

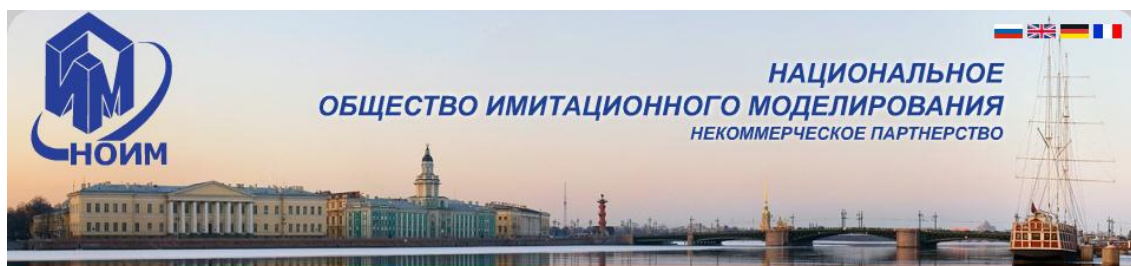
Министерство образования и науки Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
НАЦИОНАЛЬНОЕ ОБЩЕСТВО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 2013

Труды международной научно-технической конференции

3–5 июля 2013 года



Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
НАЦИОНАЛЬНОЕ ОБЩЕСТВО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 2013

*Труды международной научно-технической конференции
3–5 июля 2013 года*

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2013

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-018.2
К63

Компьютерное моделирование 2013 : труды международной научно-технической конференции. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 295 с.

Сборник содержит тексты докладов международной научно-технической конференции Компьютерное моделирование 2013 (КОМОД-2013), проводимой Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом и Национальным обществом имитационного моделирования (НОИМ). Конференция посвящена компьютерному моделированию и исследованию сложных динамических систем. Обсуждаемые темы: теория и практическая реализация сред визуального моделирования сложных динамических систем, математическое обеспечение сред визуального моделирования, компьютерные модели сложных динамических систем, компьютерные инструменты в образовании. В сборник также включены лучшие доклады студентов и аспирантов, участвовавших в конференции.

Материалы докладов печатаются в авторской редакции.

Ответственный за выпуск – председатель оргкомитета конференции,
доктор технических наук, профессор *Ю.Б. Сениченков*

ISBN 978-5-7422-4001-3

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое и численное моделирование

<i>Grebennikov Alexandro</i> Recognition of Discreet Micro Scale Compound Structures by General Ray Method.....	6
<i>Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Захаров А.А.</i> Компьютерное моделирование совместных процессов внешней газовой динамики и внутреннего теплопереноса в конструкциях гиперзвуковых летательных аппаратов с помощью программного комплекса Sigma	12
<i>Карлов И.А.</i> Проблема пропущенных данных при численном моделировании сложных динамических систем	18
<i>Коплярова Н.В., Медведев А.В.</i> О непараметрической идентификации нелинейных динамических процессов	24
<i>Макаров А.</i> Быстродействующий метод численного моделирования динамических систем высокого порядка и его реализация	30
<i>Митрофанов В.А.</i> Расчёт вольт-амперной характеристики вакуумного диода в среде Mathcad методом водяного мешка.....	33
<i>Михайлов Н.Л.</i> Синтез канонических преобразований подобия для линейных нестационарных динамических систем управления.....	36
<i>Новиков Е.А.</i> Метод второго порядка для решения аддитивных жестких задач..	39
<i>Чухманов Н.В., Тарасов В.И., Сырова И.В.</i> Программа InterVal-3D для передачи газодинамических величин с одной произвольной трехмерной расчетной сетки на другую.....	45

Разработка сред визуального моделирования сложных динамических систем

<i>Dmitriev V.M., Zaitchenko T.N., Gandga T.V.</i> Complex systems simulation by means of components circuits method	51
<i>Smirnov V.</i> Yet Another Electrical Circuits Simulator? Yes.....	56
<i>Solonin E.V., Gebel E.S.</i> Review of software products for the simulation of mechanical systems.....	60
<i>Баум Ф.И., Паришков И.А., Петухов В.Н., Тимофеев К.А.</i> Программное обеспечение SIMINTECH для программирования приборов систем управления.....	64
<i>Григорьева М.А., Исламгулова С.Е., Могиленских Д.В., Фролова Н.Л.</i> Методика и программа «ReMesh» интерполяции физических величин на 3D сетках...	70
<i>Романюк Ф.А., Новаш И.В., Румянцев В.Ю., Бобко Н.Н., Устимович В.А.</i> Разработка программных комплексов на базе расчетных фортрановских модулей и систем объектного программирования	76
<i>Паришков И.А., Петухов В.Н., Тимофеев К.А., Ходаковский В.В.</i> Программный комплекс SIMINTECH для моделирования сложных технических систем.....	82
<i>Савоськин А. Н., Болдин Д. И., Телегин М. В., Гарбузов И. И.</i> Программно-аппаратный комплекс реального времени для имитационного моделирования электромагнитных процессов в электрических ж. д. переменного тока.....	88
<i>Чудинов Г.В., Кашиников А.В.</i> Применение методологий быстрой разработки ПО для создания инструментального средства на основе имитационного моделирования в предметно-ориентированной области – программный комплекс	

«Рудопоток».....	94
<i>Шорников Ю.В.</i> Моделирование гибридных систем с неявно заданным режимным поведением в среде ИСМА	100

Применение сред визуального моделирования сложных динамических систем

<i>Ампилова Н., Соловьев И., Шуплецов Ю.</i> Применение методов анализа и классификации изображений в биомедицинских исследованиях.....	106
<i>Глушкова В.Н.</i> Полиномиально вычислимые Σ - спецификации иерархизированных моделей систем реального времени.....	112
<i>Деменкова Т.А., Николаев С.А., Певцов Е.Ф.</i> Программная модель многофункционального блока тестирования.....	118
<i>Козьминых А.В., Марценюк М.А., Склярченко М.С.</i> Идентификация параметров натурной модели плоских колебаний транспортного средства.....	124
<i>Корнеева А.А., Сергеева Н.А., Чжан Е.А.</i> Непараметрическое моделирование многомерных стохастических систем.....	130
<i>Мироненко А.</i> Универсальный подход к заданию движения судна.....	136
<i>Озерский А.И.</i> Компьютерное моделирование гидроприводных систем с тепловыми и электрическими источниками энергии.....	142
<i>Пиминов Р.А., Рыбалкин С.Д., Штых А.К., Сабурова М.И.</i> Использование многоуровневого клеточного автомата в имитационном потоковом моделировании пассажиропотоков.....	149
<i>Пудовиков О.Е., Муров С.А.</i> Моделирование продольных колебаний длинносоставного грузового поезда в режиме пневматического торможения.....	153
<i>Румянцев Ю. В., Новаш И. В.</i> Математическое моделирование трехфазной группы трансформаторов тока с учетом нелинейности сердечников.....	159
<i>Целигоров Н.А., Мафура Г.М.</i> Применение моделирующего комплекса «Устойчивость» для исследования нелинейных импульсных систем управления с неопределённостями.....	163
<i>Чертовской В.Д.</i> Компьютерное моделирование процессов в адаптивной автоматизированной системе управления производством.....	169
<i>Щекатуров А.М., Тимофеев К.А., Паршиков И.А., Петухов В.Н., Ходаковский В.В.</i> Создание комплексной модели динамики реакторной установки с жидкометаллическим теплоносителем с использованием среды разработки SIMINTECH.....	175

Компьютерное моделирование в образовании

<i>Khotich S.L.</i> Automated text-to-picture systems for e-learning.....	183
<i>Ефимушкина Н., Орлов С.</i> Учебный комплекс имитационных моделей для лабораторных работ по дисциплине «ЭВМ и периферийные устройства».....	188
<i>Певцов Е.Ф., Деменкова Т.А., Шнякин А.А.</i> Инструменты моделирования в учебных практикумах по проектированию интегральных схем и микроэлектромеханических систем.....	193
<i>Перченко О.В., Фирсова З.В.</i> Алгоритм автоматической верификации решения задач в графических средах и его реализация	199
<i>Пименов Р.Р.</i> О курсе “Эстетическая геометрия - теория симметрий”.....	205
<i>Ягунова Е. Б., Коровкин Н. В.</i> Гармонические колебания: от школьного курса алгебры к университетскому курсу ТОЭ.....	211

Проекты молодых ученых

<i>Антонова А., Аксенов К.</i> Применение мультиагентного и эволюционного моделирования в проектном управлении	216
<i>Горбунов А.Ю., Ивановский Р.И.</i> Ковариационный анализ расчетных и нерасчетных режимов функционирования ИИС	222
<i>Дергачёв В.Д., Ломаев Ю.С.</i> Аппроксимация оптических спектров поглощения кристаллов с использованием стохастических и регулярных методов оптимизации	228
<i>Екатеринчук Е.Д., Рязанова Т.В.</i> Компьютерное моделирование и анализ стохастической динамики модели Гудвина	233
<i>Зациорский А.С.</i> Препроцессор DROL2TeX – расширение графических возможностей LATEX	239
<i>Иванов И.А., Сонов Е.А.</i> Самоорганизующийся алгоритм решения многокритериальных задач оптимизации на базе коэволюционного генетического алгоритма	244
<i>Ивановский Р.И., Чугреев Д.А.</i> Системное регулирование в электроэнергетических системах (ЭЭС) на основе корректоров	250
<i>Ившин А.В., Лощаков И.И.</i> Лабораторная работа по компьютерному моделированию ослабления гамма-излучения точечного изотропного источника плоскопараллельной защитой	255
<i>Красноперов Я. И., Скляренко М.С.</i> О возможности применения горизонтальных ячеек в оптических методах измерения коэффициента диффузии веществ в жидкостях	260
<i>Куприн А.Г.</i> О непараметрической идентификации и управлении линейными динамическими системами	265
<i>Макеев А.М.</i> Моделирование пространственной структуры геофизической среды по группировкам гипоцентров камчатских землетрясений с использованием формальных критериев	272
<i>Савоськин А.Н., Васильев А.П., Акишин А.А., Лютак Р.Д.</i> Применение пакета MatLab-Simulink для моделирования механических колебаний на программно-аппаратном комплексе реального времени	278
<i>Сергеева Н.А., Цепкова М.В.</i> Непараметрическая идентификация динамических процессов	284
<i>Шишигин Д.</i> Программа расчета заземления и молниезащиты электрических подстанций в AutoCad и ее применение	290

Компьютерное моделирование совместных процессов внешней газовой динамики и внутреннего теплопереноса в конструкциях гиперзвуковых летательных аппаратов с помощью программного комплекса SIGMA

Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Захаров А.А.
Кафедра «Вычислительная математика и математическая физика»
МГТУ имени Н.Э. Баумана
107005 г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5
Россия
dimit.bmstu@gmail.com <http://bmstu.ru/~fn11/>

Аннотация: - Предложен вычислительный метод решения сопряженной задачи аэрогазодинамики и внутреннего теплообмена в конструкциях перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов. Метод основан на итерационном решении 3-х типов самостоятельных задач: задачи газодинамики для идеального газа, задачи динамики вязкого теплопроводного газа в рамках полных динамических уравнений Навье-Стокса для трехмерного пограничного слоя и уравнения теплопроводности для оболочки летательного аппарата. Разработан автоматизированный программный комплекс SIGMA, реализующий полученные алгоритмы, и способный проводить вычисления на высокопроизводительных компьютерах. Представлены результаты моделирования обтекания гиперзвукового летательного аппарата и проведено сравнение результатов по температуре для случая адиабатической стенки и с учетом теплообмена между газом и стенкой, показавшее важность учета теплообмена при проектировании теплозащиты аппарата.

Ключевые слова: - вычислительная газодинамика, аэротермодинамика, теплообмен, гиперзвуковые потоки, теплозащита, геометрическое моделирование, препроцессинг

1 Введение

Исследования в области гиперзвуковой аэродинамики для создания высокоскоростных летательных аппаратов проводятся организациями во всем мире [1-4]. Одним из эффективных инструментов таких исследований является компьютерное моделирование, успех которого определяется не только мощностью доступного оборудования, но и способностью математических методов, алгоритмов и пакетов программ решать сложные сопряженные задачи с учетом как можно больших физических особенностей, с дружественным для пользователя интерфейсом взаимодействия, и с возможностью оптимальной загрузки всех доступных мощностей суперЭВМ. В области гиперзвуковой аэродинамики универсальных численных методов и алгоритмов, способных адекватно решать все возникающие инженерные задачи, пока не существует, и по этой причине продолжают интенсивные работы по разработке новых вычислительных технологий.

В настоящей работе предложен новый алгоритм сопряженного решения задачи аэротермодинамики и внутреннего теплообмена, разработаны автоматизированные программные модули для численной реализации этого алгоритма и проведено их тестирование на модельной конструкции высокоскоростного летательного аппарата. Алгоритм основан на прямом численном моделировании задачи газовой динамики с использованием модели 3-х мерного пограничного слоя [5] и специального численного алгоритма решения уравнения теплопроводности в конструкции летательного аппарата. В предложенном подходе используются конечно-объемные и конечно-разностные схемы высокого порядка точности с малой схемной диффузией [6-8]. Разработанные численные методики обладают свойством геометрического параллелизма, реализованы с использованием кроссплатформенных библиотек и предназначены для выполнения на суперЭВМ.

2 Математическая постановка сопряженной задачи аэротермодинамики и внутреннего теплообмена

Рассмотрим носовую часть конструкции ЛА, обтекаемую гиперзвуковым газовым потоком. Будем рассматривать 3 характерные области: V_1 – область высокоскоростного течения идеального нетеплопроводного газового потока в которой имеет место система уравнений Эйлера (1), V_2 – область пограничного слоя, в котором решаются полные динамические уравнения Навье-Стокса (2) для вязкого теплопроводного газа и V_3 – область, соответствующая стенке конструкции ЛА:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} &= 0, & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} &= 0, \\ \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} + p \mathbf{E}) &= 0, & \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} + p \mathbf{E} - \mathbf{T}_v) &= 0, \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho \varepsilon + p) \mathbf{v}) &= 0, & \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho \varepsilon + p) \mathbf{v} - \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{v} + \mathbf{q}) &= 0, \end{aligned} \quad (1) \quad (2)$$

где ρ – плотность газа, t – время, \mathbf{v} – вектор скорости, p – давление, \mathbf{E} – метрический тензор, ε – плотность полной энергии газа, θ – температура газа.

К этой системе добавляются соотношения для совершенного газа, тензора вязких напряжений и вектора теплового потока:

$$p = \rho \frac{R_0}{\mu} \theta, \quad \varepsilon = c_v \theta + \frac{|\mathbf{v}|^2}{2}, \quad \mathbf{T}_v = \mu_1 (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{E} + \mu_2 (\nabla \otimes \mathbf{v} + \nabla \otimes \mathbf{v}^T), \quad \mathbf{q} = -\lambda \nabla \theta,$$

где μ_1 и μ_2 – коэффициенты вязкости, λ – коэффициент теплопроводности газа. Газ предполагается вязко-несжимаемым (объемно невязким), поэтому $\mu_1 = -(2/3)\mu_2$.

На внешней поверхности пограничного слоя, являющейся границей раздела движения идеального и вязкого потоков, формулируются следующие условия непрерывности:

$$[\rho] = 0, \quad [\mathbf{v}] = 0, \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_v \cdot \boldsymbol{\tau}_l = 0, \quad [\theta] = 0. \quad (3)$$

Здесь [] – скачок функций на внешней поверхности пограничного слоя.

В области V_3 стенки ЛА рассматривается уравнение теплопроводности:

$$\rho_s c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_s \Delta \theta, \quad (4)$$

где λ_s – коэффициент теплопроводности в твердом теле, ρ_s – плотность материала, c_s – удельная теплоёмкость, Δ – оператор Лапласа.

Граничные условия на твердой стенке, являющейся поверхностью раздела газовой и твердой областей, имеют следующий вид:

$$\lambda_s \nabla \theta_s \cdot \mathbf{n} = \lambda \nabla \theta_g \cdot \mathbf{n} + \varepsilon_g \sigma \theta_e^4 - \varepsilon_s \sigma \theta_w^4, \quad [\theta] = 0, \quad (5)$$

где θ_w – температура твердой стенки (совпадает с температурой газа на этой стенке), θ_e – температура внешней поверхности пограничного слоя, $\nabla \theta_s$ – градиент температуры на твердой стенке со стороны конструкции, $\nabla \theta_g$ – градиент температуры со стороны пограничного слоя газа, ε_g и ε_s – интегральные коэффициенты излучения нагретого газа и твердой поверхности, σ – коэффициент Стефана-Больцмана.

Физико-химические превращения материала стенки (унос, плавление, термодеструкция) не учитываются.

На внутренней поверхности конструкции ЛА ставится условие теплоизоляции:

$$\nabla \theta \cdot \mathbf{n} = 0. \quad (6)$$

Начальное условие для уравнения (4) имеет вид:

$$t = 0: \quad \theta = \theta_0.$$

3 Разработка метода решения сопряженной задачи

Для решения сформулированной выше сопряженной задачи предложен следующий метод: вводится цикл по «медленному» времени $\bar{t} = t/t_0$, соответствующему процессу распространения тепла в стенке конструкции, где t_0 - характерное время нагрева конструкции. Внутри этого цикла вводится «быстрое» время $\tau = t/t_y$, где t_y - характерное время установления газового потока. Для каждого фиксированного момента медленного времени \bar{t}_i тепловой поток на твердой стенке $q_s = \lambda_s \nabla \theta_s \cdot \mathbf{n}$, вообще говоря, неизвестный, полагается фиксированным, тогда для граничных условий на твердой стенке (5) рассматривается только первое:

$$\lambda \nabla \theta_g \cdot \mathbf{n} = q_s + \varepsilon_s \sigma \theta_w^4 - \varepsilon_g \sigma \theta_e^4 \quad (8)$$

и системы уравнений газодинамики (1) и (2) отделяются от уравнения теплопроводности (4) на одном шаге медленного времени.

Согласно модели 3-х мерного пограничного слоя [5], уравнения идеального газа (1) и вязкого газа (2) также разделяются. Решение уравнений (1) ищется во всей области V_1+V_2 течения газового потока с граничным условием проскальзывания $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0$ на твердой стенке. Далее осуществляется решение системы уравнений (2) в области V_2 по быстрому времени до установления с условиями на твердой стенке: $\mathbf{v} = 0$ и (8). После этого осуществляется переход к следующему моменту \bar{t}_{n+1} медленного времени.

Для решения систем дифференциальных уравнений (1)-(2) используются численные конечно-разностные методы Мак-Кормака и TVD второго порядка аппроксимации [6-8], а также конечно-объемный метод RKDG [9]. Метод Мак-Кормака является самым простым и быстрым, но обладает самой большой схемной диффузией; схема TVD требует больших затрат машинного времени, обладает малой схемной диффузией, но весьма чувствительна к качеству сетки; метод RKDG обладает всеми преимуществами TVD-схемы, позволяет вести расчет и на негладких сетках, но является самым медленным.

Тепловой поток $q_{s,n+1}$ на твердой стенке на очередном (n+1)-временном шаге рассчитывается с помощью специального метода, предложенного в [10]. Согласно этому методу, сначала ищется численное решение уравнения теплопроводности (4) только для главных членов теплового потока $\nabla \theta_s \cdot \mathbf{n}$ в направлении по нормали к нагреваемой поверхности (тепловыми потоками в касательной плоскости $\nabla \theta \cdot \boldsymbol{\tau}_l$ пренебрегаем), и только со вторым граничным условием (5) (с заданной температурой поверхности). Тогда после обезразмеривания уравнение теплопроводности (4) с начальными и граничными условиями (5)-(7) принимает вид:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} = \text{Fo} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2}, \quad 0 < \bar{x} < 1, \quad \bar{x} = 0: \bar{\theta} = \bar{\theta}_w, \quad \bar{x} = 1: \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}} = 0, \quad \bar{t} = 0: \bar{\theta} = 1, \quad (9)$$

где $\text{Fo} = \frac{\lambda_s t_0}{\rho_s c_s H}$ - параметр Фурье, H - толщина оболочки, $\bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_0}$, $\bar{\theta}_w = \frac{\theta_w}{\theta_0}$ - безразмерные

температуры, $\bar{x} = \frac{x}{H}$ - безразмерная координата по толщине оболочки.

Для решения одномерной задачи теплопроводности (9) используется пошаговый метод с неявной разностной схемой:

$$\frac{\bar{\theta}_k^{n+1} - \bar{\theta}_k^n}{\Delta \bar{t}} = \text{Fo} \frac{\bar{\theta}_{k+1}^{n+1} - 2\bar{\theta}_k^{n+1} + \bar{\theta}_{k-1}^{n+1}}{\bar{h}^2}, \quad (15)$$

$$\bar{\theta}_0^n = \bar{\theta}_w, \quad \bar{\theta}_M^n = \bar{\theta}_{M-1}^n,$$

где $M+1$ - количество расчетных узлов по толщине оболочки. Полученная из (15) система алгебраических уравнений решается методом прогонки.

4 Описание разработанного программного комплекса

Разработанные программные модули вошли в состав программно-вычислительного комплекса SIGMA [12], который предназначен для моделирования сверхзвуковых и гиперзвуковых газовых потоков в областях сложной криволинейной формы, с учетом комбинированного (внутреннего и внешнего) течения. SIGMA позволяет вести расчет с заранее неизвестной формой ударных волн и условиями на скачках, исследовать нестационарные неуставливающиеся режимы. Программный комплекс включает в себя модули трехмерного геометрического моделирования, позволяющего генерировать достаточно широкий диапазон трехмерных геометрических областей, модуль задания свойств, параметров и начальных данных, генератор адаптивной сетки (препроцессор), расчетный модуль (процессор) и визуализатор расчетов (постпроцессор). Каждый модуль является независимым программным продуктом, реализованным с помощью объектно-ориентированного подхода, и поддерживает возможность создания расширений. Большинство итерационных процедур генерации сеток и расчетного модуля реализованы с использованием библиотеки OpenMP 2.0 и могут выполняться на кластере или многоядерном компьютере с общей памятью.

Модуль препроцессора имеет графический интерфейс, позволяющий визуально создавать расчетную область. Область строится из набора исходных гексаэдральных блоков (примитивов) путем их составления и последующего деформирования. Деформирование осуществляется с помощью изменения координат опорных точек геометрии путем их ввода или считывания из файла. Опорные точки геометрии расположены на граничных поверхностях примитивов, образуют поверхностную регулярную сетку узлов, и являются основой для построения линейных или кубических сплайнов поверхностей. Существует возможность генерации криволинейных блоков на основе геометрии поверхностей, импортируемых из программ твердотельного моделирования в формате STL (рис.1). В этом случае, для построения регулярной сетки опорных точек на импортированной поверхности, реализованы функции генерации точек в заданных сечениях геометрии и вдоль линий между двумя заданными на поверхности точками.

С каждым блоком связан определенный набор характеристик: тип начального условия в области блока, типы граничных условий, габариты блока в адаптивных и физических координатах. На основании данных характеристик генератор сетки проводит распределение сеточных линий и заполняет соответствующие параметры в узлах сетки (рис.2).

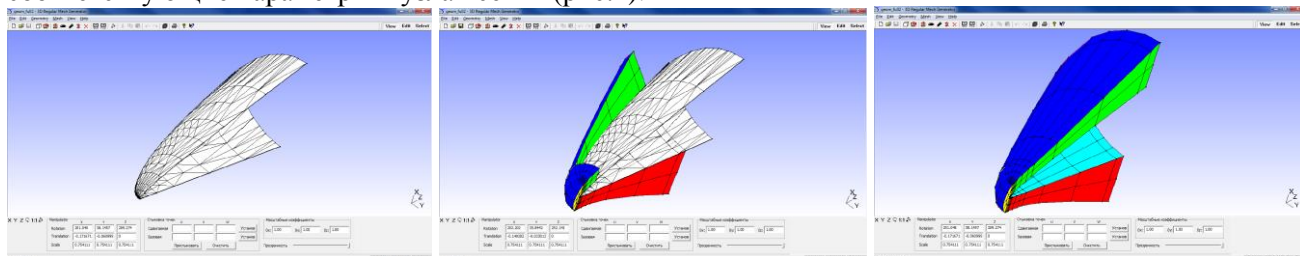


Рис.1. Построение области внешнего обтекания модельного перспективного гиперзвукового летательного аппарата: загруженная STL-геометрия поверхности (слева); автоматизированное построение криволинейных блоков (в центре); вид полученной расчетной области (справа).

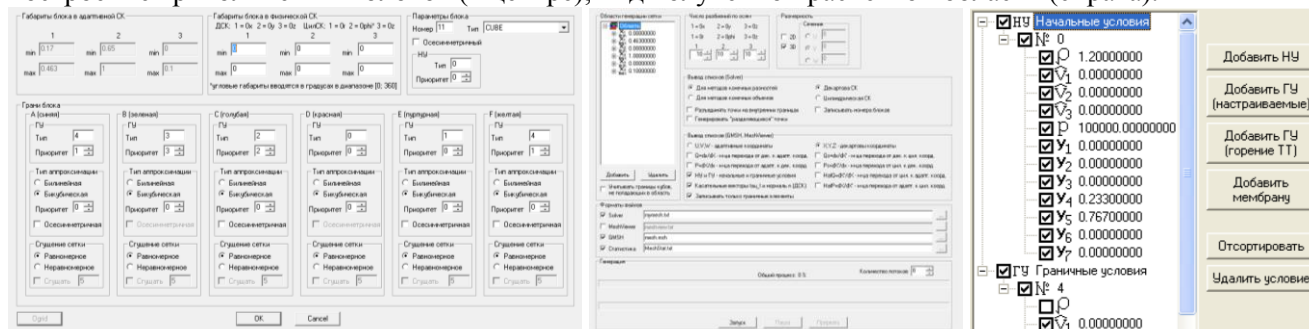


Рис.2. Графические интерфейсы для настройки параметров криволинейного блока (слева), параметров генерации сетки (в центре), ввода начальных значений физических переменных (справа).

Расчетный модуль поддерживает возможность ведения расчета до определенного момента времени, сохранения результатов расчёта через заданные интервалы времени и возобновления расчета с

сохраненного состояния. Вывод результатов может производиться целиком для всей расчетной области, а также в отдельных сечениях и точках.

5 Результаты численного решения

На рис.3-6 представлены результаты численного моделирования обтекания фрагмента корпуса модельного летательного аппарата гиперзвуковым потоком газа ($M=6$) на высоте 15км в области V_1+V_2 . Полученное численное решение с хорошим разрешением передает головной скачок уплотнения в критической точке летательного аппарата, максимум плотности, давления и температуры приходится на критическую точку носка аппарата, в которой температура достигает 2000К. На рис.4-5 показано сравнение температуры при адиабатической стенке и с учетом теплообмена между газовой средой и оболочкой в момент времени 50 секунд после начала расчета. Во втором случае температура в среднем по поверхности тела получается на 25% ниже, чем в первом, что свидетельствует о важности учета теплообмена для оценки предельных режимов работы аппарата и выбора материалов теплозащиты аппарата.

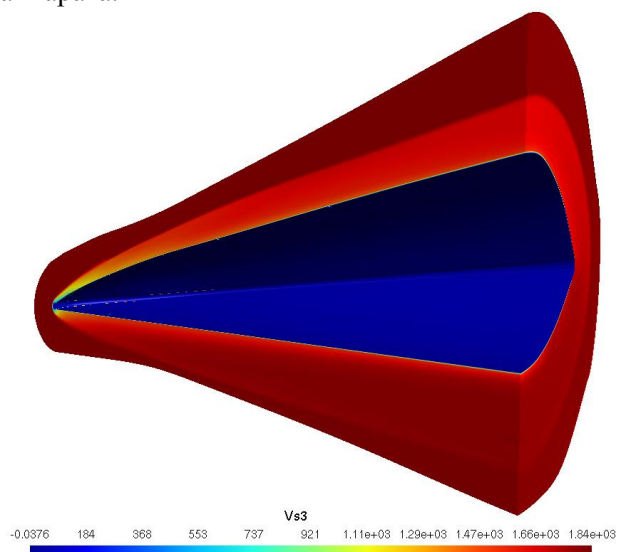


Рис.3. Распределение продольной компоненты скорости (м/с) газового потока в окрестности поверхности ГЛА

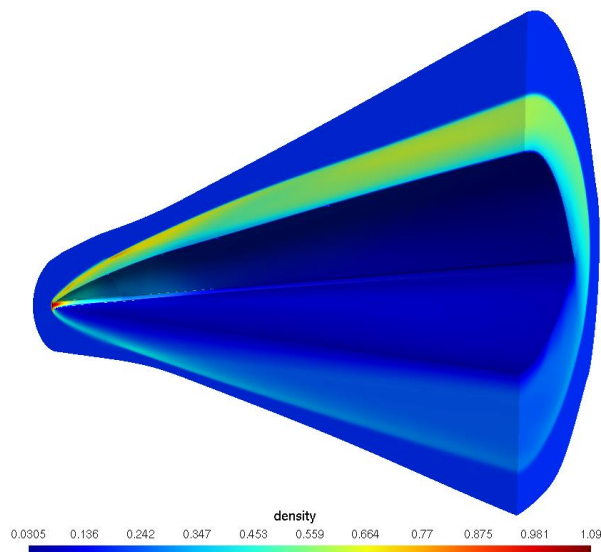


Рис.4. Распределение плотности (кг/м^3) газового потока в окрестности поверхности ГЛА

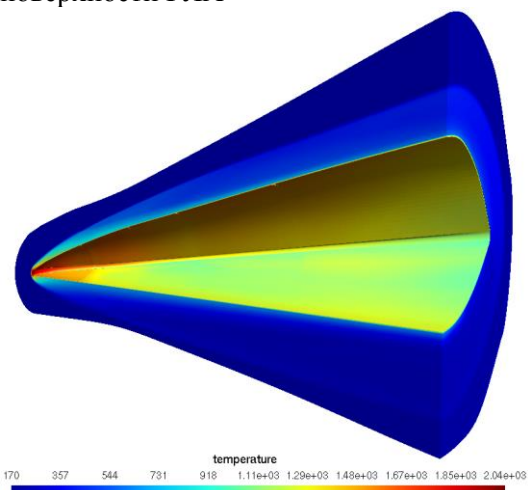


Рис.5. Распределение температуры (К) газового потока в окрестности поверхности ГЛА, для адиабатической стенки

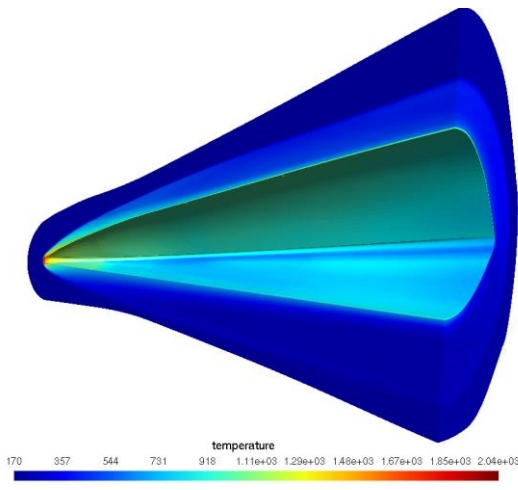


Рис.6. Распределение температуры (К) газового потока в окрестности поверхности ГЛА для стенки с учетом теплообмена

6 Выводы

Разработан вычислительный метод для решения сопряженной задачи аэрогазодинамики и внутреннего теплообмена в конструкции летательного аппарата. Программный комплекс SIGMA, написанный на базе этого метода, позволяет в полуавтоматизированном режиме генерировать регулярные адаптивные сетки для областей сложной формы с криволинейными границами, с хорошим качеством моделировать переходные процессы и процессы установления, гиперзвуковые течения с большими градиентами. Алгоритмы SIGMA обладают геометрическим параллелизмом и адаптированы для использования на суперкомпьютерах. С помощью SIGMA проведено численное моделирование обтекания фрагмента носовой части перспективного гиперзвукового летательного аппарата. Показано, что учет теплообмена позволяет более точно определять температуру на поверхности тела.

Исследования выполнены при частичной поддержке грантов Президента РФ МК-3150.2012.8 и МК-3218.2013.8. Результаты моделирования были получены с использованием суперкомпьютера СКИФ МГУ «Чебышев».

Литература:

- [1] NASA's X-43A. URL: <http://www.nasa.gov/missions/research/x43-main.html> (дата обращения 09.10.2012)
- [2] Boeing Completes Successful Boost Test of HyFly Hypersonic Demonstrator, Boeing Press Release, 17 October 2005. URL: http://www.boeing.com/news/releases/2005/q4/nr_051017a.html (дата обращения 09.10.2012)
- [3] Boeing: X-51 WaveRider. URL: <http://www.boeing.com/defense-space/military/waverider/index.html> (дата обращения 09.10.2012)
- [4] Гирский Г.А. *Гиперзвуковая аэродинамика и теплообмен спускаемых аппаратов и планетных зондов*. М.: Физматлит, 2011. 548 с.
- [5] Димитриенко Ю.И., Захаров А.А., Коряков М.Н. Модель трехмерного пограничного слоя и ее численный анализ. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки*. 2011. Специальный выпуск "Математическое моделирование". С. 136-149.
- [6] Гильманов А.Н. *Методы адаптивных сеток в задачах газовой динамики*. М.: Физматлит, 2000. 248 с.
- [7] Harten A. High Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws. *J.Comp.Phys.* Vol. 49. 1983, pp. 357-393.
- [8] Димитриенко Ю.И., Котенев В.П., Захаров А.А. *Метод ленточных адаптивных сеток для численного моделирования в газовой динамике*. М.: Физматлит, 2011. 286 с.
- [9] Cockburn B., Shu C.-W. Runge–Kutta Discontinuous Galerkin Methods for Convection-Dominated Problems. *Journal of Scientific Computing*. Vol. 16. № 3. 2001, pp. 173–261.
- [10] Dimitrienko Yu.I., Efremov G.A., Chernyavsky S.A. Optimal Designing of Erosion-Stable Heat-Shield Composite Materials. *Int. Journal of Appl. Comp. Mat.* Vol. 4. № 1. 1997, pp. 35–52.
- [11] Развитие метода ленточно-адаптивных сеток на основе схем TVD для решения задач газовой динамики / Ю.И. Димитриенко [и др.]. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки*. 2011. № 2. С. 87-97.
- [12] Яненко Н.Н. *Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики*. Новосибирск: Наука, сиб. отд-ие, 1967. 197 с.
- [13] Димитриенко Ю.И., Захаров А.А., Коряков М.Н. Разработка программного обеспечения для численного моделирования в задачах гиперзвуковой аэрогазодинамики перспективных летательных аппаратов. *Статьи, принятые на конференцию «Развитие суперкомпьютерных и грид-технологий в России» в рамках МСКФ-2011*. URL: <http://www.hpc-platform.ru/tiki-index.php?page=MSCF> (дата обращения 10.10.2012)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 2013

Труды международной научно-технической конференции

3–5 июля 2013 года

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93,
г. 2, 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 14.06.2013. Формат 60×84 / 16.

Усл. печ. л. 18,5. Тираж 30 экз. Заказ № 16.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного ответственным редактором,
в центре оперативной полиграфии ИИТУ СПбПУ.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 21.