

И. А. Миклашевич, Е. А. Белогузов, Я. И. Шукевич

РЕШЕНИЕ СВЯЗАННОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МИКРОСПУТНИКОВ

Рассмотрена задача прогнозирования технических и эксплуатационных характеристик двигательной установки микроспутника, созданной по микроэлектронной технологии. Решена связанная термомеханическая задача гидродинамики с помощью пакета ANSYS CFX. Осуществлена оптимизация конструкции микродвигателя, проанализирован прогрев его корпуса за время работы топливной камеры, определено распределение поля скоростей в сопле микродвигателя. Найдены значения полей механических и температурных деформаций для чистого кремния и композита кремний-SiO₂, показана принципиальная возможность работы рассматриваемого устройства. Расчет производился на треугольной сетке.

Ключевые слова: численный расчет, течение газа, микродвигатель, реактивное сопло.

Введение. Универсальный конечноэлементный газодинамический пакет ANSYS CFX представляет разработчикам гибкие и эффективные алгоритмы для численного моделирования газодинамических и теплофизических процессов. Во многом это предопределяется тем обстоятельством, что использование неструктурированных конечноэлементных сеток позволяет рассматривать газодинамику и теплообмен в многомерных областях произвольной геометрии. Указанный пакет может применяться для расчета аэрогазодинамики реактивных сопел, являющейся составной и неотъемлемой частью газовой динамики течений в каналах, теории авиационных и ракетных двигателей, аэродинамики летательных аппаратов [1].

Следует отметить, что течение газа в реактивных соплах в общем случае достаточно сложное (трехмерное, пульсирующее, турбулентное, с высокой температурой, со скачками уплотнения, с возможными отрывными зонами и т. д.). Для такого течения решение основных уравнений движения возможно только в численном виде, что требует значительных затрат времени и больших объемов оперативной памяти рабочей станции или кластера. В большинстве случаев это приводит к необходимости использования упрощенных или идеализированных схем (моделей) течения, облегчающих описание движения газа и проведение численных расчетов. При этом весьма важно представить или оценить, насколько эти модели адекватно отражают реальные процессы, происходящие при течении газа, например, в реактивных соплах, а использование их требует в каждом рассматриваемом случае специального тщательного анализа и экспериментального подтверждения. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что в ряде случаев даже простые модели течения позволяют описать в целом адекватно явления, происходящие в реактивных соплах [2].

Постановка задачи. Рассматриваются поля температуры и напряженно-деформированное состояние блока миниатюрных реактивных двигателей, созданных из кремния по МСТ технологии. Блок представляет собой модульную конструкцию, собранную из идентичных реактивных двигателей. Число ячеек (отдельных двигателей) в блоке может различаться в зависимости от технического задания. Каждая ячейка технологически собирается из двух одинаковых половин. Расчетная область представляет собой канал призматической формы с различными резкими переходами, в том числе и с внезапным сужением. Данная форма отражает особенности технологии производства и является далекой от газодинамически идеальной.

На рис. 1 представлена геометрическая форма сопла микродвигателя. Конструктивно сопло изготавливается из двух идентичных частей, соединенных по горизонтальной поверхности специальными методами в единую деталь. Длина сопла составляет 50 мм, ширина — 4 мм, длина цилиндрической части — 15 мм. Конечноэлементное разбиение осуществлялось тетраэдрами, общее число элементов было принято равным 4 млн, размер стороны тетраэдра составлял примерно $2 \cdot 10^{-5}$ м. Проводился тестовый расчет для 6 млн элементов. Полученные результаты отличались незначительно, что позволяет принять число конечных элементов, равное 4 млн, как оптимальное для нашей задачи, так как использование более мелких сеток не вносит большого вклада в точность получаемых результатов, но приводит к значительному увеличению времени расчета.

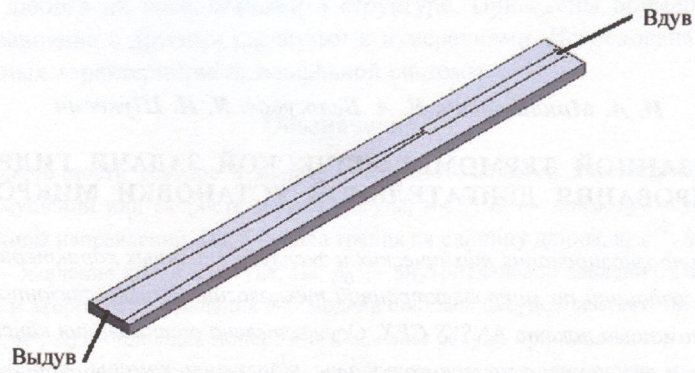


Рис. 1. Геометрическая форма сопла микродвигателя (разрез по поверхности соединения)

Решалась задача определения временной зависимости поля температур корпуса микродвигателя (одной ячейки двигательной установки микроспутника) и поля скоростей газа вдоль длины его сопла. Данный процесс описывается стандартным уравнением баланса энергии и уравнением теплообмена с окружающей средой:

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla (\rho U h_{tot}) = \nabla (\lambda \nabla T) + \nabla (U \tau) + US_{im} + S_h, \quad (1)$$

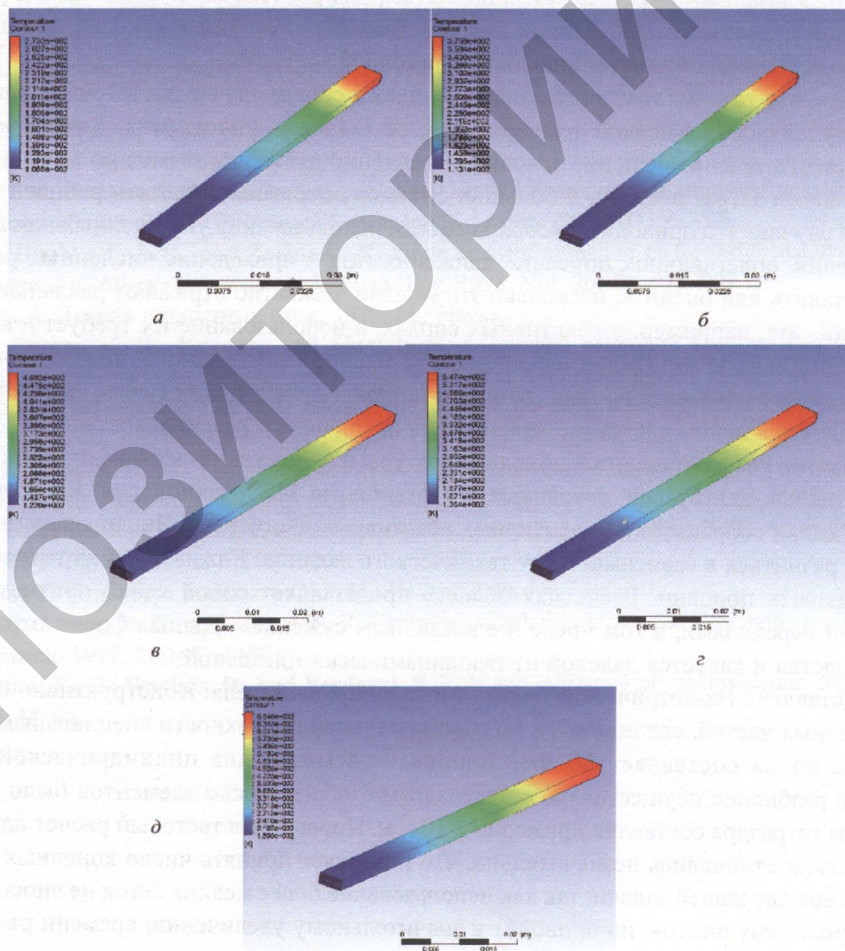


Рис. 2. Распределение температур по поверхности корпуса микродвигателя в зависимости от времени прохождения через него газа: а — 1 с; б — 2; в — 3; г — 4; д — 5

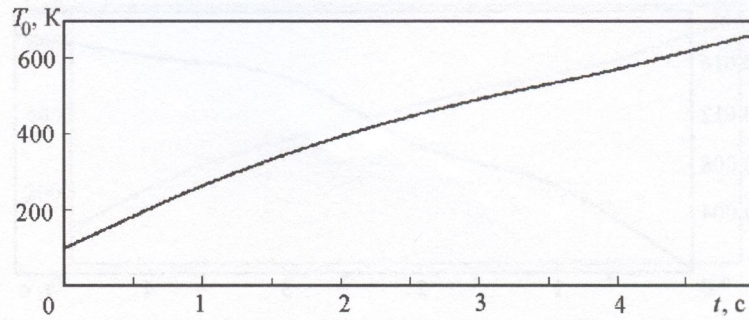


Рис. 3. Зависимость прогрева корпуса микродвигателя от времени

$$-\mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla T_b) = q_0 + h(T_{\text{out}} - T_b) + \varepsilon \sigma (T_{\text{amb}}^4 - T_b^4), \quad (2)$$

где h_{tot} — общая энтальпия, которая связана со статической энтальпией $h(T, p)$ соотношением $h_{\text{tot}} = h + 1/2 U^2$. Членом US_{im} , который описывает работу внешнего импульса, в существующих реализациях программного продукта пренебрегают.

Для упрощения задачи теплопередача в окружающую среду (тело соседних ячеек сборки) моделировалась с использованием коэффициента теплообмена на границе величиной $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, радиационный теплообмен учитывался путем введения коэффициента черноты, равного 0.7 . Внутренняя вязкость газа определялась коэффициентом, равным $18.8 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Полученные распределения температур по корпусу микродвигателя в зависимости от времени представлены на рис. 2.

На рис. 3 приведена зависимость максимальной температуры корпуса микродвигателя от времени. Как видно из этого графика, корпус микродвигателя прогревается равномерно в течение всего времени его работы.

Турбулентность газового потока в сопле определялась с использованием стандартной модели $k-\varepsilon$. Эта модель включает два транспортных дифференциальных уравнения для расчета кинетической энергии k и турбулентной диссипации ε . Она позволяет получить стабильные результаты, не требует значительных вычислительных ресурсов и долгое время использовалась в качестве промышленного стандарта. Указанная модель хорошо зарекомендовала себя при расчете внутренних течений, но создает проблемы при расчете потоков с большими градиентами давлений и отрывом и дает начало отрыва с большой задержкой и заниженные размеры отрывных течений [3].

Использование модели $k-\varepsilon$ предполагает решение двух дополнительных уравнений для турбулентной кинетической энергии и скорости диссипации:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k + P_k - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

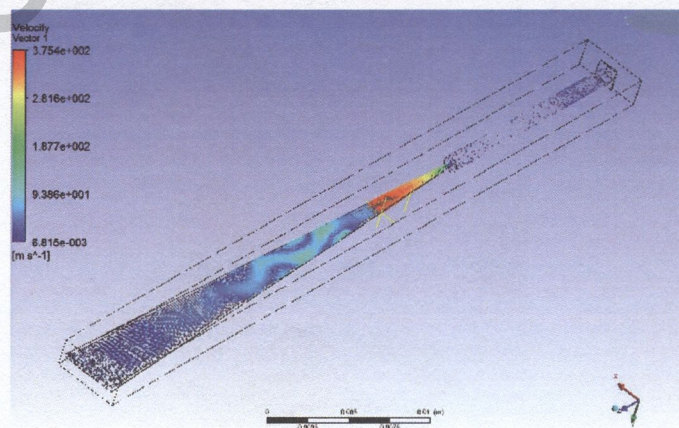


Рис. 4. Распределение поля скоростей газа в сопле

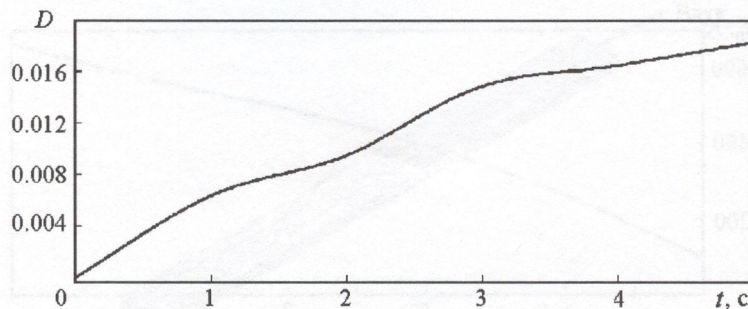


Рис. 5. Зависимость термомеханической деформации корпуса микродвигателя от времени

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla (\rho U \epsilon) = \nabla \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon + P_k - \frac{\epsilon}{k} (c_{\epsilon 1} P_k - c_{\epsilon 2} \rho \epsilon). \quad (4)$$

Здесь генерация диссипации [3] состоит из трех слагаемых, первые два из которых определяют генерацию диссипации из-за турбулентного перемешивания в осредненном движении, а последний — в пульсационном движении. Член $\rho \epsilon$ называется диссипативным и определяет диссипацию диссипации турбулентности [3].

Строго говоря, все члены в правой части уравнений (3), (4) требуют специального моделирования, поскольку система этих уравнений в любом сочетании с уравнениями для характеристик турбулентности не является замкнутой. Такое моделирование может быть осуществлено прямым численным расчетом (например, DNS), однако такой расчет требует значительных ресурсов и применяется в исключительных случаях. Поэтому мы использовали общепринятые значения параметров при решении рассматриваемой задачи [4]. С использованием

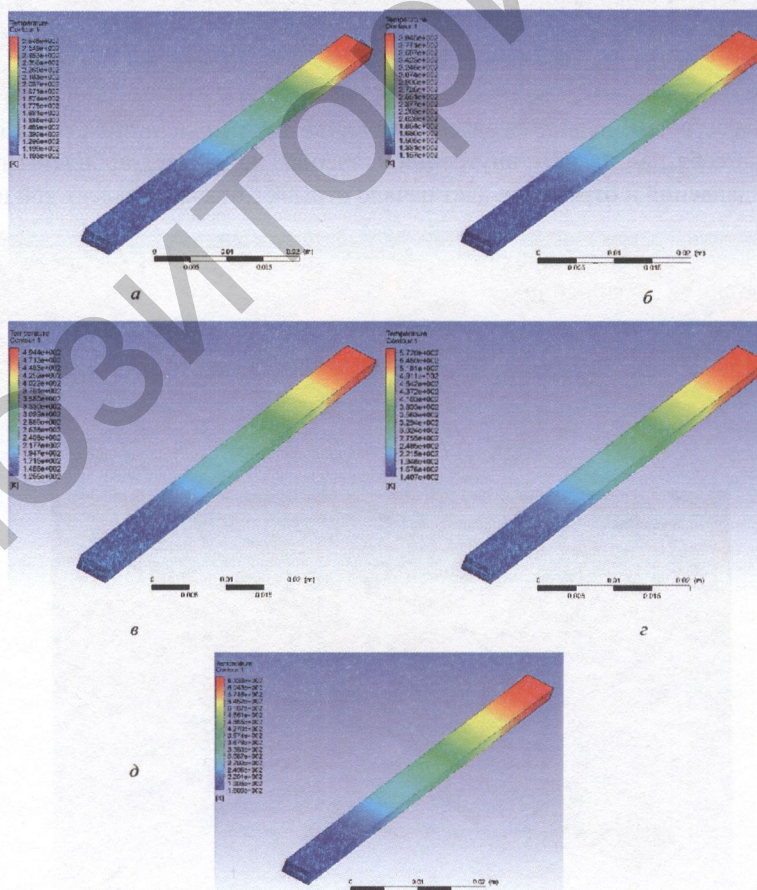


Рис. 6. Распределение температур по поверхности корпуса микродвигателя в зависимости от времени работы топливной камеры: а — 1 с; б — 2; в — 3; г — 4; д — 5

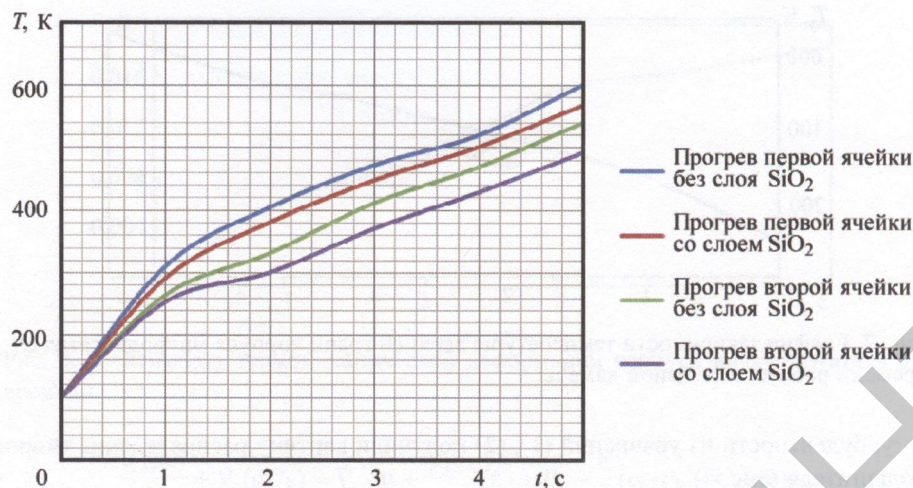


Рис. 9. Зависимость прогрева корпуса отдельных ячеек сборки от времени

рис. 6, 7. Как видно из графика, представленного на рис. 7, введение барьерного слоя SiO_2 для одиночной ячейки не приводит к существенному изменению распределения температурного поля по поверхности корпуса. Влияние слоя SiO_2 для сборки из пяти ячеек (рис. 8) показано на рис. 9. Необходимость отдельного анализа сборки ячеек вызвана возможным влиянием работающей ячейки на состояние соседних ячеек. Как следует из рис. 9, при наличии слоя SiO_2 прогрев соседних ячеек осуществляется слабее при времени работы топливной ячейки больше 1.5 с. Введение барьерного слоя может представлять практическую значимость при разработке блока из 25 ячеек, когда радиационный и конвективный теплообмен возможен только для внешних граней крайних ячеек.

Заключение. При помощи конечноэлементного пакета ANSYS CFX была рассмотрена связанная термомеханическая задача определения напряженно-деформированного состояния и полей температур для двигательной установки микроспутников, созданной по кремниевой технологии. С учетом модели турбулентности $k-\epsilon$ было найдено поле скоростей газа на всей протяженности сопла микродвигателя.

Анализ термомеханических деформаций, возникающих в корпусе микродвигателя, показал, что целостность его конструкции в процессе эксплуатации не нарушается и изделие функционально работоспособно. Локальные области перенапряжений в реальной конструкции из-за нагрева имеют возможность релаксировать и не вызывают разрушения ячейки. С учетом работы не одной ячейки, а матрицы из 25 ячеек целесообразно использовать барьерный слой диоксида кремния для снижения температуры корпуса микродвигателя.

Исследования проведены при поддержке научно-технической программы Союзного государства "Нанотехнология-СГ" (задание № 2.2.3/БНТУ). Моделирование проводилось с использованием компьютерного оборудования и программного обеспечения кластеров BY-BNTU и SKIF-Grid, которые были разработаны и созданы при поддержке проекта семирамочной программы ЕС "Balticgrid II", гранта НАТО PDD(SPS) (EAP.NIG.983696) и программы Союзного государства "СКИФ-ГРИД".

Обозначения

$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$ — константы турбулентности, равные 1.44, 1.92 соответственно; C_{ijkl} — тензор модулей упругости, Н/м^2 ; D — термомеханическая деформация; k — кинетическая энергия на единицу массы, $\text{м}^2/\text{с}^2$; \mathbf{n} — вектор нормали; q_0 — тепловой поток, Вт/м^2 ; \mathbf{r} — радиус-вектор; S_h — объемный источник тепла, Дж/м^3 ; S_{im} — внешний импульс, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^2)$; S_{ijkl} — тензор модулей податливости, Н/м^2 ; T_{out} — температура внешней поверхности корпуса микродвигателя, К ; T_b — температура тела топливной ячейки, К ; T_{amb} — температура окружающей среды; t — время, с ; U — поле скоростей, м/с ; α — температурный коэффициент расширения, $1/\text{К}$; β_{ij} — поле тепловых напряжений, Па ; ϵ — степень диссипации турбулентности, $\text{м}^2/\text{с}^3$; ϵ_{kl} — тензор механических деформаций; θ — разность температур, К ; λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; μ — молекулярная вязкость, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$; μ_t — турбулентная вязкость $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$; ρ — плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; σ — механическое напряжение, Па ; σ_{ij} — тензор полных напряжений, Па ; σ_k — константа турбулентности для уравнения переноса кинетической энергии, принимаемая равной единице; σ_ϵ — константа турбулентности для уравнения переноса диссипации турбулентности; τ — тензор касательных напряжений, Па ; ∇ — оператор Гамильтона. Индексы: h — тепло; im — ударный; out — внешний; b — тело; amb — окружающий; k — кинетический; t — турбулентный.

Литература

1. Лаврухин Г. И. Аэродинамика реактивных сопел. М.: Наука–Физматлит, 2003.
2. Connor J. J. and Brebbia C. A. Finite Element Techniques for Fluid Flow. London: Newnes-Butterworths, 1977.
3. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001.
4. Исаев С. А., Лысенко Д. А. Тестирование численных методов, конвективных схем, алгоритмов аппроксимации потоков и сеточных структур на примере сверхзвукового течения в ступенчатом канале с помощью пакетов CFX и FLUENT//ИФЖ. 2009. Т. 82, № 2. С. 326–330.
5. ANSYS, Inc Ansys CFX Solver Theoretical Guide. Canonsburg, 2006.
6. United States Patent, 6378292, Youngner, April 30, 2002. Appl. No. 09/709107.