

# СОПОСТАВЛЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ВИХРЯ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

М.А. Кирюшина<sup>1</sup>, Т.Г. Елизарова<sup>1</sup>, А.С. Епихин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, *m\_ist@mail.ru*

<sup>2</sup>ИСП им. В.П. Иванникова РАН, Москва

С помощью квазигазодинамического (КГД) метода решения задач газовой динамики [1], включенного в открытую платформу OpenFOAM в качестве вычислительного ядра QGDFoam [2], решена тестовая задача о нестационарном взаимодействии вихревого течения с ударной волной [3]. Решение задачи, полученное с помощью решателя QGDFoam, сравнивалось с тремя другими вычислительными ядрами, включенными в эту же платформу - вариантами решателя rhoCentralFoam с ограничителями второго порядка точности VanLeer и ограничителями первого порядка точности Minmod и upwind.

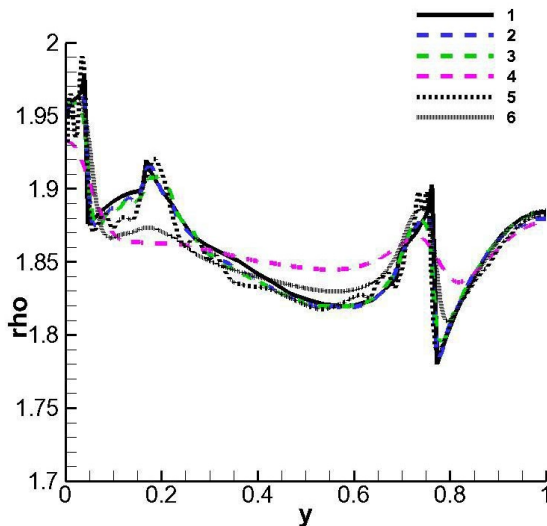


Рис. 1. Плотность  $\rho$ , сетка  $h = 1/400$ ; 1 – эталонное решение из [3], 2 – VanLeer с числом Куранта  $Co = 0.1$ , 3 – Minmod, 4 – upwind, 5 – КГД,  $\alpha = 0.1$ ,  $Sc = 0.0$ , 6 – КГД,  $\alpha = 0.5$ ,  $Sc = 0.0$

На рисунке 1 приведено сравнение решателей QGDFoam и вариантов rhoCentralFoam с эталонным, полученным на основе метода типа Годунова высокого порядка точности и вычисленного в [3].

При малых значениях диссипативных коэффициентов результаты КГД расчетов близки в результатам, полученным по схеме второго порядка точности, а при больших значениях - к результатам расчетов по схеме первого порядка точности с направленными разностями.

Алгоритм QGDFoam является наиболее затратным с точки зрения вычислительной эффективности, что объясняется вычислительной сложностью расчета  $\tau$ -слагаемых, включающих в себя смешанные пространственные производные. В варианте QGDFoam reduced эти смешанные производные отключены, и алгоритм оказывается менее затратным в вычислительном плане. При этом в данной задаче результаты расчета по обоим вариантам алгоритма оказываются достаточно близкими. Варианты rhoCentralFoam с указанными ограничителями более эффективны с точки зрения времени расчета, однако точность решения и качественный вид полученных распределений плотности оказываются невысокими.

Таким образом, в результате выполнения работы было показано, что разностная схема первого порядка аппроксимации, построенная на основе КГД уравнений, при соответствующем подборе численных коэффициентов в искусственных диссипативных слагаемых с достаточной точностью решает поставленную задачу. Полученные результаты показывают, что для увеличения точности расчетов переход к алгоритмам высокого порядка аппроксимации может быть успешно дополнен применением алгоритмов первого порядка точности с сильно нелинейными и тонко настроенными диссипативными слагаемыми.

## Литература

1. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. Москва, Научный мир, 2007.
2. M.V. Kraposhin, D.A. Ryazanov, E.V. Smirnova, T.G. Elizarova, M.A. Kiryushina (Istomina) // Development of OpenFOAM solver for compressible viscous flows simulation using quasi-gas dynamic equations. DOI: 10.1109/ISPRAS.2017.00026.
3. A.V. Rodionov. Simplified artificial viscosity approach for curing the shock instability // Computers and Fluids. 219 (2021). 104873.