

Аннотации докладов второго слёта разработчиков CFD кодов «Отечественные CFD коды 2015»

«Развитие программного комплекса FlowVision»

А. А. Аксенов (ТЕСИС, г. Москва)

В докладе будут представлены новые возможности программного комплекса FlowVision, реализованные за 2015 год, также будут представлены некоторые новые задачи, решенные в этом же году.

В настоящее время программный комплекс постепенно трансформируется в Вычислительную Инженерную Платформу FlowVision и в докладе будут представлены результаты первых интеграций с другими научными группами.

«Код MARPLE: решение трехмерных магнитогидродинамических задач и принципы построения»

*Г. А. Багдасаров, А. С. Болдарев, В. А. Гасилов, О. Г. Ольховская
(ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва)*

На протяжении ряда лет в нашем отделе ИПМ им. М. В. Келдыша активно разрабатывается компьютерный код MARPLE - Magnetically Accelerated Radiative Plasma Explorer. Первоначальное назначение кода - решение с помощью параллельных суперкомпьютеров задач, возникающих при трехмерном моделировании экспериментов с высокотемпературной плазмой. Из-за многообразия физических процессов, которые следует принимать во внимание при таком моделировании, а также из-за чрезвычайно высокой степени пространственной и временной неоднородности, характерной для этих задач, такое моделирование требует очень больших затрат вычислительных ресурсов и поэтому может быть проведено на сколько-нибудь серьезном уровне только с использованием распределенных высокопроизводительных вычислительных систем, особенно в трехмерном случае. В коде используется односкоростное двухтемпературное МГД приближение с учетом переноса излучения, диффузии магнитного поля и эффекта Холла. Для замыкания системы уравнений используются табличные широкодиапазонные уравнения состояния.

Разнообразие постановок задач и используемых математических моделей привело к необходимости создания чрезвычайно гибкого объектно-ориентированного кода, позволяющего учитывать или не учитывать в расчете те или иные физические эффекты, и учитывать их по разным моделям. Это обстоятельство, наряду с использованием аппроксимаций на основе неструктурированных сеток, позволяет использовать код MARPLE также и для решения некоторых задач из других предметных областей - например, прикладной гидродинамики. Код MARPLE изначально создавался как универсальный легко достраиваемый код, это достигалось благодаря его структуре и широкому использованию объектно-ориентированных возможностей языка C++. В результате, в настоящее время к коду легко могут быть добавлены новые солверы, уравнения состояния, граничные условия и т. д.

«Комплекс программ SMILE: инструмент для расчетов разреженных течений методом прямого статистического моделирования»

Е. А. Бондарь (ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)

Программный комплекс SMILE (Statistical Modeling in Low-Density Environment – статистическое моделирование в средах с низкой плотностью) разработан в лаборатории вычислительной аэродинамики Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской Академии наук. Комплекс предназначен для решения фундаментальных и прикладных задач динамики разреженного газа методом прямого статистического моделирования (ПСМ) на многопроцессорных ЭВМ.

Комплекс SMILE позволяет проводить численное исследование газовых течений в режимах от переходного до свободномолекулярного, то есть таких течений, в которых длина свободного пробега в газе сравнима или намного превышает характерные размеры задачи. Численное моделирование таких течений необходимо при проведении исследований в областях вакуумной газовой динамики, физики молекулярных пучков, физики плазмы и газового разряда, высотной аэродинамики и др. Для описания таких течений необходимо использовать кинетический подход, основанный на уравнении Больцмана. В настоящий момент метод ПСМ, в котором реальное газовое течение представляется в виде ансамбля модельных молекул (обычно $\sim 10^5$ – 10^9 молекул), взаимодействующих между собой и с твердой поверхностью, является наиболее мощным инструментом для численного решения уравнения Больцмана в двумерной и трехмерной постановках. В комплексе SMILE реализованы наиболее современные и эффективные схемы метода ПСМ.

Программный комплекс позволяет проводить исследования течений разреженного газа в двухмерной, осесимметричной и трехмерной постановках с использованием упрощенной геометрической модели исследуемого объекта. Комплекс позволяет проводить расчеты неравновесных течений смесей газов с учетом эффектов реального газа (обмен энергией между поступательными и внутренними модами молекул, химические реакции и т.д.). Все интерактивные подсистемы комплекса имеют графический интерфейс, что делает их доступными при использовании в исследовательском и учебном процессе.

Работоспособность комплекса SMILE подтверждена многочисленными публикациями, в которых производились сравнения результатов расчетов комплексом SMILE и экспериментальных данных как российских, так и зарубежных исследователей.

«Комплекс программ SigmaFlow 2015»

А. А. Гаврилов, А. А. Дектерев, А. В. Сентябов (ИТ СО РАН, г. Красноярск)

Комплекс программа SigmaFlow – это универсальный некоммерческий программный продукт для решения широкого класса задач гидродинамики, тепломассообмена и горения, развиваемый специалистами красноярского филиала института теплофизики СО РАН, кафедры теплофизики Сибирского федерального университета и отдела прикладного моделирования фирмы ООО «ТОРИНС».

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 2015 году, это:

- использование передачи геометрических данных из CAD систем и автоматическое построение расчетной сетки;
 - развитие гибридных RANS/LES моделей турбулентных течений;
 - моделирование ламинарных и турбулентных течений неньютоновских жидкостей;
 - моделирование дисперсных турбулентных течений;
 - разработка версии программы для расчета на гибридных CPU-GPU кластерных системах.
-

«Программный комплекс NOISEtte»

*И. В. Абалакин, П. Б. Бахвалов, В. Г. Бобков, А. П. Дубень, А.В. Горобец,
Н. С. Жданова, Т. К. Козубская (ИППМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва)*

Программный комплекс NOISEtte предназначен для моделирования сжимаемых турбулентных течений и генерируемых турбулентностью акустических полей. В основе численного алгоритма лежат экономичные EBR схемы повышенного порядка точности на неструктурированных сетках. Для моделирования турбулентности реализованы различные подходы, включающие DNS, RANS, LES, гибридные RANS-LES методы. Исходный код написан на языке C++ стандарта C++03 с использованием интерфейсов прикладного программирования MPI 1.3 и OpenMP 3.0. Поддерживаются вычислительные системы на основе многоядерных CPU, а также ускорители Intel Xeon Phi в симметричном режиме.

Доклад будет посвящен прогрессу программного комплекса в 2015 году. За этот год в NOISEtte реализованы следующие методы и подходы, которые будут представлены в докладе:

- элементно-центрированные EBR схемы для гибридных неструктурированных сеток;
- вращающиеся сетки, соединенные посредством скользящего интерфейса;
- погруженные граничные условия нескольких типов;
- LES модели турбулентности WALE, Verstappen, Vreman, Sigma, S3PQ, S3PR, S3QR;
- новая модификация метода DES с ускорением «численного перехода» в слоях смешения;
- существенно-многопоточное распараллеливание для Intel Xeon Phi.

Также в докладе будут кратко представлены результаты некоторых расчетов, выполненных с помощью новых реализованных технологий, включая расчет винта ПСВ, винта в кольце, круглой дозвуковой струи, каверн различной конфигурации.

«Развитие бессеточных кодов ВВД-2D и ВДД-3D для численного решения сопряженных задач нестационарного взаимодействия упруго связанных тел с вязкой сплошной средой»

*С. В. Гувернюк, Я. А. Дынников, Г. Я. Дынникова, Д. А. Сыроватский
(НИИ механики МГУ, г. Москва)*

Представлено текущее состояние разработки комплекса научных и научно-технических решений в области создания программного обеспечения вычислительных технологий бессеточного моделирования при решении сопряженных задач нестационарного взаимодействия упруго связанных тел со сплошной средой в научных и инженерных приложениях на основе двумерного метода вязких вихревых доменов (ВВД) и трехмерного метода вязких дипольных доменов (ВДД). Комплекс предназначен для решения научных и инженерных задач моделирования взаимообусловленного нестационарного движения тел и сопротивляющейся среды, адекватное решение которых затруднено или невозможно в рамках традиционных сеточных вычислительных технологий. К таким задачам относятся моделирование динамики трансформируемых конструкций и легких оболочек в жидкости, вопросы прогнозирования нелинейных автоколебаний и авторотации упруго связанных тел в потоке вязкой жидкости, выявление механизмов возникновения и развития вихревого флаттера и ряд др. задач нестационарного взаимодействия тел со сплошной средой.

«Пакет расчётных программ HSFlow. Прямое численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода при гиперзвуковом обтекании»

И. В. Егоров, А. В. Новиков (ЦАГИ, г. Жуковский, Московская обл.)

Представлена информация о пакете программ HSFlow (High Speed Flow solver), разрабатываемом в ЦАГИ под руководством И.В. Егорова. Пакет предназначен для моделирования трёхмерных и двухмерных (плоских или осесимметричных) внешних и

внутренних вязких течений при транс-, сверх- и гиперзвуковых скоростях в том числе с учётом турбулентности на основе численного решения уравнений Навье–Стокса или Рейнольдса. Программы поддерживают работу на высокопроизводительных многопроцессорных супер-ЭВМ кластерного типа. В HSFlow применяется неявный численный метод конечного объёма второго порядка аппроксимации по пространству и времени, используется квази-монотонная схема TVD.

В качестве достижения 2015 года представляются результаты прямого численного моделирования ламинарно-турбулентного перехода на пластине при гиперзвуковом обтекании. Расчёты выполнялись на вычислительном кластере с использованием 1152 процессорных ядер на сетке из 500 млн. узлов. Моделируется распространение в пограничном слое 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. В докладе демонстрируются визуализация трёхмерных вихревых структур переходного пограничного слоя, спектры возмущений на поверхности, профили турбулентных пульсаций, распределение коэффициентов трения по поверхности.

«Комплекс программ исследования линейной устойчивости конвективных течений»

М. К. Ермаков (ИПМех РАН, г. Москва)

Комплекс программ предназначен для определения порогов линейной устойчивости ламинарных конвективных течений несжимаемой жидкости. В качестве определяющих уравнений используются уравнения Навье–Стокса в приближении Буссинеска для осесимметричного конвективного течения. Пороги нейтральной устойчивости линейной задачи определяются путем решения обобщенной задачи на собственные значения относительно трехмерных возмущений.

Стационарное осесимметричное течение определяется методом Ньютона в матричном виде с коррекцией. На втором шаге решается обобщенная задача на собственные значения $Ax = \lambda Bx$, определяющая декременты роста трехмерных возмущений [1]. Размерность вектора x равна количеству неизвестных (степеней свободы). Матрица A является разреженной несамосопряженной комплексной матрицей, матрица B – вырожденной диагональной матрицей. Для решения спектральной задачи используются метод обратной итерации или метод Арнольди в режиме обращения со сдвигом для нахождения части спектра с максимальной действительной частью, реализованный в пакете ARPACK.

Суперкомпьютерный вариант кода позволил провести расчеты основного решения на сверхподробных сетках с числом узлов 5000×5000 точек (125 млн неизвестных) для нахождения стационарного решения и до 3000×3000 точек (45 млн неизвестных) для решения задачи устойчивости [2]. Расчеты проводились с использованием СК «Ломоносов».

Комплекс программ использовался для исследования устойчивости в гидродинамических моделях роста кристаллов и задачах об устойчивости термокапиллярных течений. Разработанные методы и коды могут быть также использованы для исследования устойчивости течений в задачах внешнего обтекания, крупномасштабной конвекции в мантии и атмосфере Земли и динамики плазмы в осесимметричных конфигурациях.

Литература

1. М.К. Ermakova, M.S. Ermakova. Linear-stability analysis of thermocapillary convection in liquid bridges with highly deformed free surface. *J. Crystal Growth* 266 (2004) 160–166.
 2. М.К. Ермаков. Исследование устойчивости в гидродинамических моделях роста кристаллов // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности: Альманах. М.: Изд-во МГУ, 2014. –216 с. С. 141-146.
-

«Комплекс программ SINF – 2015»

*Д. К. Зайцев, А. А. Пожилов, Е. М. Смирнов, А. А. Смирновский, А. И. Храбрый,
(СПбПУ, г. Санкт-Петербург)*

Базовый код SINF (Supersonic to INcompressible Flows) + несколько специализированных кодов на его основе (в т.ч. отчужденные). Многоблочные сетки (без наложения), структурированные или неструктурированные полиэдральные (в разных кодах).

Система: Windows/Linux; Fortran-90 (77).

Распараллеливание: MPI-2.0; декомпозиция по блокам сетки; опробовано до 1000 ядер.

Основные возможности: до- и сверхзвуковые течения газа или несжимаемой жидкости (3D Навье-Стокс); низкоскоростные течения парогазовых смесей с равновесной объемной и пленочной конденсацией; сопряженный теплообмен (без радиации); эффекты плавучести; неподвижная и/или вращающаяся системы отсчета, взаимодействие статор-ротор (скользящие сетки, поверхность смещения, «frozen rotor»); задачи с подвижными границами (деформируемые сетки), опции аэроупругости; течения со свободной поверхностью (VOF); лагранжево описание частиц.

Турбулентность: ~20 RANS моделей (k, nt, k-e, k-w, SST, v^2f , γ - Re_θ); вихререзающие подходы (LES, RANS/LES); «автоматические» пристенные функции.

Дискретизация: метод конечного объема; второй порядок по времени и пространству (на «хороших» сетках); регулярные («узел в узел») и нерегулярные стыковки блоков.

Солверы для CIAU: AFM, ADDI, SGS, ILU, CG, Bi-CGstab, GMRES.

Достижения 2015:

- сопряженный тепломассоперенос (жидкость, пар, пористые структуры, твердое тело, испарение/конденсация, поверхностное натяжение) с ориентацией на 3D моделирование теплофизических эффектов в аксиальных и контурных тепловых трубах;
 - агломерационный многосеточный метод для решения уравнения Пуассона;
 - 3D расчеты нестационарных течений со свободной поверхностью (метод VOF).
-

«Развитие и тестирование пакета VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D) с акцентом на сравнение версий SST модели турбулентности»

С. А. Исаев (СПб ГУГА, г. Санкт-Петербург)

Совершенствование многоблочных вычислительных технологий, базирующихся на разномасштабных с пересечением сетках, в том числе с неструктурированными вставками, приводящее к уточнению прогнозов характеристик отрывных течений на умеренных сетках. Внедрение многосеточного ускорителя в блок поправки давления с уточнением расчетов нестационарных вихревых течений. Тестирование различных версий SST-модели для расчета двумерных и трехмерных, стационарных и периодических турбулентных несжимаемых и сжимаемых (со скачками уплотнения и ударными волнами) течений с интенсивными крупномасштабными вихревыми структурами. Обоснование необходимости введения коррекции в связи с накачкой вихревой вязкости в ядра вихрей при использовании стандартной MSST 2003 года.

«Расширение банка моделей турбулентности кода VP2/3»

*П. А. Баранов, С. А. Исаев (СПб ГУГА, г. Санкт-Петербург),
А. Е. Усачев (НИМК ФГУП «ЦАГИ», г. Москва)*

Численно моделировалось двумерное течение тестовой задачи течение в плоском канале с круговой каверной, которая расположена на стенке канала. Для моделирования использовались четыре модели турбулентности: Спаларта-Аллмараса с коррекцией источникового члена, realizable k- ϵ модель турбулентности, модель турбулентности SST-Ментера, transition SST-Ментера с четырьмя уравнениями. Результаты численного

моделирования сравнивались с экспериментальными данными, полученными в НИИ Механики МГУ. Анализ полученных данных показал некоторое преимущество результатов transition SST-Ментера с четырьмя уравнениями.

«Комплекс программ RuSat»

А. В. Кашковский (ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)

Программный комплекс RuSat (Rapid Unified Satellite Aerodynamic Tool или быстрая унифицированная система расчета аэродинамики спутников) [1] предназначена для комплексной автоматизации проведения расчетов АДХ КА на свободномолекулярном (высоты более 200 км) и переходном (высоты 50-200 км) режимах течений. Для переходного режима используется инженерная аппроксимация между свободномолекулярным и гиперзвуковым ($Ma > 5$) континуальными режимами течения (используется модифицированная теория Ньютона).

Результаты расчетов используются на этапе концептуального проектирования КА, эксплуатации КА на орбите и анализа экологической безопасности в случае неудавшегося запуска или нештатного спуска с орбиты. Комплекс RuSat создавался и дорабатывался в ИТПМ СО РАН в 2000-2007 гг., и помимо института эксплуатируется в нескольких организациях, занимающихся разработкой КА.

Комплекс имеет графический пользовательский интерфейс, встроенный редактор геометрических моделей, базу данных, нескольких методов расчета, удаленный запуск расчетов, графическую визуализацию моделей КА и результатов расчета. Геометрическая модель, может быть достаточно сложной - порядка 100-200 и более геометрических элементов - конусов, цилиндров, сфер, пластин и т. д. Модель может содержать пользовательский список параметров, влияющих на форму модели (например, угол поворота солнечных батарей). АДХ могут быть вычислены как функция от геометрических параметров модели. Комплекс оптимизирован для проведения серий многопараметрических расчетов, а также анализа и сравнения результатов, полученных разными вычислительными методами.

Литература:

1. Кашковский А.В., Ващенко П.В., Иванов М.С. Программная система для расчета аэродинамики космических аппаратов. Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т 15. №. 1. С. 79-91.

«Многофункциональный пакет программ ЛОГОС для расчета зада гидродинамики и теплопереноса на супер-ЭВМ»

А. В. Козелков (ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская обл.)

При создании современных наукоемких изделий практически невозможно обойтись без использования численных методов расчета физических процессов в областях сложной геометрической конфигурации. В настоящее время накоплен достаточно существенный опыт решения задач вычислительной гидродинамики, понимания природы протекающих процессов и при существующем развитии численных методов, роста мощности и снижения стоимости компьютеров, а также доступности программного обеспечения становится возможным внедрение в практику универсальных инженерных пакетов. В эти пакеты входят каталоги математических моделей физических процессов, конечно-разностные схемы, ориентированные на расчеты с использованием различных дискретных сеточных моделей, а также модули решения систем алгебраических уравнений.

Широкое распространение коммерческих инженерных пакетов создаёт видимость того, что с их помощью можно решить задачи любой сложности и практически во всех промышленных областях. Однако, применимость реализованных в них физико-математических моделей для решения сложных производственных задач может составлять тему отдельного исследования, потому что научные изыскания по ним еще не окончены. В

существенной степени это касается проблемы реализации и практического применения моделей турбулентности, на произвольных неструктурированных сетках, которые доминируют при дискретизации областей сложной геометрической формы, которой обладают все промышленные объекты.

В настоящее время в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ ЛОГОС, позволяющий моделировать процессы аэро-, гидро- и газодинамики с использованием эффективных численных методов на произвольных неструктурированных сетках, состоящих из произвольных многогранников. В докладе приводится описание текущих функциональных возможностей пакета программ для решения задач вычислительной гидродинамики и теплопереноса. Кратко представлены физико-математические модели расчета различных гидродинамических физических процессов. Приводятся результаты адаптации и применения моделей пакета программ ЛОГОС для некоторых наиболее важных промышленных задач, решенных совместно со специалистами ведущих предприятий авиационной, атомной, автомобильной и космической отраслей.

«Программная платформа INMOST для разработки параллельных численных моделей на сетках общего вида»

Ю. В. Василевский, А. А. Данилов, И. Н. Коньшин, К. М. Терехов (ИВМ РАН, г. Москва)

Представляется опыт создания параллельной программной MPI-платформы и графической среды для разработки параллельных численных моделей на сетках общего вида. Технологический комплекс INMOST (Integrated Numerical Modelling and Object-oriented Supercomputing Technologies) – инструментарий для суперкомпьютерного моделирования, характеризуемый максимальной общностью поддерживаемых расчетных сеток, гибкостью и экономичностью структуры распределенных данных, кроссплатформенностью, а также графической средой для интерактивного пользовательского интерфейса.

INMOST может быть полезен разработчикам СИА, инженерам и математикам вычислителям, деятельность которых связана с суперкомпьютерным моделированием: всем тем, кто непосредственно создает параллельные приложения или использует параллельные численные модели.

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/>.

«Комплекс программ CFS3D/HyCFS для численного решения задач сверхзвуковой аэродинамики на компьютерах с параллельной и гибридной архитектурой»

А. Н. Кудрявцев (ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)

В докладе будет рассказано о комплексе исследовательских программ CFS3D/HyCFS, развиваемом в Лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН. Комплекс предназначен для численного моделирования течений сжимаемого газа с использованием современных схем сквозного счета. Он включает программы для решения двумерных (плоских и осесимметричных) уравнений Эйлера и Навье-Стокса на структурированных многоблочных сетках, двумерных и трехмерных уравнений Эйлера на неструктурированных (соответственно треугольных и тетраэдральных) сетках, код для решения маршевым методом трехмерных стационарных уравнений Эйлера, код для расчета течений с химическими реакциями, программу для расчета разреженных течений на основе прямого конечноразностного решения модельных кинетических уравнений, средства для обработки полей течения, позволяющие, в частности, строить численные интерферограммы, ширен-визуализации и теневые картинки. Для аппроксимации конвективных членов уравнений применяются TVD и WENO схемы высоких порядков точности (вплоть до 5-го), что позволяет

использовать разработанные программы для прямого численного моделирования перехода к турбулентности в сверхзвуковых течениях.

Все программы комплекса распараллелены для проведения расчетов на многопроцессорных компьютерах. Новая версия комплекса, называемая NuCFS, предназначена для использования на компьютерах гибридной архитектуры, включающих графические процессоры. Она включает три уровня параллелизации – обмен данными между ЦПУ с помощью библиотеки MPI, распараллеливание между ядрами одного ЦПУ на основе стандарта OpenMP, организацию вычислений на графических картах путем использования программно-аппаратной архитектуры CUDA.

В докладе, кроме подробного обсуждения структуры и возможностей программного комплекса, будут приведены многочисленные примеры его использования при решении конкретных задач сверхзвуковой аэродинамики.

«Код Jet3D: некоторые задачи 2015 года»

Л. А. Бендерский, Д. А. Любимов, И. В. Потехина, А. Э. Федоренко (ЦИАМ, г. Москва)

Для исследования течений в элементах силовых установок летательных аппаратов были использованы две ветви кода: RANS и RANS/ILES для расчета сжимаемых течений. С помощью метода RANS проведены расчеты течения в высокоскоростном воздухозаборнике (ВЗ) при сверхзвуковой скорости набегающего потока. Расчеты выполнялись при различной степени дросселирования ВЗ. В зависимости от степени дросселирования течение в канале ВЗ было как стационарным, так и не стационарным, соответствующим помпажному режиму.

RANS/ILES методом были исследованы особенности течений в элементах силовых установок самолетов, в ситуациях, когда лидирующую роль играют турбулентные эффекты, которые не удается с достаточной точностью описать с помощью RANS. Эти задачи описаны далее. Кроме того, были выполнены расчеты, направленные на оценку точности метода при решении тех или иных прикладных задач. В частности, была оценена точность модифицированного граничного условия, которое позволяет избежать экспансивного расчета течения в генераторе синтетических струй (ГСС) при расчете управления течениями с помощью синтетических струй. Синтетические струи находят все более широкое применение для управления течениями. И задача упрощенного моделирования ГСС актуальна, поскольку при исследовании эффективности синтетических струй приходится выполнять параметрические расчеты, поэтому важно минимизировать время и вычислительные ресурсы без потери точности.

Исследовано влияние скорости внешнего потока – дозвуковой или сверхзвуковой – на течение и уровень турбулентных пульсаций в прямоугольной каверне, известной в литературе как M219. Проведены расчеты эффективности применения синтетических струй для управления течением в этой каверне. Для моделирования ГСС была использована упрощенная модель, упомянутая выше. Исследовано влияние положения синтетических струй и их режимных параметров на уровень пульсаций давления и температуры в каверне. Получено влияние параметров синтетических струй на спектры пульсаций давления на стенках каверны.

Для конвергентного ВЗ сверхзвукового пассажирского самолета было исследовано влияние дросселирования на течение в канале ВЗ, а также на параметры потока и уровень турбулентных пульсаций на входе в двигатель. Получено влияние системы слива на характеристики ВЗ и уровень пульсаций параметров течения на выходе из него.

Были проведены расчеты по исследованию экрана на течение в холодной и горячей сверхзвуковых нерасчетных струях из прямоугольного сопла. Получено, что экран оказывает заметное влияние на течение, уровень пульсаций скорости, а также на ближнее и дальнее акустические поля в исследованных струях.

Проведены расчеты для оценки влияния поверхности аэродрома и отбойника на течение в холодной и горячей пристеночных нерасчетных сверхзвуковых струях из биконического сопла. На основе анализа результатов получены распределения температуры, пульсаций

температуры и давления около поверхности аэродрома, которые позволяют определить зоны безопасного нахождения людей. Представлены диаграммы направленности шума в дальнем поле всех исследованных струй.

Точность описанных выше расчетов оценивалась сравнением с доступными экспериментальными данными для конкретной задачи.

«SparseLinSol: библиотека для решения СЛАУ на основе многосеточных методов»

Б. И. Краснопольский (НИИ механики МГУ, г. Москва), А. В. Медведев (Т-сервисы, г. Москва)

В докладе будет представлена библиотека SparseLinSol (SLS), реализующая набор численных методов решения СЛАУ на параллельных вычислительных системах. Библиотека SparseLinSol содержит реализацию AMG и SAMG методов, а также ряд итерационных методов подпространства Крылова решения СЛАУ и состоит из оригинального кода на языках C/C++ с частичным использованием кода opensource библиотеки hupre. Особое внимание будет уделено таким особенностям реализации, как использование гибридной технологии программирования MPI+ShM для увеличения масштабируемости пакета на современных многоядерных системах, а также возможности использования графических ускорителей. Доклад расскажет о показателях масштабируемости, производительности и параллельной эффективности текущей реализации библиотеки на больших задачах, в которых фигурируют матрицы размером до 100 млн. неизвестных. Будет представлен плагин для пакета OpenFOAM, реализующий интерфейс сопряжения библиотеки. Библиотека может эффективно использоваться в качестве замены штатного многосеточного метода (GAMG) для решения, в том числе, эллиптических уравнений. Возможности применения плагина проиллюстрированы CFD-расчётами в области гидродинамики.

«Код VIRA. Виртуальная аэрогазодинамика»

Е. Ю. Карцева, А. В. Панасенко, В. В. Чернов (ЦНИИМаш, г. Королёв, Московская обл.)

Создание современных изделий ракетно-космической техники требует проведения вычислений на высокопроизводительных вычислительных системах значительно более мощных, чем, например, рабочие станции. В настоящее время для таких вычислений подходят гибридные высокопроизводительные вычислительные системы, основанные на универсальных процессорах и графических ускорителях.

Комплекс программ VIRA адаптирован к работе на универсальных процессорах и на графических ускорителях в сочетании с универсальными процессорами. В основе работы комплекса лежат системы уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса в сочетании с моделью турбулентности ST. Возможен расчет детонационных течений с использованием кинетики уравнений водородо-воздушных смесей. Комплекс программ снабжен графическим интерфейсом, возможностью построения сеток, обработки результатов расчетов и возможностью удаленной работы с суперкомпьютером. Работа комплекса проверялась на суперкомпьютерах ФГУП ЦНИИМаш, К100, МСЦ РАН.

Приведены результаты расчетов трансзвукового обтекания надкалиберных обтекателей, формирования течения газа в поршневой газодинамической установке, формирования детонационных течений.

«Программный комплекс S3D»

И. С. Меньшов, А. В. Северин (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва)

Предназначен для решения задач вычислительной газодинамики при помощи дискретизации уравнений Рейнольдса (осредненных уравнений Навье-Стокса). Для моделирования турбулентности используются методы LES с моделью Смагоринского-Лилли

или DES с моделью Спаларта-Аллмараса. Потоки массы, импульса и энергии на гранях определяются методом Годунова по точному решению нелинейной задачи Римана. Для интегрирования уравнений по времени применяется гибридная явно-неявная схема. Для решения системы линейных уравнений используется итерационный алгоритм LU-SGS (верхне-нижний, симметричный Гаусса-Зейделя). Существует возможность задания краевых условия типа пристеночных функций.

Используются нерегулярные сетки в формате CGNS, которые могут быть как гексаэдрическими, конвертированными из регулярных, так и состоящими преимущественно из тетраэдров с призмами в пограничном слое. Результаты расчета также могут быть конвертированы в формат CGNS. Реализованы параллельные вычисления при помощи MPI. Распределение ячеек по процессорам осуществляется методом рекурсивной координатной бисекции.

Литература

1. Луцкий А.Е., Северин А.В. GridMan3D – библиотека подпрограмм для параллельных вычислений на нерегулярных сетках // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 78.

«Трехмерный код КАБАРЕ для расчета нестационарных задач тепломассопереноса без использования моделей турбулентности и настроечных параметров»

А. П. Соловьев (ИБРАЭ, Москва)

На основе метода КАБАРЕ создан код, позволяющий рассчитывать различные задачи тепломассопереноса. В рамках единого кода существует возможность расчета высокорейнольсовых течений одно- и многокомпонентных сред для несжимаемых жидкостей или идеального газа. Код распараллелен на произвольное число MPI-процессов, межпроцессорные обмены асинхронны и выполняются параллельно с вычислениями. Представлены примеры расчета задач для высокорейнольсовых течений жидкометаллических теплоносителей и течений многокомпонентных сред.

«Комплекс программ «FlowModellium» для моделирования высокоскоростных течений газа на суперЭВМ»

*М.Н. Петров, В.А. Титарев, А.В. Чикиткин, С.В. Утюжников
(МФТИ, г. Долгопрудный, Московская обл.)*

В лаборатории “Математического моделирования нелинейных процессов в газовых средах” Московского физико-технического института ведется разработка комплекса программ "FlowModellium", предназначенного для численного моделирования внешних высокоскоростных течений сжимаемого газа с учетом неравновесных химических реакций. Комплекс программ состоит из сеткопостроителя, модульной программы-решателя уравнений движения сжимаемого газа с учетом различных физических свойств среды и программы визуализации. Использование разрабатываемого вычислительного комплекса позволит создать среду моделирования, включающую все этапы решения прикладных задач: получение геометрической модели объекта, построение расчетной сетки в физическом пространстве, расчет обтекания с использованием суперкомпьютеров, обработка результатов и выдача рекомендаций разработчикам.

В настоящем докладе приводится обзор возможностей аэродинамического решателя FlowModellium, разрабатываемого авторами доклада. Его отличительными особенностями являются поддержка использования блочно-структурированных и гибридных неструктурированных сеток, применение экономичной неявной схемы высокого порядка аппроксимации на таких сетках, двухуровневое MPI+OpenMP распараллеливание для использования на современных суперкомпьютерных системах. Приводятся примеры расчетов

с использованием до 7808 гиперпотоков на системе МВС-10П, установленной в Межведомственном Суперкомпьютерном Центре.

«Пакет EWT-ЦАГИ. Модели турбулентности класса DRSM»

А. И. Трошин (ЦАГИ, г. Жуковский, Московская обл.)

Доклад посвящен вопросам разработки, реализации и применения моделей турбулентности класса DRSM (Differential Reynolds Stress Models – дифференциальные модели для напряжений Рейнольдса) в рамках пакета прикладных программ EWT ЦАГИ (Electronic Wind Tunnel – «Электронная аэродинамическая труба»). В настоящее время эти модели реализованы в ZEUS – экспериментальном солвере в составе EWT-ЦАГИ. Данный солвер предназначен для решения полной системы уравнений Рейнольдса для сжимаемого газа (осреднение по Фавру). Используются явная схема Годунова-Колгана-Родионова 2 порядка аппроксимации по времени и пространству и неявная одношаговая схема 1 порядка аппроксимации по времени и 2 – по пространству. Стационарные задачи решаются с локальным шагом по времени (метод установления), нестационарные – с глобальным либо дуальным шагами по времени. Расчеты ведутся на структурированных многоблочных сетках. Многопоточность реализована с помощью средств MPI. В настоящее время солвер используется на ЭВМ архитектуры Intel 64 с ОС семейства Linux и Windows.

В докладе рассматриваются преимущества моделей класса DRSM перед моделями, основанными на гипотезе Буссинеска, и перечисляются задачи, в которых следует ожидать существенного приближения результатов расчетов к экспериментальным данным. Приводятся формулировки стандартных моделей турбулентности, запрограммированных в солвере (SSG/LRR- ω , Stress- ω). Описывается процесс модификации модели SSG/LRR- ω с целью уточнения описания течений со слоями смещения и струями (перекалибровка коэффициентов модели, разработка дополнительного источникового члена в уравнении для ω и введение поправки на осесимметричность). Кратко рассматриваются вопросы внедрения моделей класса DRSM в имеющиеся в солвере численные методы.

Приводятся результаты расчетов тестовых струйных задач. На примере плоской и круглой дозвуковых затопленных струй показано, что модифицированная модель позволяет смоделировать экспериментальную длину начального участка струи и корректно воспроизвести профиль скорости в слоях смещения. В расчетах начального участка сверхзвуковой недорасширенной круглой струи с регулярным отражением скачков уплотнения (режим NPR = 2.8) показано уточнение как по длине начального участка, так и по положению «бочек». В расчетах круглой струи с нерегулярным отражением скачков уплотнения (NPR = 5.0) продемонстрировано качественное улучшение в описании течения за диском Маха по сравнению с моделями, основанными на гипотезе Буссинеска.

В заключительной части доклада перечисляются направления дальнейших действий по внедрению моделей класса DRSM в практику промышленных расчетов: широкое тестирование моделей, при необходимости – повышение устойчивости численного метода; накопление данных о работе различных моделей и их дальнейшая модификация под отдельные классы задач; оптимизация алгоритмов с целью сокращения затрат памяти и машинного времени.

«Комплекс программ «Труба»

П. А. Хлебцов (ЦНИИМаш, г. Королёв, Московская обл.)

Комплекс программ «Труба», Linux, Fortran

Назначение: вычислительная поддержка экспериментов в АДТ и решение смежных задач по определению АДХ моделей и изделий.

Структура:

- а) Интерфейс в форме текстовых файлов с управляющими параметрами и исходными данными.
 - б) Сеточный генератор декартовых равномерных сеток. Вложенные, блочные, перекрывающиеся, скользящие сетки. Пристеночная область сетки моделируется усеченными призмами.
 - в) Интегратор уравнений динамики твердого тела с шестью степенями свободы.
 - г) Интегратор уравнений аэродинамики вязкого однокомпонентного газа.
 - д) Модуль решения обратной задачи динамики для определения АДХ по экспериментальным измерениям или летным данным.
 - е) Графика — скрипты Python, GNUplot.
- Параллельные вычисления: алгоритмы OpenMP на рабочих станциях.
-