МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД И НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ (27–29 ноября 2013 г.)

III Всероссийская молодёжная научная конференция

Под редакцией М.Ю. Орлова

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2014

ЛИТЕРАТУРА

1. *Патанкар С.В.* Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М.: МЭИ, 2003.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИОДНОМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ И СОПЛЕ РДТТ

Д.А. Ворожейкина, Ю.Г. Трофимова

В работе представлены алгоритм и методика расчета квазиодномерного течения продуктов сгорания в камере сгорания и сопловом блоке РДТТ с учетом газоприхода с поверхности горения. Для численной реализации используется схема Годунова. Методика расчета реализована в виде программного комплекса, который предусматривает возможность задания исходных данных в интерактивном режиме, сохранять и визуализировать результаты расчетов.

MATHEMATICAL MODELING OF QUASI-ONE-DIMENSIONAL FLOW IN A COMBUSTION CHAMBER AND A NOZZLE OF A ROCKET SOLID MOTOR

D.A. Vorozheykina, Yu.G. Trofimova

The paper is presented the algorithm and the method of calculation of the quasi-one-dimensional flow of combustion products in the combustion chamber and the nozzle of a rocket solid motor including gas coming off the burning surface. For numerical implementation scheme Godunov is used. Method of calculation is implemented as a software package, which provides the possibility of initial data interactively, save, and visualize the results of calculations.

Газовая динамика ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) характеризуется разнообразием физических явлений, взаимовлиянием различных процессов. Течение продуктов сгорания смесевого твердого топлива (СТТ) по газодинамическому тракту представляет собой совокупность сложных физических процессов, для описания которых используются различные математические модели. Одной из главных задач моделирования процессов протекающих в РДТТ является расчет параметров течения продуктов сгорания в газодинамическом тракте для определения энерго-тяговых характеристик двигателя. С этой целью используются модели различного уровня сложности. В полной постановке необходимо рассматривать трехмерное вязкое двухфазное смешанное течение, сопряженное с тепломассообменом [1]. Однако такая задача в настоящее является практически неразрешимой, поэтому для решения различных практических задач используются более простые постановки, обеспечивающие необходимую точность. При этом сложные математические модели, в том числе пространственные, используются на завершающем этапе моделирования. На начальном этапе проектирования двигателя используются упрощенные квазиодномерные постановки [1].

В связи с этим возникает необходимость в разработке программного комплекса, позволяющего на основе упрощенных моделей рассчитывать локальные и интегральные характеристики РДТТ.

В данной работе предлагается алгоритм и методика расчета газодинамических параметров квазиодномерного смешанного течения продуктов сгорания в газодинамическом тракте ракетного двигателя, включающего в себя камеру сгорания и сопловой блок.

Расчет параметров течения предполагает принятие ряда упрощений, а именно: при нахождении газодинамических параметров в камере сгорания течение продуктов сгорания ТРТ в канале заряда рассматривается в гидродинамической постановке, а давление,

плотность, температура и скорость течения газового потока равномерно распределены по поперечному сечению канала заряда [1].

Для расчета параметров продуктов сгорания в камере сгорания и сопловом блоке рассматривается квазиодномерное равновесное нестационарное течение продуктов сгорания вдоль газодинамического тракта. Газ является идеальным [2]. С учетом этих допущений система уравнений, описывающая течение идеального газа в газодинамическом тракте, записанная в форме законов сохранения массы, количества движения, энергии и закона горения ТРТ, имеет вид [3]:

$$\begin{gathered}\frac{\partial}{\partial t}(\rho F)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u F)=\rho_T v h,\\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u F)+\frac{\partial}{\partial x}\left(F\rho u^2+Fp\right)=p\frac{dF}{dx},\\ \frac{\partial}{\partial t}\left(\rho F\left(E+\frac{u^2}{2}\right)\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(uF\rho\left(E+\frac{u^2}{2}+\frac{p}{\rho}\right)\right)=\rho_T v h H,\\ \frac{\partial F}{\partial t}=vh,\end{gathered} \tag{1}$$

где ρ – плотность газового потока продуктов сгорания; F– площадь текущего сечения газодинамического тракта; u – скорость продуктов сгорания в произвольной точке, осредненная по поперечному сечению канала; p – давление в произвольной точке потока; E – внутренняя энергия газа; ρ_T – плотность топлива; v – линейная скорость горения топлива; h – периметр поперечного сечения канала заряда; H – полная энтальпия.

При расчете параметров течения продуктов сгорания в сопловом блоке в системе уравнений (1) отсутствуют слагаемые, отвечающие за поступление газа с поверхности горящего заряда ТРТ (линейная скорость горения топлива принимается равной нулю).

Система уравнений для расчета течения продуктов сгорания в газодинамическом тракте замыкается уравнением состояния идеального газа:

$$p=\rho RT,$$

где R – газовая постоянная; T – температура продуктов сгорания.

Для полноты решения поставленной задачи необходима постановка начальных и граничных условий, а так же их согласование с целью обеспечения совместимости решения. Для решения системы уравнений (1) в камере сгорания в качестве граничных условий задаются условия непротекания на переднем днище камеры сгорания (скорость газового потока равна нулю) и значение скорости течения продуктов сгорания в минимальном сечении сопла. В качестве начальных условий для расчета течения в сопловом блоке принимаются параметры, полученные в результате решения системы (1) в камере сгорания и взятые в выбранном сечении дозвуковой части газодинамического тракта [1].

Для численного решения уравнений, описывающих течение продуктов сгорания в газодинамическом тракте, используется метод Годунова [4], представляющий собой явную разностную схему первого порядка. Этот метод является одним из методов сквозного счета и часто используется в задачах механики сплошных сред. Он зарекомендовал себя как весьма эффективный при расчете течений, в которых воз-

никают поверхности сильного разрыва [5]. При построении разностной схемы метода Годунова уравнения газовой динамики записываются в интегральной форме [4]. Обобщенные решения такой системы представляют собой обобщения классических решений дифференциальных уравнений (1) и входят в класс кусочно-непрерывных и кусочно-гладких функций, для которых интегральные уравнения (по контуру) справедливы при произвольном кусочно-гладком контуре Г, охватывающем рассматриваемую область [6]. Параметры, характеризующие течение газового потока, представляют собой сложное распределение плотности массы, импульса и полной энергии вдоль газодинамического тракта. Для применения разностной схемы Годунова производят осреднение этих величин в каждой ячейке расчетной сетки. Определение решения в этом случае сводится к решению серии автомодельных задач о распаде произвольного разрыва [4].

Описанный алгоритм реализуется в виде программного комплекса «Space Solution» на языке C++ с использованием программной платформы NET Framework 4.0. Планируется проведение численного исследования поставленной задачи и тестовых расчетов. Верификация программного комплекса будет проводиться путем сравнения с известными решениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Газодинамические* и теплофизические процессы а ракетных двигателях твердого топлива / А.М. Губертов [и др.]; под ред. А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2004. 511 с.

2. *Стернин Л.Е.* Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974. 212 с.

3. *Газовая* динамика двухфазных течений в соплах / И.М. Васенин, В.А. Архипов, В.Г. Бутов, А.А. Глазунов, В.Ф. Трофимов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986. 264 с.

4. *Численное* решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, [и др.]; под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.

5. *Пирумов У.Г.* Численные методы. М.: Дрофа, 2003. 224 с.

6. *Киреев В.И., Войновский А.С.* Численное моделирование газодинамических течений. М.: Изд-во МАИ, 1991. 254 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОБЪЕМОВ ЖИДКОСТИ (VOLUME OF FLUID METHOD)

А.В. Десятник, М.А. Пономарева, В.А. Якутенок

Рассматривается моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью методом VOF. Проводится сравнение полученных результатов с данными других авторов и результатами моделирования при помощи метода граничных элементов и пакета прикладных программ OpenFOAM для ряда задач: о течении в прямоугольной каверне, о растекании капли по твердой стенке, об истечении жидкости из вертикального канала.

SIMULATION OF VISCOUS FLUID FLOWS WITH FREE SURFACE USING VOLUME OF FLUID METHOD

A.V. Desyatnik, M.A. Ponomareva, V.A. Yakutenok

Simulation of viscous incompressible fluid with free surface by VOF method is considered. Obtained results are compared with results of other authors and results of simulation using boundary element method and OpenFOAM software package applied to several problems: flow in rectangular cavity, drop spreading over a solid surface, fluid outflow from a vertical channel.

Основной сложностью моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью является наличие меняющейся во времени области