

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ
В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ РДТТ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ**

К.Н. Жильцов, К.В. Костюшин, В.А. Котоногов

Научный руководитель: к.ф.-м.н. И.В. Еремин

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: konstantin@niipmm.tsu.ru

**MATHEMATICAL MODELING OF PRESSURE OSCILLATION IN THE COMBUSTION
CHAMBERS OF SOLID ROCKET MOTORS**

K.N. Zhiltsov, K.V. Kostyshin, V.A. Kotonogov

Scientific Supervisor: PhD I.V. Eremin

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: konstantin@niipmm.tsu.ru

***Abstract.** Numerical simulation of the flow instability and pressure self-oscillations for complex configurations of solid fuel charges in the combustion chamber are carried out. Calculation of the combustion products in combustion chamber was carried out with constant mass inflow in two-phase Navier-Stokes equations for a compressible medium. Large-eddy simulations (LES) turbulent model are implemented to study the oscillation flow field. According to fast Fourier transform the spectrum of pressure oscillations in the combustion chamber is determine. It is shown that the complex geometry of solid fuel charge can lead to the occurrence of low-frequency oscillations in the range of natural frequencies of the combustion chamber.*

Введение. Процессы, происходящие в камере сгорания ракетного двигателя на твердом топливе, характеризуются высокими давлениями, скоростями горения топлива и сложным составом продуктов сгорания [1-3]. Автоколебания рабочих параметров, выходящие за установленные пределы, могут приводить к развитию неустойчивости процессов в камере сгорания (КС) и последующему разрушению летательного аппарата. Источником таких колебаний могут быть как нестационарное горение, так и гидродинамическая неустойчивость потока.

В последние десятилетия проводится достаточно большое количество работ по исследованию природы возникновения неустойчивых режимов работы в камерах РДТТ. Проведено множество экспериментальных исследований, выработаны аналитические методики определения собственных колебаний для цилиндрических камер сгорания. В работе [4] проведены исследования гидродинамической природы низкочастотных колебаний, обусловленные неустойчивостью крупномасштабных вихревых структур в основном потоке газа. В работах [5, 6] проведены исследования влияния нестационарных режимов горения твердого топлива на колебания давления в Т-образных камерах сгорания. Работы [7, 8] посвящена подробному изучению вихревой динамики в каналах РДТТ различных конфигураций и их влиянию на величину колебаний давления. В настоящий момент в ракетных двигателях часто используются твердотопливные заряды различных конфигураций [9]. Связано это с необходимостью контролировать закон изменения поверхности горения топлива. Таким

образом, различная геометрия заряда не позволяет однозначно использовать устоявшиеся методики определения собственных частот колебаний давления для камер сгорания.

В данной работе основной целью является отработка методики расчета течения в КС с различной конфигурацией заряда твердого топлива на основе турбулентной модели крупномасштабных вихрей с учетом постоянного массоприхода с поверхности горения.

Методы исследования. Рассматривается задача движения потока газов в камере сгорания с соплом с постоянным массоприходом продуктов сгорания с поверхности горения сложной геометрии. Геометрические особенности поверхности массоприхода приводят к образованию вихрей, возмущению потока и генерация акустических и вихревых колебаний давления.

Математическая модель построена на основе уравнения Навье-Стокса для двухфазной сжимаемой среды и замыкается уравнением турбулентности крупномасштабных вихрей (*LES*) [10]. Задача решается в осесимметричной постановке. Для определения частотных характеристик используются параметры давления, полученные с виртуальных датчиков. Датчики располагаются у переднего днища камеры сгорания и в уплотненной части сопла. Пульсационная составляющая давления p' определяется как:

$$p' = p_{\text{кам}} - p_i$$

где $p_{\text{кам}}$ – среднее давление в камере сгорания, p_i – абсолютное давление на различных виртуальных датчиках камеры сгорания.

Полученные пульсационные составляющие давления обрабатываются с помощью быстрого преобразования Фурье и получают частотный спектр пульсаций давления в камере сгорания. Вычисления проводились с помощью пакета прикладных программ FLUENT для анализа газодинамики течения и среда программирования MathLAB для преобразования Фурье.

Результаты исследования. Методика расчета камеры сгорания с соплом апробирована на цилиндрических конфигурациях, для которых существуют аналитические решения [4]. Результаты расчетов показали хорошее согласование с аналитической методикой для определения собственных частот.

Проведены численные исследования камер сгорания сложной геометрии с уплотненной частью сопла. Показано, что в процессе сгорания твердого топлива поток характеризуется наличием значительного количества разномасштабных вихревых структур. От переднего днища камеры сгорания за счет массоприхода и обтекания особенностей геометрии происходит процесс формирования крупномасштабных вихревых структур. Однако, по мере прохождения потока вдоль камеры сгорания к соплу, вихревые структуры на входе в сопло разрушаются. Таким образом, крупномасштабные вихри характерны только для камеры сгорания, а области мелкомасштабных вихрей находятся в районе переднего днища и уплотненной части сопла. Показано, что именно многочисленные вихревые образования, возникающие вследствие геометрических особенностей камеры сгорания, являются основным источником вихревых колебаний давления.

С использованием разложения пульсационных составляющих давления с помощью преобразования Фурье получен частотный спектр колебаний давления для цилиндрической камеры сгорания и КС сложной геометрии. Показано, что наличие сложных геометрических особенностей камеры сгорания приводит к существенному изменению частотного спектра пульсаций давления.

Заключение. На основе турбулентной модели крупномасштабных вихрей отработана методика определения вихревых и акустических частот колебаний давления в камерах сгорания со сложной конфигурацией заряда твердого топлива.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 9.9063.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимнат И. Ракетные двигатели на химическом топливе: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 294с.
2. Ерохин Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ: Учебник для высших технических учебных заведений. М.: Машиностроение, 1991. – 560с.
3. Vasenin I.M., Narimanov R.K., Glazunov A.A., Kuvshinov N.E., Ivanov V.A. Two-Phase Flows in the Nozzles of Solid Rocket Motors // *Journal of Propulsion and Power*. – 1995. – V.11. – №4. – pp.583-592.
4. Сухинин С.В., Ахмадеев В.Ф. Гидродинамические источники колебаний в камерах сгорания // *Физика горения и взрыва*. – 1993. – Т.29. – №6. – С.38-46.
5. Arkhipov V.A., Volkov S.A., Revyagin L.N. Experimental Study of the Acoustic Admittance of the Burning Surface of Composite Solid Propellants // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2011. – V.47. – №2. – pp.193-199.
6. Su W., Wang N., Li J., Zhao Y., Yan M. Improved method of measuring pressure coupled response for composite solid propellants // *Journal of Sound and Vibration*. – 2014. – V.333. – pp.2226-2240.
7. Zhang Q., Li J., Wang W., Wang N. Numerical Analysis on Oscillation Characteristics in a Tailpipe Nozzle Solid Rocket Motor // *Journal of Spacecraft and Rockets*. – 2011. – V.48. – №1. – pp.103-109.
8. Zhang Q., Wang N., Li J., Su W., Zhang Y. Effect of the head cavity on pressure oscillation suppression characteristics in large solid rocket motors // *Technological Sciences*. – 2015. – V.58. – №7. – pp.1250-1262.
9. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1980. – 533с.
10. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368с.