

УДК 519.6:533

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ БОКОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТЯГИ
ОСЕСИММЕТРИЧНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА¹⁾****Л.Е. ТОНКОВ, А.А. ЧЕРНОВА***Институт механики УрО РАН, г. Ижевск
E-mail tnk@udman.ru; alicaaa@gmail.com***SIDE LOAD NUMERICAL SIMULATION OF AN AXISYMMETRIC NOZZLE****L.E. TONKOV, A.A. CHERNOVA***Institute of mechanics UB of RAS, Izevsk***Аннотация**

Рассматривается модель газодинамических процессов, протекающих в сверхзвуковых соплах с высокой степенью геометрического расширения на начальном этапе работы. Приводятся результаты численных исследований нарушения осевой симметрии течения.

Ключевые слова: Математическая модель, метод конечных объемов, сверхзвуковое сопло, боковая составляющая тяги

Summary

A simulations of gas flow in a overexpanded axsysymmetric nozzle is performed. The calculations exposed in this paper point out a side load phenomena. The results are discussed with respect to the fitness of the computational technique for the prediction of the aeroelastic response of nozzle at a start-up stage.

Key words: Mathematical model, finite volume method, supersonic nozzle, nozzle side load.

Введение

Проблема нарушения осесимметричности течения и возникновения боковых нагрузок на начальном этапе работы присуща в той или иной степени большинству конструкций ракетных двигателей первой ступени, что обусловлено прежде всего высокой геометрической степенью расширения сопла. С этими явлениями в разное время сталкивались и американские исследователи (ЖРД J-2, J-2S, J-2X), и европейские (Vulcain), и японские (LE-7A) [1].

При рассмотрении процессов, протекающих в начальный момент работы сверхзвукового сопла ракетного двигателя можно выделить несколько характерных особенностей, присущих достаточно широкому классу конструкций. Прежде всего это формирование системы скачков уплотнения в сверхзвуковой части сопла, обусловленное перерасширенным режимом течения. При значительной величине градиента давления вблизи стенки сопла возникает характерная λ -конфигурация скачков уплотнения и отрыв потока. Как экспериментально, так и теоретически было установлено [2], что существует два хорошо различимых типа отрывного течения: неограниченный отрыв при котором поток отделен от стенки развитой областью возвратного течения и ограниченный отрыв, когда после отрыва пограничного слоя происходит его присоединение на некотором расстоянии ниже по потоку и затем возможны новые отрывы и присоединения.

¹⁾Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-08-00064-а)

Неизбежно существующая в любой реальной газодинамической системе неоднородность параметров потока приводит к тому, что на некоторых режимах реализуется особый тип отрыва, имеющий существенно трехмерный и нестационарный характер, что и приводит к возникновению динамических высокочастотных боковых нагрузок при возрастании давления в камере сгорания на этапе запуска двигателя [3]. Данные боковые нагрузки в свою очередь приводят не только к колебаниям конструкции, но и к изменению формы сопла, нарушению его осесимметричности, что сказывается на характере истечения газа. Целью представленного исследования является изучение механизма потери осевой симметрии течения и некоторых свойств получаемых решений.

1. Постановка задачи и метод численного решения

Рассмотрим модель нестационарного внутреннего течения совершенного газа по соплу в виде следующих уравнений сохранения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{U} \mathbf{U} = -\nabla p + \nabla \sigma, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{U} E = -p(\nabla \cdot \mathbf{U}) - \nabla \cdot \mathbf{q} - \nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \mathbf{U}), \quad (3)$$

где σ — тензор вязких напряжений, $E = \frac{1}{2} \mathbf{U}^2 + c_v T$ — полная энергия, \mathbf{q} — тепловой поток. Остальные обозначения общепринятые.

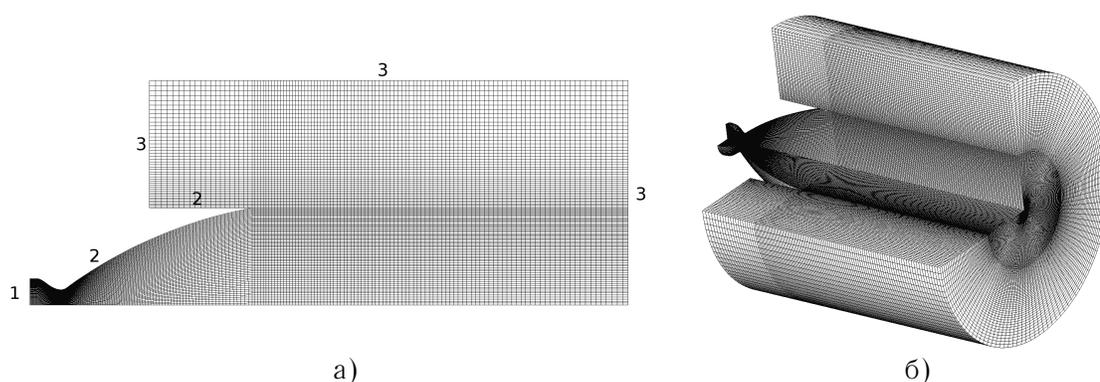


Рис. 1: Расчетная сетка: а) образующая плоская сетка с обозначением вида границ; б) общий вид расчетной сетки

Расчетная область включает внутреннее пространство сопла и область свободного течения. Профиль стенки сверхзвуковой части сопла соответствует приведенному в [4] (ЖРД J-2S). Построение вычислительной сетки осуществлялось вращением относительно оси симметрии сопла плоской сетки, содержащей около 28 000 четырехугольных ячеек (рис. 1, а). Выбранный способ построения позволяет при проведении вычислений полностью исключить влияние сетки как механизма потери решением осевой симметрии. Все дальнейшие результаты получены на сетке, состоящей в общей сложности из 2 142 000 элементов, 23 400 из которых — треугольные призмы (рис. 1, б). Аналогично [4], на входной границе 1 (рис. 1, а) задается зависимость полной энергии от времени, на стенках сопла 2 — условия прилипания и отсутствия тепловых потоков. На внешней границе области 3 — условия дозвукового истечения. Все используемые в расчетах параметры среды совпадают с принятыми в [4]. В начальный момент времени область заполнена неподвижным газом с параметрами окружающей среды. Более подробно особенности постановки начальных и граничных условий для задач аналогичных рассматриваемой приведены в [6].

Система (1)–(3) аппроксимировалась методом конечных объемов, что позволило естественным образом использовать понятие обобщенного решения для течений, содержащих разрывы в виде ударных

волн. Численное интегрирование уравнений сохранения выполнялось при помощи неявного трехшагового алгоритма с коррекцией давления PISO, который сохраняет свои аппроксимационные свойства и устойчивость при расчете до- и сверхзвуковых течений в широком диапазоне чисел Маха [5]. Для обеспечения повышенного порядка аппроксимации по пространству применялась кусочно–полиномиальная реконструкция функций внутри дискретной ячейки, что в свою очередь потребовало введения функции–ограничителя, снижающей порядок аппроксимации до первого вблизи поверхностей разрывов. Во всех расчетах использовался ограничитель *minmod* Ван-Лира.

2. Результаты моделирования.

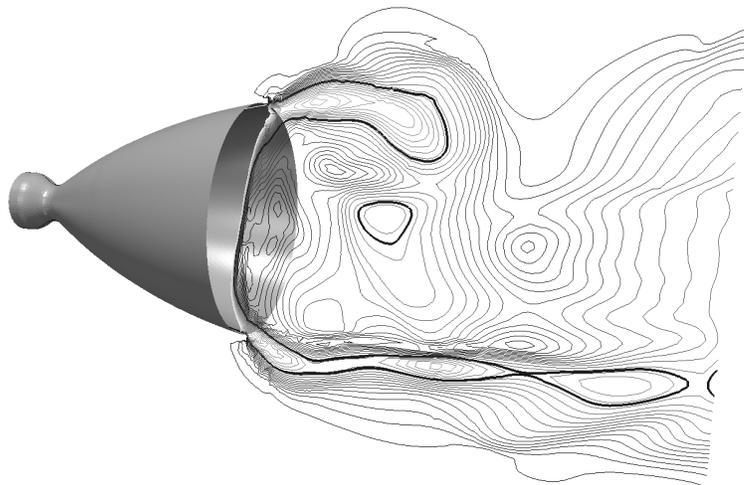


Рис. 2: Изолинии числа Маха ($t=0.15c$); выделена линия, соответствующая значению $M = 1$

Основной целью серии проведенных вычислительных экспериментов являлось исследование симметрии получаемых решений. Для этого было выполнено несколько повторений расчета параметров течения для одних и тех же начальных и граничных условий, так как в силу природы моделируемого процесса осреднение по испытаниям не может быть заменено осреднением по времени. Все расчеты выполнялись на вычислительной системе МВС–10П Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

На рис. 2 показана типичная мгновенная рассчитанная картина течения, соответствующая отрезку времени, когда диск Маха колеблется вблизи среза сопла. Несимметричное относительно оси сопла расположение отрывных зон, взаимодействующих с системой скачков приводит к ярко выраженному нарушению симметрии течения и, как следствие, возникновению боковой составляющей тяги.

На рис. 3, *а* показана одна из рассчитанных реализаций проекции годографа вектора тяги на плоскость нормальную к оси симметрии в сравнении с численными результатами [4] (рис. 3, *б*), которые получены решением осредненной по Рейнольдсу системы уравнений Навье–Стокса, дополненной SST $k-\omega$ моделью турбулентности. Следует отметить, что максимум амплитуды боковой составляющей хорошо согласуются с данными [4], но во всех выполненных расчетах годограф имеет характерный вид (рис. 3, *а*) с точностью до поворота относительно начала координат.

3. Заключение.

Единственным механизмом нарушения осевой симметрии численного решения, присутствующим в рассмотренной модели, является погрешность округления при выполнении арифметических операций с плавающей точкой. Следовательно, можно считать, что изначально осесимметричное течение возмущается некоррелированным по времени случайным процессом с нулевым средним значением, то есть белым

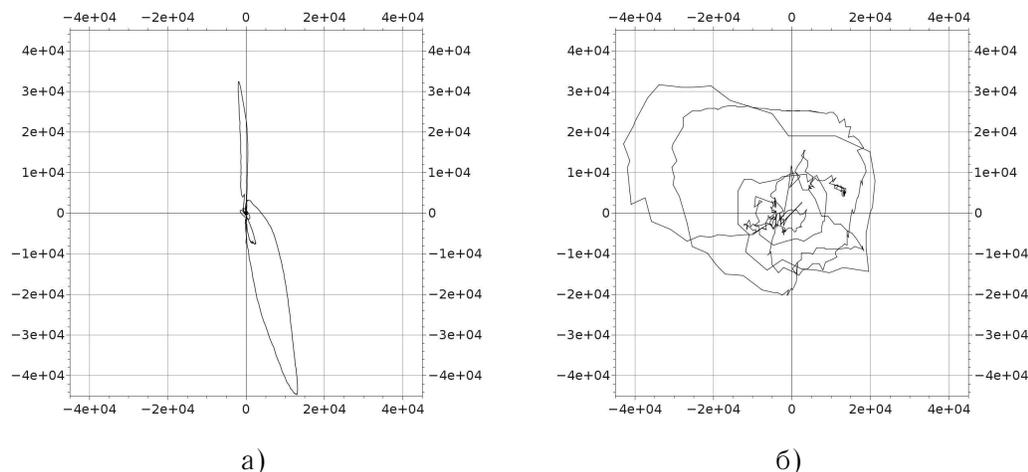


Рис. 3: Годограф вектора боковой составляющей силы тяги F_{xy} (Н): а) расчет авторов; б) результаты моделирования [4]

шумом амплитуда которого имеет порядок машинного нуля. Это дополнительно подтверждает, что наблюдаемые в численном эксперименте явления имеют физическую природу.

Количество выполненных испытаний мало для получения статистически устойчивых оценок, но предварительно можно заключить, что основные параметры несимметричного течения (максимум амплитуды, момент времени, когда он достигается) воспроизводятся от расчета к расчету даже в такой простой постановке и без учета деформаций стенок сопла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tomita T., Sakamoto H., Onodera T., Sasaki M., Takahashi M., Tamura H., Watanabe Y. Experimental Evaluation of Side Load Characteristics on TP, CTP, and TO Nozzles // AIAA Paper. № 04–3678, 2004.
2. Zmijanovic V., Rasuo B., Chpoun A. Flow Separation Modes and Side Phenomena in an Overexpanded Nozzle // FME Transactions. – 2012. – V. 40. – P. 111–118.
3. Wang T.S. Transient three-dimensional startup side load analysis of a regeneratively cooled nozzle // Shock Waves. – 2009. – V. 19. – P. 251–264.
4. Zhao X., Bayyuk S., Zhang S. Aeroelastic response of rocket nozzles to asymmetric thrust loading // Computers and Fluids. – 2013. – V. 76. – P. 128–148.
5. Demirdzic I., Lilek Z., Peric M. A collocated finite volume method for predicting flows at all speeds // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 1993. – V. 16, № 12. – P. 1029–1050.
6. Копысов С.П., Тонков Л.Е., Чернова А.А. Постановка граничных и начальных условий при моделировании процесса запуска сопла // Химическая физика и мезоскопия. – 2013. – Т. 16, № 2. – С. 216–222.

REFERENCES

1. Tomita T., Sakamoto H., Onodera T., Sasaki M., Takahashi M., Tamura H., Watanabe Y. Experimental Evaluation of Side Load Characteristics on TP, CTP, and TO Nozzles // AIAA Paper. – № 04–3678. – 2004.

2. **Zmijanovic V., Rasuo B., Chroun A.** Flow Separation Modes and Side Phenomena in an Overexpanded Nozzle // *FME Transactions*. – 2012. – V. 40. – P. 111–118.
3. **Wang T.S.** Transient three-dimensional startup side load analysis of a regeneratively cooled nozzle // *Shock Waves*. – 2009. – V. 19. – P. 251–264.
4. **Zhao X., Bayyuk S., Zhang S.** Aeroelastic response of rocket nozzles to asymmetric thrust loading // *Computers and Fluids*. – 2013. – V. 76. – P. 128–148.
5. **Demirdzic I., Lilek Z., Peric M.** A collocated finite volume method for predicting flows at all speeds // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. – 1993. – V. 16, № 12. – P. 1029–1050.
6. **Kopysov S.P., Tonkov L.E., Chernova A.A.** Formulation of boundary and initial conditions for simulations of a nozzle startup process [Postanovka granichnykh i nachal'nykh usloviy pri modelirovanii processa zapuska sopla] // *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. – 2013. – V. 16, № 2. – P. 216–222. (in Russian)