

QGDFoam – Реализация КГД-алгоритмов в открытой библиотеке OpenFOAM

М.В. Крапошин, Е.В. Смирнова, Д.А. Рязанов, Т.Г. Елизарова,
М.А. Истомина

ИСП РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им.
Н.Э. Баумана

3 Декабря, 2017

Содержание

- 1 Введение
- 2 Математическая модель
- 3 Реализация в пакете OpenFOAM
- 4 Тестирование
- 5 Дальнейшее развитие
- 6 Учебные курсы
- 7 Заключение

Цель работы

- 1 упростить реализацию параллельной версии кода;
- 2 расширить область применимости КГД-уравнений за счет сопряжения с модулями OpenFOAM;
- 3 повысить качество исходного кода за счет расширения круга пользователей;
- 4 упростить разработку новых моделей (КГиД, мелкой воды и др.);
- 5 использовать в учебном процессе.

КГД-уравнения

Включают в себя уравнения сохранения массы, баланса импульса и энергии и уравнение состояния совершенного газа:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j}_m = 0, \quad \vec{j}_m = \rho \vec{U} - \tau \left(\nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) + \nabla p \right)$$

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

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{j}_m h^{tot}) + \nabla \cdot \vec{q} = \nabla \cdot (\hat{\Pi} \cdot \vec{U}),$$

отличающиеся от Н-С диссипативными добавками:

$$\hat{\Pi} = \hat{\Pi}_{NS} + \hat{\Pi}_{QGD},,$$

$$\hat{\Pi}_{QGD} = \tau \vec{U} \otimes \rho (\vec{U} \cdot \nabla \vec{U} + \frac{1}{\rho} \nabla p) + \tau \hat{I} (\vec{U} \cdot \nabla p + \gamma p \nabla \cdot \vec{U}),$$

$$\hat{\Pi}_{NS} = \mu (\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T - \hat{I} \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{U}),$$

$$\vec{q} = \vec{q}_{NS} - \tau \vec{U} \rho (\vec{U} \cdot \nabla u + p \vec{U} \cdot \nabla (\frac{1}{\rho})),$$

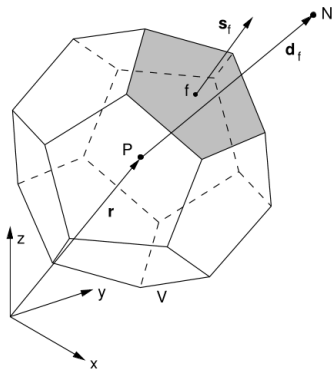
$$\vec{q}_{NS} = -\kappa \nabla T$$

OpenFOAM - средство быстрой разработки и первой оценки

- 1 Более 30 моделей сплошных сред.
- 2 Работа с подвижными сетками.
- 3 Кинетика химических реакций, термодинамические библиотеки.
- 4 Средства работы с сеткой.
- 5 Средства параллельного программирования (на основе стандарта MPI).
- 6 Модели турбулентности.
- 7 Средства конечно-объёмной аппроксимации уравнений переноса.
- 8 **Развитое сообщество пользователей и разработчиков.**

Недостатки — хранение данных на диске, метод дискретизации пространства, порядок аппроксимации и пр. Но их можно компенсировать перенеся метод на другую платформу.

MKO в OpenFOAM



$$\frac{\partial \rho \beta}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \rho \beta) - \nabla \cdot (D_{\beta} \nabla \beta) = S_{\beta}, \quad (1)$$

$$\frac{\rho^n \beta^n - \rho^o \beta^o}{\Delta t} = -\frac{1}{V} \sum_f \phi_f \beta_f + \frac{1}{V} \sum_f D_{\beta, f} \frac{\delta \beta}{\delta \vec{n}_f} |\vec{S}_f| + S_{\beta}, \quad (2)$$

$$\phi_f = (\vec{U} \rho)_f \cdot \vec{S}_f. \quad (3)$$

Аппроксимация τ – слагаемых

Были реализованы два способа:

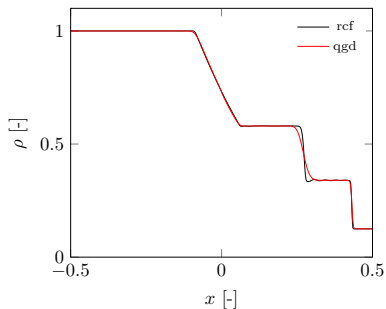
- Производная по нормали
- Метод Наименьших Квадратов (из библиотеки OpenFOAM)

Разработан модуль выбора явной аппроксимации - пространство имен fvsc::

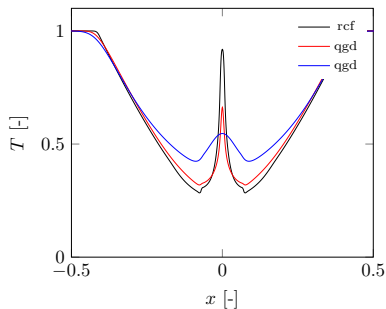
1Д Тесты

- 1 Задача Сода.
- 2 Разбегающиеся волны (Задача 123).
- 3 Задача Ноха - столкновение двух волн.
- 4 Стационарный и движущийся контактный разрывы.
- 5 Сильная ударная волна (Peak problem).

1D Тесты - Результаты 1

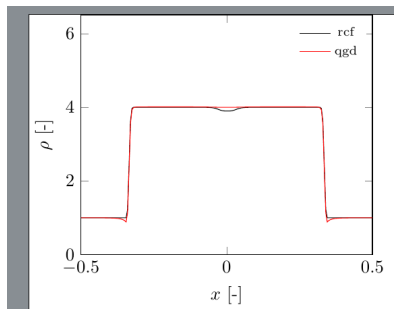


Тест 1 - Задача Сода

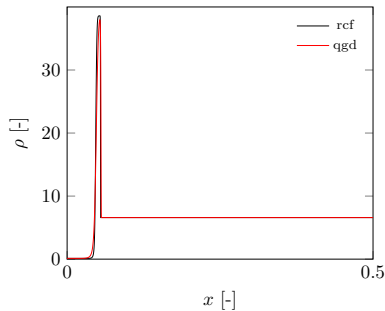


Тест 2 - Разбегающиеся волны

1Д Тесты - Результаты 2



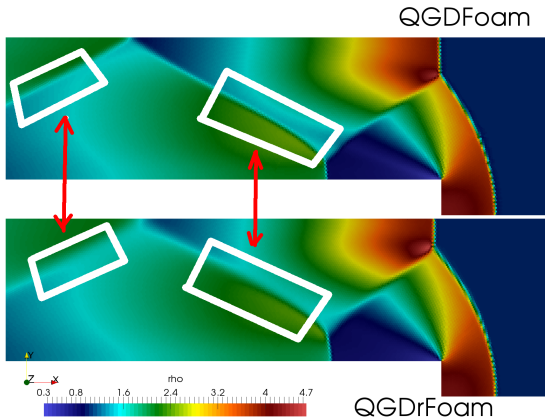
Тест 3 - Задача Ноха



Тест 7 - Сильная ударная волна

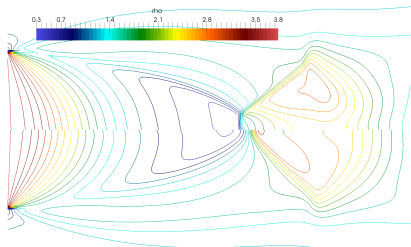
2Д Тесты

- Сравнение со стандартными решателями OpenFOAM
- Качественное исследование влияния выбора сетки
- Качественное исследование влияние дискретизации τ -слагаемых

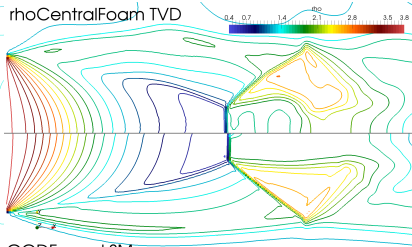


2Д Тесты - истечение сверхзвуковой струи

QGDFoam $\alpha = 0.5$, $Sc = 1$, LSM



rhoCentralFoam Minmod

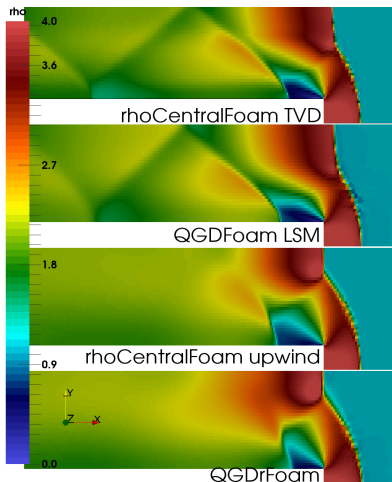


QGDFoam LSM

QGDrFoam $\alpha = 0.5$, $Sc = 1$, LSM

QGDFoam $\alpha = 0.3$, $Sc = 0.15$, LSM

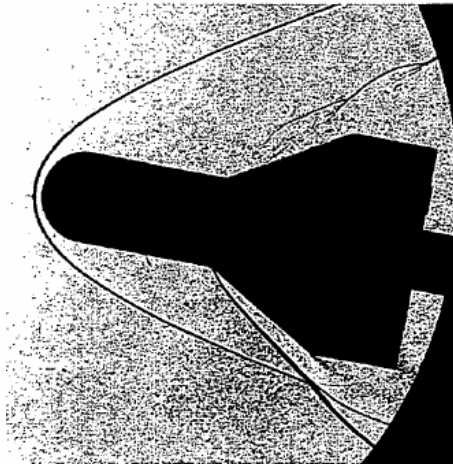
2Д Тесты - прямой уступ



3D Тесты - первые результаты

Experimental and Computational Study of a Blunt Cylinder-Flare Model
in a High Supersonic Flow

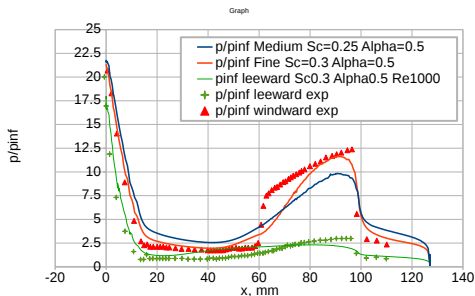
by E.M. Houtman, W.J. Bannik, B.H. Timmerman



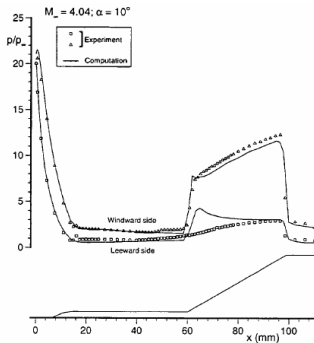
Адаптивные сетки до 4 млн. ячеек, 120 выч. ядер BL 2x220.

Соответствует вычислительным ядрам K-100

3D Тесты - сравнение расчета и эксперимента



Page 1



Дальнейшее развитие

- Разработка модели КГидД для произвольного уравнения состояния, трансзвуковой режим течения.
- Разработка модели для несжимаемых течений.
- Внедрение энтропийно-согласованных схем аппроксимации потоков.
- Разработка модели мелкой воды.

Исходный код

Исходный код размещён в репозитории библиотеки исходных кодов GitHub:

<https://github.com/unicfdlab/QGDSolver/>

Доступны 2 ветки:

- 1 dev-4.1 - ветка с последними изменениями от разработчиков, OpenFOAM версии 4.1
- 2 master-4.1 - ветка с верифицированными изменениями, OpenFOAM 4.1

Учебные курсы

30/11/2017 Проведён мастер-класс по использованию QGDFoam для решения задач течения сжимаемых вязких газов.

Участники: МГУ им. Ломоносова, Филиал ФГУП ЦЭНКИ НИИСК, СамГТУ, "РКК Энергия" им. С.П. Королёва, ВНИИА им. Н.Л. Духова
Рассмотренные задачи:

- 1 Истечение сверхзвуковой струи газа, $n = 2 - 10^4$;
- 2 Течение в канале при $M = 0.1$, $Re = 100$.

Заключение

- 1 Разработан солвер QGDFoam и библиотека libQGD для решения задач моделирования сжимаемых вязких течений описываемых уравнениями квазигазодинамики.
- 2 Солвер был протестирован на ряде 1D, 2D и 3D задач.
- 3 Программа была реализована под открытой лицензии GPL, исходный код размещён в репозитории GitHub и доступен для ознакомления: <https://github.com/unicfdlab>