorithm in the open software package OpenFOAM // Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics. 2018. No. 001.