

## Третий слёт «Отечественные CFD коды 2016»

### Название доклада:

Пакет расчётных программ HSFlow (ЦАГИ): Моделирование начала ламинарно-турбулентного перехода на гиперзвуке; моделирование физико-химических процессов.

Докладчик: Новиков Андрей Валерьевич

### Аннотация:

Представлена информация о пакете программ HSFlow (High Speed Flow solver), разрабатываемом в 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 TVD. HSFlow разработан для работы на высокопроизводительных многопроцессорных супер-ЭВМ кластерного типа.

В качестве достижений 2016 года представляются следующие:

- 1) Прямое численное моделирование начальной нелинейной стадии ламинарно-турбулентного перехода на пластине и рампе при гиперзвуковом обтекании. При этом в случае пластины используется расчётная область без симметрии и выполняется сравнение с симметричным расчётом, представленном на прошлом слёте в 2015 году. В расчётах применяется сетка до 500 млн узлов. Моделируется распространение искусственно внесённых возмущений при числе Маха набегающего потока  $M = 5.37$ . В процессе развития возмущения проходят стадии усиления (линейная неустойчивость) и последующего нелинейного разрушения, приводящего к турбулизации пограничного слоя.
- 2) Моделирование неравновесных физико-химических процессов в трёхмерной постановке. В HSFlow реализована 8ми-компонентная модель атмосферы Марса. Представлены результаты расчёта спускаемого аппарата Российско-Европейского проекта ExoMars.
- 3) Моделирование турбулентного пространственного сверхзвукового обтекания на примере спускаемого аппарата проекта ExoMars. Решаются трёхмерные нестационарные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса с двухпараметрической дифференциальной моделью турбулентности.

Комплекс программ АВАНГАРД/AVANGARD для численного моделирования всех стадий процесса взрыва от инициирования заряда гетерогенного ВВ до распространения ударной волны в окружающей среде, разлета осколков, перемешивания продуктов детонации с воздухом и их догорания

Шаргатов В.А.

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва

3D вычислительная программа АВАНГАРД/AVANGARD позволяет проводить параллельные вычисления на высокопроизводительных вычислительных системах для упруго-пластических реагирующих течений многокомпонентных и гетерогенных сред, возникающих при детонации гетерогенных взрывчатых веществ, содержащих металлические порошки. Производится расчет всех стадий процесса взрыва от инициирования заряда ВВ до распространения ударной волны в окружающей среде, разлета осколков, перемешивания продуктов детонации с воздухом и их догорания.

В зависимости от стадии процесса используются метод SPH или метод Годунова высокого порядка точности.

Программа успешно применяется для решения прикладных задач, в том числе для изучения на мезоуровне процессов распространения ударной волны по многокомпонентной смеси с последующим построением эффективной ударной адиабаты смеси для макро моделирования.

Код использует оригинальный приближенный эффективный метод расчета изменения химического состава продуктов взрыва при их расширении и перемешивании с воздухом, применение которого требует решения одного или двух дифференциальных уравнений, не составляющих жесткую систему, и алгебраических уравнений для расчета «квазиравновесного» состава методом экстремума характеристических функций при заданных термодинамических параметрах (удельная внутренняя энергия и удельный объем) и дополнительных соотношениях.

Код Jet3D: развитие в 2016 году  
Бендерский Л.А., Любимов Д.А., Макаров А.Ю., Соловьева А.А., Терехова А.А.,  
Федоренко А.Э., Честных А.О.  
ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва

Расчеты сложных турбулентных течений в элементах силовых установок (СУ) летательных аппаратов (ЛА) в зависимости от режима течения проводились с помощью разных ветвей кода. Метод RANS использовался в тех случаях, когда течение было близко к стационарному, либо геометрия слишком сложна для расчета с помощью вихреразрешающих подходов на доступных вычислительных ресурсах. Ветвь, базирующаяся на RANS/ILES методе, использовалась в ситуациях, когда доминировали турбулентные эффекты, и методы RANS не могли обеспечить достаточную точность. Задачи, которые решались с помощью кода Jet3FD можно разбить на три группы: течения в воздухозаборниках (ВЗ) разных типов при разных числах Маха набегающего потока с учетом влияния планера ЛА; течения в каналах в элементах СУ и газодинамическое управление этими течениями; реактивные струи из сопел разной формы.

Так с помощью метода RANS проводились расчеты течения в воздухозаборниках (ВЗ) в компоновке с планером ЛА. В частности были выполнены расчеты в сверхзвуковом ВЗ сложной геометрии при различных числах Маха набегающего потока. Точность оценивалась с помощью сравнения с расчетами пакетом Fastran.

Расчетов течений в ВЗ различной конфигурации проводились RANS/ILES методом в случаях, когда важно было учесть эффекты, обусловленные турбулентными явлениями и на нестационарных режимах. Представлены расчеты течения в гиперзвуковом ВЗ на дроссельных режимах. Исследовано влияние имитатора планера ЛА на течение в сверхзвуковом конвергентном ВЗ. Выполнены расчеты в «серпантинном» дозвуковом ВЗ, интегрированным с планером ЛА. Во всех случаях были получены зависимости характеристик ВЗ от степени дросселирования ВЗ.

Для исследования возможности газодинамического управления течениями в элементах СУ ЛА был также использован RANS/ILES метод. В качестве инструмента для управления течениями были использованы синтетические струи. Представлены результаты расчетов течений с использованием синтетических струй в диффузорах между ступенями турбины ТРД, в диффузоре серпантинного ВЗ. Получено влияние режимных параметров синтетических струй и положения щелей для их выхода на течение на выходе из диффузора. Проведены расчеты эффективности применения синтетических струй для управления течением в каверне М219. Получено влияние параметров синтетических струй на спектры и уровень пульсаций давления на стенках каверны.

RANS/ILES метод был применен для анализа особенностей течения в нерасчетных сверхзвуковых струях из сопел разных типов. Так было исследовано влияние геометрии сопла на течение в прямоугольной сверхзвуковой струе. Проведены расчеты одной и пары нерасчетных горячих сверхзвуковых струй. Параметры струй соответствовали реальным. Исследовано взаимодействие этих струй с газоотбойником на аэродроме. Определены зоны безопасного нахождения людей и техники по скорости, температуре и пульсациям давления. Получено влияние спутного ветра на течение в струях и размеры зон безопасности.

Представлены результаты по эффективности распараллеливания различных ветвей кода на суперкомпьютере современной архитектуры.

## Комплекс псевдомногосеточных подпрограмм для решения краевых и начально-краевых задач механики сплошной среды

*П.Д. Токталиев, С.И. Мартыненко*

*ФГУП «Центральный Институт Авиационного Моторостроения им. П.И. Баранова»*

Целью данной работы является развитие автономного (т.е. устроенного по принципу «чёрного ящика») кода для решения широкого класса (не)линейных прикладных задач, обладающего высокой эффективностью в последовательном и параллельном исполнениях. Отличительной особенностью разработанных программ является численное решение разностных краевых и начально-краевых задач при помощи универсальной многосеточной технологии (УМТ) [1]. УМТ является оригинальным односеточным вариантом метода Зейделя, который обладает трудоёмкостью, близкой к оптимальной, при минимуме проблемно-зависимых компонент, т.е. решение СЛАУ, полученных в результате аппроксимации краевых и начально-краевых задач, потребует  $O(N \lg N)$  арифметических операций,  $N$  где есть количество неизвестных. Для наглядности УМТ представлена как многосеточный метод, где метод Зейделя с блочным упорядочением неизвестных в качестве сглаживающей процедуры. Выбор сглаживающей процедуры позволяет решать унифицированным образом широкий класс задач, включая седловые. При решении уравнений Навье-Стокса используемый сглаживатель совпадает с методом Ванки, системы дифференциальных уравнений в частных производных всегда решают совместно.

В докладе дано краткое описание УМТ, основные результаты анализа сходимости и трудоёмкости, оценки ускорения и эффективности параллелизма и описание программной реализации основных компонентов технологии (построение и хранение многосеточной структуры, вычисление отображения индексов, аппроксимация шаблонных функционалов на многосеточной структуре и т.д.). Приведены примеры решения краевых и начально-краевых задач для уравнений Навье-Стокса, описывающих течение несжимаемой среды (результаты моделирования течений в каверне и катализаторе микроЖРД).

В настоящее время наиболее полные результаты получены для структурированных сеток. Показано, что в данном случае существует возможность уменьшения объёма вычислений при решении уравнений Навье-Стокса посредством декомпозиции давления и использовании интегральных форм уравнений неразрывности (уравнений постоянств массового расхода) в качестве дополнительных условий. Приведены соответствующие иллюстративные примеры (результаты моделирования течений в каверне и микросопле Лаваля).

В заключение сформулированы основные направления обобщения разработанных численных методов и программного обеспечения на неструктурированные сетки.

1. Мартыненко С.И. Многосеточная технология: теория и приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 208 с.

### **Сведения об участниках:**

Токталиев Павел Дамирович

ФГУП «Центральный Институт Авиационного Моторостроения им. П.И. Баранова»

Мартыненко Сергей Иванович (докладчик)

ФГУП «Центральный Институт Авиационного Моторостроения им. П.И. Баранова»

## **КОМПЛЕКС ПРОГРАММ SIGMAFLOW. 2016.**

Гаврилов А.А., Дектерев А.А.  
Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе  
Красноярский филиал

Комплекс программа SigmaFlow – это универсальный некоммерческий программный продукт для решения широкого класса задач гидродинамики, тепломасообмена и горения, развиваемый специалистами красноярского филиала института теплофизики СО РАН и кафедры теплофизики Сибирского федерального университета.

В комплекс программ SigmaFlow входят модули для: построения геометрии расчетного объекта; создания расчетных сеток; проведения вычислений; анализа результатов моделирования. Программа позволяет выполнять высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах под управлением Windows или Linux операционных систем. Численная методика, заложенная в программу, основывается на методе конечного объема для неструктурированных сеток. Связь между полями скорости и давления реализуется при помощи процедуры расщепления. Системы разностных уравнений решаются итерационным способом с применением многосеточных методов.

Доклад посвящен новым возможностям программы SigmaFlow развиваемым в 2016 году, это:

- использование передачи геометрических данных из CAD систем и автоматическое построение пространственной расчетной сетки;
- моделирование двухфазных ламинарных и турбулентных течений;
- моделирование сопряженного и радиационного теплообмена;
- гибридное моделирование CFD-гидравлические сети;
- разработка версии программы для расчета на multi-gpu кластерных системах

### **Заявка на участие**

Докладчик

Дектерев Александр Анатольевич  
Институт теплофизики СО РАН, Красноярский филиал

Содокладчик

Гаврилов Андрей Анатольевич  
Институт теплофизики СО РАН, Красноярский филиал

Пакет прикладных программ EWT-ЦАГИ: решатель RoS во вращающейся системе координат.

А.В. Лысенков (ФГУП “ЦАГИ”)

В ЦАГИ, под руководством д.т.н. С.М. Боснякова, разработан и успешно используется для решения практических задач пакет прикладных программ EWT-ЦАГИ. Схема, используемая в решателях, основана на схеме Годунова-Колгана-Родионова. С его помощью исследуются как внешнее обтекание летательных аппаратов и их элементов, так и внутренние течения в каналах силовых установок различного назначения. Однако решатели, имеющиеся в EWT-ЦАГИ, позволяют рассчитывать обтекание только неподвижных объектов.

Целью данной работы является модификация решателя ZEUS для расчёта обтекания потоком вязкого газа вращающихся объектов. Для этого модифицируются явная и неявная расчетные схемы, граничные условия и вводятся семейства для расчета объектов, вращающихся с различной скоростью. Разработанные изменения реализуются в компьютерной программе RoS.

После разработки проводится верификация и валидация расчетного метода. Валидация проводится на следующих тестовых случаях: шестилопастной воздушный винт, двухлопастной воздушный винт, биротативный винтовентилятор с мотогондолой (Рисунок 1).

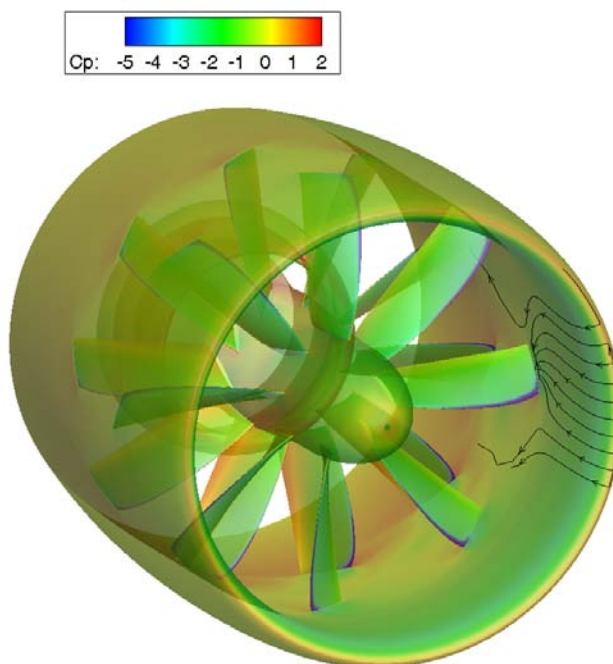


Рисунок 1 – Поле коэффициента давления и линии тока на поверхностях

## **Программный комплекс NOISEtte для моделирования задач нестационарной аэродинамики и аэроакустики для авиационных приложений, прогресс за 2016**

И. В. Абалакин, П. Б. Бахвалов, В. Г. Бобков, А. П. Дубень,  
А. В. Горобец, Н. С. Жданова, Т. К. Козубская

ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва

Программный комплекс NOISEtte предназначен для газодинамических и аэроакустических расчетов на неструктурированных гибридных сетках. Пространственная аппроксимация обеспечивается семейством экономичных схем повышенного порядка точности. Для распараллеливания используется многоуровневое MPI+OpenMP распараллеливание.

В докладе будут представлен прогресс в развитии кода за 2016-й год, который включает следующие методы и подходы:

- новая схема на основе метода коррекции потоков;
- динамически адаптивные сетки с подвижными узлами;
- автоматический ИК-режим построения реберно-ориентированной схемы;
- решатели для сверхзвуковых и гиперзвуковых режимов (HLLC, HLLC и др.);
- улучшения по многоуровневому распараллеливанию.

Также будут представлены новые численные исследования, выполненные в 2016-м году, включающие расчеты по акустике струй, моделирование дефлекторов с применением погруженных граничных условий, гиперзвуковое обтекание сферы.

Головизнин Василий Михайлович, ВМК МГУ

Глотов Вячеслав Юрьевич, ИБРАЭ РАН

Данилин Александр Вадимович, ИБРАЭ РАН

Соловьёв Андрей Валерьевич, ИБРАЭ РАН

## Развитие кодов методики КАБАРЕ

---

Методика КАБАРЕ предназначена для решения гиперболических систем уравнений с частными производными. Разностные схемы на основе этой методики отличает второй порядок аппроксимации на неравномерных сетках, минимальный вычислительный шаблон, малая схемная вязкость.

Основные усилия разработчиков в 2016 году связаны с кодом CABARET-Stages. В 2016 году код перешёл на стадию опытной эксплуатации. Код ориентирован на расчёт одно- и многокомпонентных 3-мерных вязких течений в приближении идеального газа или слабосжимаемой жидкости на неструктурированных гексаэдральных сетках. Опытная эксплуатация проводится в ИБРАЭ РАН на задачах течения жидкометаллического теплоносителя, а также задачах водородной безопасности под контайнментом. В коде CABARET-Stages для решения этих задач в 2016 году дополнительно была реализована возможность расчёта детонации и диффузии газов.

Второе направление развития – трёхмерный код на вложенных прямоугольных сетках. Сетка изначально является прямоугольной IJK-сеткой, каждая ячейка которой может быть либо разбита на 2, 4 или 8 вложенных ячеек, либо удалена. Ячейки нового уровня разбиения так же могут быть разбиты на меньшие или удалены. Методика КАБАРЕ была распространена на такие сетки с сохранением основных достоинств – бездиссипативность в линеаризованном случае, второй порядок аппроксимации, минимальный вычислительный шаблон. Механизм локального разбиения ячеек позволяет мельчить сетку только в нужных областях, что резко сократило ресурсы по памяти при сохранении необходимой точности расчётов. Была реализована асинхронная процедура вычислений, позволяющая при нескольких вычислительных шагах в мелких ячейках выполнять один шаг в крупных. Код находится в стадии разработки.



**Smesher** – полуавтоматический генератор блочно-структурированных сеток

А.И. Белокрыс-Федотов, В.А. Гаранжа, Л.Н. Кудрявцева

ВЦ ФИЦ ИУ РАН (Москва)

Smesher предназначен для полуавтоматического построения расчетных сеток для тел с рулями и крыльями. Он позволяет строить криволинейные блочно-структурированные сетки, которые ортогональны около поверхности и удовлетворяют заданным законам сгущения. Включает в себя генератор алгебраических сеток, генератор плоских сеток на последовательности плоских сечений, и генератор трехмерных сеток на основе вариационного метода. Графический интерфейс отсутствует. Эффективные методы распутывания и оптимизации расчетных сеток позволяют строить крупноблочные сетки без выделения острых кромок геометрии пользователем. Генератор разработан для промышленного заказчика, и используется в цикле проектирования изделий. В настоящее время разрабатывается параллельная версия генератора. Планируется объединение генератора smesher с генератором призматических слоев `prismatic_q13d_poly`, а также с генератором `sotm` сеток Делоне-Вороного в неявных областях с негладкой границей в единую сеточную библиотеку.

## Комплекс программ ЛОГОС: Новые функциональные возможности пакета программ

Д.К. Зеленский, Ю.Н. Дерюгин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл.

В докладе представлены новые функциональные возможности пакета программ ЛОГОС. Освещены вопросы распараллеливания вычислений на вычислительных системах с универсальными процессорами и на кластерах с гибридной архитектурой, вопросы векторизации вычислений для различных типов вычислительных устройств. В последнее время, большое внимание уделяется развитию функционала для решения задач на сетках с перекрытиями типа "Химера". С их использованием решён ряд задач: старт АСП в присутствии носителя и моделирование легкомоторного спортивного самолёта с работающим двигателем. В докладе содержится описание возможностей комплекса ЛОГОС по решению междисциплинарных задач с примерами решённых задач. Приведено описание методики нестационарного расчёта течения газа в компрессоре турбодвигателя, описание моделей турбулентного горения и модели теплокомфорта. В конце доклада приведено описание возможностей пре и постпроцессора пакета программ ЛОГОС.

## Название кода?

ЛОГОС

## Общие цели и задачи кода

Решение промышленных задачи, внедрение в высокотехнологические отрасли промышленности

## Интеграция с другими кодами для решения междисциплинарных задач?

Реализована возможность расчёта междисциплинарных задач: CFD+прочность, CFD+Теплопроводность,

## Что моделируется (классы течений)

Сжимаемые течения – Дозвук, Сверхзвук, Гиперзвук, Несжимаемые течения  
Многофазность – Свободная поверхность, Моделирование капельно-дисперсных сред  
Возможность доп. теплообмен излучением, аэроакустика, фильтрация,

## Модели

Эйлер, НС, Моделирование турбулентных течений (RANS, LES, DES, RSM )

## Сетки и сеточные технологии

Неструктурированные сетки, состоящие из многогранников произвольной формы, подвижные сетки,  
Технологии для многоблочных сеток: Химера, скользящие сетки

## Есть ли собственный генератор сеток?

Генератор блочно-структурированных сеток (уровень коммерческого ПО), неструктурированные сетки методом отсечения с призматическими слоями (доведение до уровня коммерческого ПО)  
Если возможность импорта сеток из ANSYS, Star CD, Star CCM+

## Препроцессор и постпроцессор?

Разработан

## Дополнительные возможности?

Подвижные тела 6DOF, ротор-статор

## Численные методы?

Конечно-объемные методы,  
Переменные (плотность-скорость-энергия), (давление-скорость-температура)  
Порядок аппроксимации по пространству: 2  
Интегрирование по времени: явные схемы, полуявные схемы, неявные схемы,  
Решение СЛАУ: алгебраический многосеточный метод  
Ускорители сходимости стационарных задач (локальный шаг по времени, многосеточные ускорители, сглаживание невязок)

## Целевые архитектуры вычислительных комплексов и операционные системы?

x86, x86+Phi, Эльбрус, Windows, Linux,

## Параллельные вычисления?

Тип распараллеливания: одноуровневое – MPI+Векторизация, многоуровневое  
MPI+OpenMP+Векторизация  
Рабочий диапазон числа процессорных ядер - до 100000  
Гетерогенные вычисления – поддержка Intel Xeon Phi

## Техника и политика тестирования?

Периодическое регрессивное тестирование, база данных тестов ~300 тестов

## Ведение документации?

Документация пользователя (оператора), документация программиста, полностью документированный исходный код

## Средства разработки и управление версиями?

Есть ли система хранения исходного кода, какая?, среда разработки, есть ли понятие выпуска версий, если есть, то как часто выпускаются?

## Языки программирования и API

C, C++...

Развитие программной платформы INMOST: динамические распределенные сетки, автоматическое дифференцирование и линейные решатели.

Д.В. Багаев, А.И. Бурачковский, И.Н.Коньшин, К.М.Терехов.  
(ИВМ РАН, МГУ, Москва; Стенфордский университет, США)

Представляется развитие параллельной программной MPI-платформы INMOST, применяемой в качестве основы для разработки параллельных численных моделей на сетках общего вида.

Технологический комплекс INMOST (Integrated Numerical Modelling and Object-oriented Supercomputing Technologies) характеризуется общностью, гибкостью и экономичностью структур распределенных сеточных данных, а также эффективностью работы и кроссплатформенностью.

В настоящее время используется в нескольких CFD проектах.

Исходный код INMOST вместе с подробным описанием, примерами использования и инструкцией по его установке на платформах Windows и Linux находится на сайте <http://www.inmost.org/>.

В докладе рассматриваются развитие программной платформы INMOST, направленное на работу с динамическими распределенными сетками на основе восьмидеревьев, использование механизма автоматического дифференцирования при описании схемы дискретизации, а также последние разработки эффективных решателей линейных систем и механизма подключения новых линейных решателей.

Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г. (СПбГУГА), Усачов А.Е. (МК ЦАГИ)  
Эволюция и верификация пакета VP2/3 (2015-2016).

1. Развитие и валидация MBT на полностью неструктурированных сетках, содержащих разномасштабные структурированные фрагменты. Акцент на определении ошибок численных расчетов отрывных течений на различных типах сеток.
2. Постепенное освобождение от ДЕЛЬФИ и перевод всех модулей на C++ с распараллеливанием на многоядерных платформах. Тестирование с использованием многосеточных процедур в библиотеке AMG Демидова.
3. Продолжение тестирования SST-модели 2003 года с поправкой Роди-Лешцинера-Исаева на кривизну линий тока. Двумерные задачи с периодическими вихревыми течениями и трехмерные стационарные задачи конвективного теплообмена [1].

[1] Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое и моделирование / Под ред. С.А. Исаева. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2016. 215 с.

Усачов А.Е. (МК ЦАГИ), Мазо А.Б., Калинин Е.И. (КФУ), Баранов П.А., Исаев С.А. (СПбГУГА)

## Генератор композитных сеток

Генератор сеток HubMesh предназначен для объединения набора блоков, содержащих сетки различной структуры в единую сетку. Объединение производится с помощью последовательного наложения сеток, проводимого в два этапа. На первом из «нижней» сетки вырезается область, соответствующая «верхней», расширенной на заданный размер. На втором этапе образовавшиеся лакуны заполняются неструктурированной сеткой. Разработана 2/5D версия генератора. В проекте трехмерная версия.

## Программный код SINF/Flag-S – 2016

### Реализация и модификация метода дробных шагов для решения существенно нестационарных задач гидродинамики

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

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)

Код SINF/Flag-S предназначен для решения задач гидроаэродинамики и теплообмена по методу конечных объемов на многоблочных неструктурированных сетках с произвольным типом ячеек (в том числе полиэдральными); разрабатывается с 2005 г. на основе исходно структурированного кода SINF; параллелизация кода выполнена при помощи MPI и протестирована на задачах с размером сетки порядка  $10^9$  ячеек вплоть до 5000 процессов. При помощи кода SINF/Flag-S (или его ответвлений) могут решаться задачи из следующих классов: ламинарные и турбулентные течения жидкости; дозвуковые течения газа; теплообмен при вынужденной, свободной и смешанной конвекции в полях массовых сил (гравитационной, центробежной и силы Кориолиса); задачи сопряженного теплообмена, включая процессы испарения и конденсации на границах раздела сред; задачи конвективно-диффузионного переноса примеси; течения со свободной поверхностью (метод VOF); течения в пористых средах.

В настоящее время для исследований процессов тепло- и массообмена активно применяется численное моделирование на основе вихререзающих подходов, таких как DNS, Implicit LES, Explicit LES, и гибридных RANS/LES, в рамках которых требуется решать существенно нестационарные уравнения. Для более эффективного решения подобного рода задач в коде SINF/Flag-S был реализован «классический» метод дробных шагов (fractional step method, или иначе проекционный метод), в котором для продвижения по времени использовалась схема Кранка-Николсон, а конвективные слагаемые экстраполировались по явной схеме с двух предыдущих шагов по времени. По этой причине реализованный численный метод является устойчивым только при числах Куранта меньше единицы. Также, для учёта скошенности ячеек сетки была введена поправка на скошенность путём введения итерационной процедуры решения балансовых уравнений.

При тестировании реализованного «классического» метода дробных шагов на задачах свободноконвективного течения и теплообмена вблизи шахматных гладкотрубных пучков (с использованием DNS-подхода) было обнаружено, что расчёт на сильно скошенных сетках требует либо очень малых шагов по времени (числа Куранта меньше 0.1), либо вообще расходится. В этой связи в 2016 г. были предложены некоторые модификации метода, которые позволили существенно улучшить его устойчивость, а именно: была добавлена трёхслойная схема продвижения по времени и реализована неявная схема расчёта конвективных слагаемых. Реализованные модификации позволяют проводить расчёт на сильно скошенных сетках при относительно больших шагах по времени, а также увеличивать число Куранта вплоть до нескольких десятков (что, в частности, может применяться для ускорения процесса выхода на установившийся режим).

## Программный код SINF/Flag-S – 2016

### Моделирование сопряженного тепломассопереноса с испарением рабочего тела на поверхности пористой структуры с применением многосеточных алгоритмов

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

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В докладе представляются результаты разработки достаточно общей расчетной технологии моделирования трехмерных процессов сопряженного тепломассопереноса с испарением рабочего тела на поверхности одного или нескольких пористых тел. Математическая модель описывает сопряженный тепломассообмен в составных системах, которые включают в себя проточные части, занятые рабочим телом в паровой или жидкой фазе, твердотельные и пористые элементы. Течение теплоносителя в жидких и паровых областях рассчитывается на основе системы уравнений Навье-Стокса в предположении ламинарного и существенно дозвукового характера движения. Течение в пористых элементах описывается уравнением Пуассона для давления, получаемым при подстановке линейного или нелинейного закона фильтрации в уравнение неразрывности. Теплообмен моделируется на основе уравнения энергии, с аккуратным сопряжением соприкасающихся областей по тепловым потокам и температурам. На границе пористого тела с паром температура полагается равной температуре насыщенного пара при местном давлении в паровой фазе, а скорость испарения определяется величиной подводимого к границе теплового потока.

Представленная математическая модель реализована в программном коде SINF/Flag-S. Для решения задач большой размерности разработан геометрический многосеточный метод с оригинальным алгоритмом агломерации ячеек. Данный метод протестирован на различных задачах и показал хорошую вычислительную эффективность.

В качестве примера применения разработанной расчетной технологии приводятся результаты имитационного численного моделирования течения и сопряженного тепломассопереноса в трехмерной модели испарителя контурной тепловой трубы (КТТ), построенной по имеющейся в открытом доступе информации о КТТ американского микроспутника TacSat-4.