

# Код CABARET-STAGES

Глотов В. Ю.

*ИБРАЭ РАН*

Доклад посвящен проблемам предсказательного численного моделирования задач анализа водородной безопасности (ВБ) на АЭС с помощью беспараметрической методики КАБАРЕ.

Из-за недоступности проведения полномасштабных экспериментов, численное моделирование, по сути, является единственным инструментом для исследования процессов, протекающих под ЗО АЭС при ТА. В связи с этим, актуальной становится разработка математических моделей процессов и явлений, существенных для рассматриваемой задачи, не использующих эмпирических данных и не содержащих настроечных параметров. К таким моделям относятся методы прямого численного моделирования (DNS), основанные на решении нестационарных уравнений Навье-Стокса на сетках, разрешающих все физические масштабы. Однако, применение DNS для задач ВБ потребует колоссальных вычислительных ресурсов и для инженерных приложений такой подход малопригоден. Приближенные подходы, реализованные в современных CFD-кодах, основываются на различных методиках осреднения исходных уравнений по времени и пространству и используют набор замыкающих соотношений, полученных на основе эмпирических корреляций. Верификация и настройка параметров таких моделей проводилась на относительно простых тестах, и попытка их экстраполяции за область применения может приводить к существенной потере точности. Приобретает интерес разработка новых подходов предсказательного математического моделирования, способных достаточно точно воспроизводить весь комплекс существенных явлений, с одной стороны, и обладающих достаточной вычислительной эффективностью, чтобы численный расчет занимал приемлемое время.

В ИБРАЭ РАН для предсказательного моделирования турбулентных течений в многокомпонентных средах разрабатывается беспараметрический подход, основанный на методике КАБАРЕ. КАБАРЕ относится к классу вихреразрешающих схем с неявным моделированием подсеточных масштабов турбулентности (MILES/ILES). Она позволяет проводить расчеты на сетках с неполным разрешением масштабов турбулентности без использования настроечных параметров. Единственным источником неопределенностей является сеточная модель, критерий выбора которой, основан на анализе сходимости решения.

В докладе приводятся результаты расчетов с помощью методики КАБАРЕ экспериментов по исследованию процессов образования и разрушения стратификации легкого газа (ERCOSAM-SAMARA PE4, NYMERES-2 H2P1\_0) и др. Отдельное внимание уделено вопросам ускорения расчетов как за счет использования модели искусственной

сжимаемости газа (для гиппозвуковых течений), так и за счет использования подходов асинхронного интегрирования уравнений по времени.

# **Комплекс программ DTG для эффективного решения трехмерных задач газовой динамики с ударными волнами на графических ускорителях**

Борис Корнеев, Вадим Левченко

*ИПМ им. М.В.Келдыша РАН*

**Целью** разработки данного исследовательского программного комплекса является создание алгоритмов для эффективного моделирования нестационарных трехмерных процессов газовой динамики в рамках системы уравнений Эйлера и Навье-Стокса на гетерогенных вычислительных системах. Решаются **задачи** применения локально-рекурсивных нелокальных алгоритмов (LRnLA) к численной схеме Рунге-Кутты разрывного метода Галеркина (RKDG).

Реализована **интеграция** с кодом на основе метода Lattice Boltzmann для моделирования многофазных течений газ - несжимаемая жидкость со свободной поверхностью.

Код **предназначен** для моделирования сжимаемых течений: дозвуковых (неоптимально применять для низких чисел Маха из-за условия Куранта), сверхзвуковых, гиперзвуковых, в **моделях** Эйлера, Навье-Стокса. Код использует структурированные декартовы **сетки**.

Для **визуализации** и анализа результатов численного моделирования используется код im3D, разрабатываемый в ИПМ им. Келдыша РАН.

В коде используется **численный метод** RKDG, представляющий собой гибрид конечно-объемных и конечно-элементных схем. Используются консервативные переменные. Порядок аппроксимации по пространству --- второй. Интегрирование по времени: явная схема Рунге-Кутты второго порядка.

**Целевая архитектура** кода – ЭВМ с видеокартами NVidia, **операционная система** Linux.

Код использует **гетерогенные вычисления**. Достижимый процент от пика GPU – выше 30%.

Код **валидировался** на серии 1Д, 2Д и 3Д модельных задач.

**Язык разработки** – CUDA C++.

Разработка кода ведется при поддержке гранта РФФИ номер 18-71-10004, а также ООО «Кинтех Лаб».

## **Развитие FlowVision за 2017-2018 гг.**

Аксенов А.А.

*ООО «ТЕСИС»*

В докладе приводятся новые возможности FlowVision, которые появились в последние годы, а также рассматриваются планы команды разработчиков на будущее. Также приводятся результаты различных проектов, в которых применялся программный комплекс FlowVision.

# **Код GeRa: гидрогеологическое моделирование в задачах радиационной и химической безопасности**

В.К.Крамаренко, И.Н.Коньшин, И.В.Капырин, Ф.В.Григорьев

*ИБРАЭ РАН, ИВМ РАН*

Расчетный код GeRa является совместной разработкой ИВМ РАН и ИБРАЭ РАН и предназначен для решения геофильтрационных и геомиграционных задач. Областью его применения являются задачи оценки безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов и объектов ядерного наследия, химически опасных объектов, а также различные геоэкологические проблемы. В GeRa возможно моделирование процессов фильтрации, массо- и теплопереноса, плотностной конвекции, радиоактивного распада и химических взаимодействий в системе вода-порода разного уровня сложности.

Код базируется на программной платформе INMOST, имеет графический интерфейс пользователя, основанный на библиотеках Qt и VTK. В GeRa реализованы сеточные генераторы для построения треугольно-призматических и гексаэдральных сеток. Дискретизации основаны на методах конечных объемов, в том числе применяются нелинейные монотонные схемы. При расчетах могут быть использованы как персональные компьютеры, так и суперЭВМ.

# **Пакет расчётных программ HSFlow: развитие кода, новые модели физхим процессов и ключевые задачи**

Александров С. В.

*ЦАГИ, МФТИ*

Представлена информация о пакете программ HSFlow (High Speed Flow solver), разрабатываемом в МФТИ и ЦАГИ под руководством И.В. Егорова. Пакет предназначен для моделирования пространственных внешних и внутренних вязких течений при транс-, сверх- и гиперзвуковых скоростях в том числе с учётом турбулентности и неравновесных физико-химических процессов. Моделирование основывается на численном решении уравнений Навье–Стокса или Рейнольдса с помощью полностью неявного численного метода конечного объёма третьего порядка аппроксимации по пространству и второго по времени с применением квази-монотонной схемы. HSFlow разработан для работы на высокопроизводительных многопроцессорных супер-ЭВМ кластерного типа.

Ключевые результаты 2018 года:

- 1) Переход на стандарт C++-11/++14.
- 2) Моделирование неравновесных физико-химических процессов с учётом неравновесных колебательных температур и ионизации. Расчёты для трубы ВАТ-104 ЦАГИ, обтекание сферы на отдельных режимах близких к натурным.
- 3) Анализ устойчивости пограничного слоя на реальной конфигурации: аппарат HEXAFLY в полётном режиме и в трубе Т-117.
- 4) Задача восприимчивости к частицам. Реализация модуля частиц, Исследование сходимости по параметрам модели и сеткам. Проблема взаимодействия акустической волны с головным скачком.
- 5) Краткий обзор решённых задач.

# **Конечно-объемные методы решения совместных задач в рамках платформы INMOST: вызовы и решения**

Терехов К.М. Василевский Ю.В.

*ИВМ РАН*

Доклад посвящен новым разработкам в области многофизического моделирования в рамках программной платформы INMOST. На примере задач о трехмерном моделировании образования тромба в сосуде и геомеханического моделирования гетерогенного нефтяного резервуара рассматриваются сложности и решения как в отдельных, так и совместных задачах.

## **Код Jet3D: итоги в 2018 года**

Аюпов Р.Ш., Бендерский Л.А., Любимов Д.А., Жигалкин А.С.,  
Польняков Н.А., Терехова А.А.

*Центральный институт авиационного моторостроения  
им. П.И.Баранова*

В 2018 году основное внимание уделялось решению различных прикладных задач. Кроме того, недавно был опробован модифицированный вариант схемы MP, который позволил улучшить монотонность схемы MP9 при расчете течений с большими градиентами. Расчеты выполнялись по разным версиям кода, как с разными вариантами схемы MP9, так и разными способами переключения от RANS и ILES, аналогичными DES97 и IDDES. Для ряда задач было проведено сравнение расчетов различными вариантами кода.

Основным направлением было исследование эффективности применения синтетических струй в элементах тракта авиационных двигателей. Было исследовано воздействие синтетических струй на течение в сверхзвуковой струе из биконического сопла. Исследовано воздействия синтетических струй на течение и уровень турбулентных пульсаций в решетке турбинных профилей. Проведен анализ эффективности применения популярных сейчас плазменных актуаторов для уменьшения отрывы в модельном диффузоре.

Исследовано влияние неоднородного набегающего потока на характер течение и уровень турбулентных пульсаций в воздухозаборниках разных типов. Выполнен анализ влияния синтетических струй и режимных параметров на спектральные характеристики струйных течений, а также течений в воздухозаборных устройствах разных типов.



# **Развитие комплекса программ SINF/Flag-S: выход на задачи вязко-невязкого взаимодействия в сверхзвуковых течениях**

Смирнов Е.М., Колесник Е.В., Смирновский А.А.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
(СПбПУ)*

Излагается краткая характеристика конечно-объемного кода SINF/Flag-S, оперирующего неструктурированными сетками с ячейками произвольной геометрии. Описываются реализованные в 2017-2018 гг. численные методы для расчета транс- и сверхзвуковых течений вязкого газа со скачками уплотнения. Для расчета конвективных потоков на грани расчетной ячейки в коде реализованы различные схемы: Роу, HLL, HLLC, AUSM, схема Годунова, а также гибридные схемы, которые обеспечивают эффективное подавление так называемой «карбункул» неустойчивости. Номинально второй порядок точности схем достигается посредством применения различных подходов к реконструкции переменных с использованием ограничителей.

Дается обзор результатов тестирования схем на ряде двумерных задач о течениях невязкого газа, особое внимание уделено вопросу о влиянии типа сеточных элементов на эффективность работы ограничителей.

Детально представляются результаты решения типичной трехмерной задачи вязко-невязкого взаимодействия на примере обтекания удлиненного цилиндрического тела, установленного на пластине, вдоль которой развивается сверхзвуковой пограничный слой.

# **Развитие программного кода SINF/Flag-S: реализация и начальный опыт приложения модели двухфазной фильтрации**

Зайцев Д.К., Пожилов А.А., Смирнов Е.М.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
(СПбПУ)*

Представляется реализация в конечно-объемном “неструктурированном” коде SINF/Flag S двухкомпонентной модели “нелетучей нефти” (Black-Oil model), которая описывает фильтрационное течение двух не смешивающихся жидкостей через пористую среду с переменными свойствами (пористостью и проницаемостью) и традиционно применяется для моделирования процесса вытеснения нефти из пласта водой при разработке нефтяных месторождений. Используется формулировка модели, предусматривающая решение уравнения Пуассона для давления совместно с уравнением для объемной доли нефти. Для эффективного решения уравнения Пуассона применяется ранее реализованный в коде SINF/Flag-S оригинальный многосеточный метод. Даются примеры верификационных расчетов. Описывается постановка задачи и приводятся результаты расчетов для находящегося в открытом доступе трехмерного бенчмарк-теста SPE10 (часть 2), который характеризуется сильной пространственной неоднородностью пористости и проницаемости пласта. Результаты сопоставляются с литературными данными, полученными по другим кодам.

**Комплекс программ/код VP2/3.**  
**Численное моделирование движения твердых и жидких  
частиц в газовой среде**

Исаев С.А.<sup>1</sup>, Усачов А.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Санкт-Петербургский государственный университет гражданской  
авиации*

<sup>2</sup> *Московский комплекс ЦАГИ*

В работе представлены некоторые результаты разработки и верификации математических моделей и алгоритмов численного моделирования распространения жидких и твердых частиц внутри замкнутых пространств. Моделирование движения частиц в турбулентной среде можно охарактеризовать как сложный процесс, в котором присутствуют элементы расчета турбулентных течений конечноразностными методами в рамках уравнений Рейнольдса и вычисления траекторий движения твердых и жидких частиц в рамках подхода Лагранжа. При моделировании траекторий движения частиц могут быть использованы стохастические подходы. Чтобы предсказать распространение аэрозолей и других внешних твердых примесей в турбулентном течении, требуется знание статистики движения мелких частиц в зависимости от турбулентных пульсаций скорости.

Для верификации математических моделей и алгоритмов численного моделирования распространения жидких и твердых частиц внутри замкнутого пространства была выбрана задача о движении твердых частиц в прямоугольном канале. Классическая экспериментальная работа В. Х. Снайдера и Ж.Л. Ламли [1] по определению автокорреляций турбулентных пульсаций скорости с помощью движения твердых частиц при турбулентном течении в канале дает необходимые экспериментальные данные для проверки выбранной математической модели и алгоритма. Сопоставление результатов численного моделирования дисперсии частиц меди с экспериментальными данными Снайдера и Ламли показали их хорошее совпадение.

1. Snyder, W. and J. Lumley. Some measurements of particle velocity autocorrelation functions in a turbulent flow// Journal of Fluid Mechanics, -1971.- Vol. 48.- P. 41-71.

# Комплекс программ/код VP2/3.

## Опыт расчет отрывных течений на гибридных сетках

Исаев С.А.<sup>1</sup>, Усачов А.Е.<sup>2</sup> Судаков А.Г.<sup>1</sup>, Мазо А.Б.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

<sup>2</sup> Московский комплекс ЦАГИ

<sup>3</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет

Многоблочные вычислительные технологии, основанные на пересекающихся разномасштабных сетках простой топологии (в большинстве своем структурированных) и реализованные в пакете VP2/3, в 2017 году модифицированы в новой версии пакета с применением гибридных сеток [1]. Гибридные сетки представляют моноблочные в целом неструктурированные сетки, в которых зоны пересечения многоблочных структурированных сеток заменены неструктурированными вставками. В 2017 году на 4 слете в ИПМ им.М.В.Келдыша РАН новая версия VP2/3 докладывалась в приложении к решению задач интенсификации теплообмена в канале с однорядными наклоненными канавками и управления обтеканием полукругового цилиндра с помощью вихревых ячеек. Некоторые результаты проведенных методических исследований опубликованы в [2-6]. В докладе сравниваются результаты расчетов отрывных течений на различных сетках и оценивается точность прогнозов. Также дается анонс методического исследования по верификации модифицированной с учетом кривизны линий тока версии SST-модели для замыкания (U)RANS в приложении к расчету отрывных течений [7].

1. Kalinin E. I., Mazo A. B. and Isaev S. A. Composite mesh generator for CFD problems // 11th International Conference on "Mesh methods for boundary-value problems and applications" IOP Publishing IOP. Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. 158. 6p.
2. Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A., Guvernyuk S., Sinyavin A., Chulyunin A., Mazo A., Demidov D. Ensuring safe descend of reusable rocket stages – numerical simulation and experiments on subsonic turbulent air flow around a semi-circular cylinder at zero angle of attack and moderate Reynolds number // Acta Astronautica. 2018. Vol.150. P.117-136.
3. Исаев С.А., Баранов П.А., Леонтьев А.И., Попов И.А. Интенсификация ламинарного течения в узком микроканале с однорядными наклоненными овально-траншейными лунками // Письма в ЖТФ. 2018. Том 44, Вып. 9. С. 73-80.
4. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Гульцова М.Е. Интенсификация теплообмена при ламинарном вихревом течении воздуха в узком канале с однорядными наклоненными овальными лунками // Инженерно-физический журнал. 2018. Т.91. №4. С.1022-1034.

5. Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Ya., Popov I. Vortex heat transfer enhancement by oval-trench dimples in narrow channels // Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16, August 10-15, 2018, Beijing, China, IHTC16-22874. 8p.
6. Усачов А.Е., Мазо А.Б., Калинин Е.И., Исаев С.А., Баранов П.А., Семилет Н.А. Повышение эффективности численного моделирования турбулентных отрывных течений с помощью применения гибридных сеток со структурированными разномасштабными блоками и неструктурированными вставками // Труды МАИ. 2018. Выпуск 99. 18с.
7. Isaev S. A. Experience of application of SST-model-2003 with correction on streamline curvature according to Rodi-Leshziner-Isaev approach for (U)RANS calculations of separated and vortex sub- and supersonic flows // AIP Conference Proceedings. 2018. 2027, P. 020015.1-7.

# Vvflow CFD Suite

Дынников Я.А.

*НИИ механики МГУ*

Программный комплекс реализует бессеточный метод вязких вихревых доменов (ВВД) и позволяет решать широкий класс задач вплоть до сопряжённых задач с соударением.

Последнее время особое внимание уделялось простоте использования комплекса. Чтобы не ограничивать пользователя в возможностях при постановке задач, в комплекс был встроен интерпретатор скриптового языка Lua. Благодаря этому, процесс запуска расчета удалось свести к написанию несложных удобочитаемых скриптов.