

УДК 621.454

А.В. АМБРОЖЕВИЧ<sup>1</sup>, С.Н. ЛАРЬКОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup>Научно-техническое специальное конструкторское бюро «ПОЛИСВИТ», Украина

## КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ

Рассмотрены подходы к моделированию пульсирующего воздушно-реактивного двигателя малой тяги на основе метода особенностей.

**беспилотный летательный аппарат, пульсирующий воздушно-реактивный двигатель, рабочий процесс, моделирование**

### Введение

Проектирование беспилотных летательных аппаратов (БЛА), обеспечивающих возможность применения дистанционно-управляемой авиационной системы (ДУАС) в широком диапазоне погодных условий [1], ставит задачу опережающих исследований высотно-скоростных характеристик двигательных установок, в частности, на основе пульсирующего воздушно-реактивного двигателя (ПуВРД).

### 1. Структура математической модели

Предлагаемая модель ПуВРД имеет в своей основе универсальный подход [2], в соответствии с которым основные факторы рабочего процесса отображаются комплексом особенностей типа «источник-сток» массы, импульса и энергии. Подобно подходу в [1], модель ПуВРД является комплексно-сопряженной, т.е. полностью замкнутой (содержащей обратную связь между нестационарным пространственно неоднородным течением и динамикой границ проточной части). Принципиальное отличие от ближайших аналогов [3 – 5] состоит в том, что модель ПуВРД строится в цилиндрическом домене и расчет характеристик ПуВРД ведется с учетом как газодинамических процессов в проточной части ПуВРД, так и учетом эффектов внешнего обтекания.

Опыт использования сеточных приближений контрольной поверхности с условиями на «беско-

нечности», как в готовом программном продукте, так и авторском, показывает, что при этом не обеспечивается приемлемая точность определения силы тяги в силу следующих причин: границы, декларируемые как «неотражающие», тем не менее, отражают приходящие волновые возмущения ввиду того, что границы находятся, как правило, в неприемлемой близости, и предположение о «малости» возмущений на границах оказывается в ряде случаев несостоятельным. В связи с этим, для определения силы тяги с приемлемой для практических целей точностью следует непосредственно определять усилие, действующее на стенки двигателя.

Интегрированная в домен модель ПуВРД органически связана с реализующим ее консервативным численным методом. Домен, заключающий в себе ПуВРД, состоит из ансамбля ячеек (рис. 1). Обмен массой, импульсом и энергией между вычислительными ячейками определяется основными законами гидромеханики. Внешняя и внутренняя поверхности двигателя задаются непроницаемой маской, отображающей твердые границы в ячейках домена.

Выбор системы координат и ранг модели обусловлены типовыми представлениями о компоновочной схеме и режимах полета летательных аппаратов с ПуВРД, а именно – размещением двигателя на пилоне на удалении от планера в малом диапазоне изменения углов атаки [6, 7].

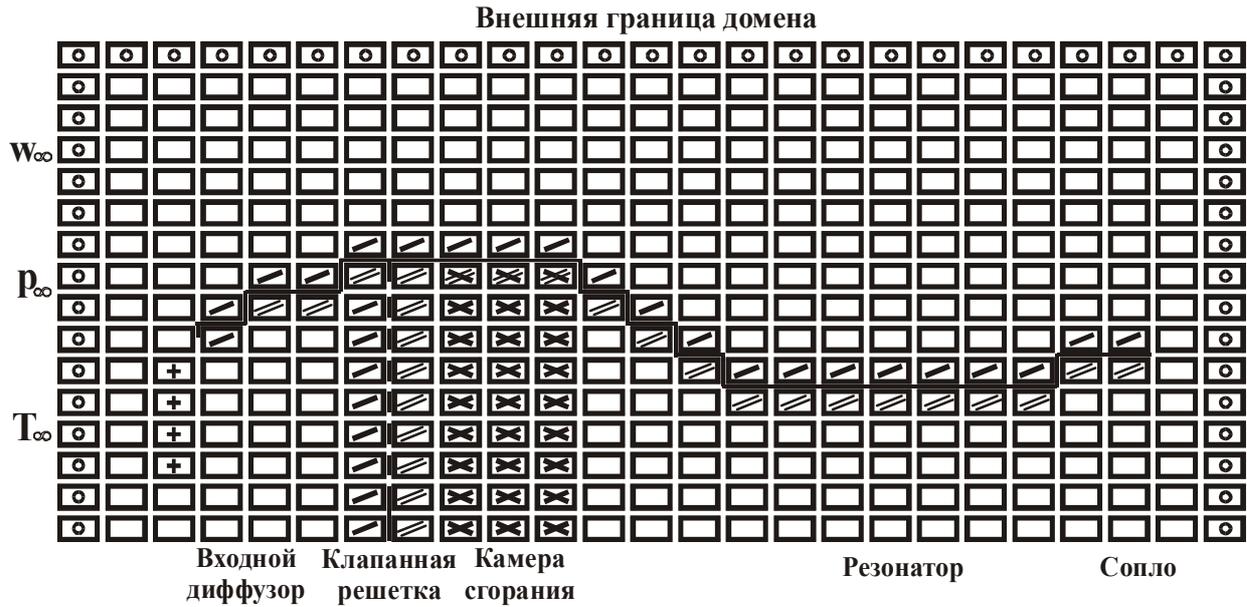


Рис. 1. Схема расчетного домена

- |  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  | условия на "бесконечности";                                |  | источники энергии и концентрации продуктов сгорания, стоки концентрации горючего, имитирующие процесс сгорания;  |
|  | источники концентрации горючего;                           |  | источники энергии и концентрации продуктов сгорания, стоки концентрации горючего, имитирующие процесс сгорания, стоки энергии, имитирующие энергообмен со стенкой. |
|  | стоки импульса, имитирующие силы трения;                   |  |  |
|  | стоки энергии в стенки;                                    |  |  |
|  | источники энергии из стенок;                               |  |  |
|  | источники продуктов сгорания, стоки концентрации горючего; |  |  |

Для адекватного отображения физических процессов в ПуВРД комплексная модель построена из набора элементарных подмоделей:

- 1) 2D-модель течения;
- 2) модель механического движения органов газораспределения;
- 3) модель горения топливовоздушной смеси;
- 4) модель механического движения системы подвески испытательного стенда.

## 2. Состав математической модели

### 2.1. 2D-модель течения

Состояние полей, характеризующих течение, запишем в виде матрицы состояния

$$P(x_1, x_2, t) = \left\{ p, T, \vec{w}, C \right\}(x_1, x_2, t), \quad (1)$$

где  $\{x_1, x_2\} \in \Omega$ ,  $\Omega$  – геометрическая подобласть решения;

$p, T$  – давление и температура соответственно;

$\vec{w}$  – вектор скорости;

$\vec{C}$  – матрица субстанциональных свойств.

Течение в домене определим системой основных уравнений газовой динамики в цилиндрической системе координат в дивергентном виде

$$\frac{\partial \vec{F}}{\partial t} = \sum_{m=0}^M \vec{\Phi}_m, \quad (2)$$

где  $\vec{F} = \rho A \{1, \vec{C}, \varepsilon^0, \vec{w}\}$  – потоки полей в области течения;

$$\Phi_m = \frac{1}{R} \left[ \sum_{k=K}^2 \frac{\partial}{\partial x_k} (\vec{\Phi}_{m,k} R^{k-1}) + \vec{\Delta}_m \right] -$$

функции изменчивости течения за счет внутренних факторов (при  $m = 0$ ) и действия групп источников-стоков (ИС);

$K$  – индекс начального нетривиального направления в пространстве (1 – для 2D-модели, 2 – для 1D-модели);

$R = R(x_2)$  – локальные значения радиальной координаты;

$\rho, A$  – плотность и площадь слоя среды, соответственно;

$$\vec{\Phi}_{m,k} = (\vec{F}w_k + \rho A \{0, 0, \delta_{1,k}, \delta_{m,0}, \delta_{2,k}, \delta_{m,0}\});$$

$\delta$  – символ Кронекера;

$$\vec{\Delta}_0 = \{0, 0, 0, \frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}\} (AR^{k-1});$$

$\vec{\Delta}_m = \{0, \Delta_c, \Delta_I, \Delta_{I1}, \Delta_{I2}\}$  – объемные интенсивности ИС, не связанных с переносом массы среды («свободных»).

В соответствии с подходом [1, 2, 4, 5], факторная матрица рабочего процесса отображается группами «свободных» и связанных с массопереносом источников-стоков (ИС), представленных в табл. 1.

Таблица 1

Комплекс ИС, образующих газодинамическую составляющую модели рабочего процесса в ПуВРД

| Индекс ( $m$ ) | Характер фактора, имитируемого вектором ИС  | Интенсивности образующих факторов   |
|----------------|---|---|
| 1              | Повышение концентрации продуктов сгорания, уменьшение концентрации горючего и подвод теплоты при сгорании топлива | Источника массы продуктов сгорания<br>Стока массы горючего<br>Источника энергии |
| 2              | Тепловые потоки через стенки конструкции  | Источника (стока) энергии   |
| 3              | Диссипативные силы  | Силы трения   |
| 4              | Подача горючего   | Источник массы всей смеси<br>Источника массы горючего                           |

## 2.2. Модель механического движения органов газораспределения

Автоматический лепестковый клапан представляет собой седло 1 с лепестком 2, закрепленным на нем одной стороной, отклонение которого ограничивается упором 3 (рис. 2).

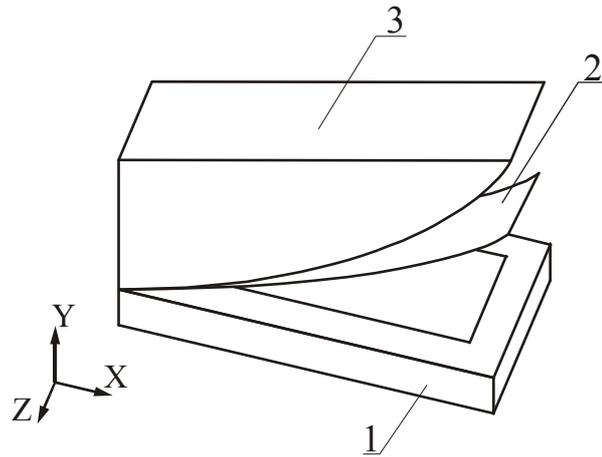


Рис. 2. Схема лепесткового клапана

Подмодель лепесткового клапана основывается на следующих допущениях:

- движение лепестка происходит в направлении оси «у»,
- существенной является только первая гармоника.

При этом задача о колебаниях пластины переменного сечения сводится к задаче о поперечных колебаниях груза на невесомой пластине [8]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = ky - c_1 \frac{dy}{dt}, \tag{3}$$

где  $m$  – масса пластины;

$$k = \frac{3EJ}{x^3} \text{ – жесткость системы;}$$

$c$  – коэффициент сопротивления;

$E$  – модуль упругости материала пластины;

$J$  – момент инерции поперечного сечения пластины;

$x$  – координата центра масс пластины.

### 2.3. Модель горения топливоздушнoй смеси

Моделирование горения топливоздушнoй смеси осуществляется на основе формулы Вибе [9] с использованием следующих допущений:

1) воспламенение смеси происходит только при достижении определенных концентраций топливных компонентов (характерных для самовоспламенения);

2) окончание химических реакций в смеси отслеживается по достижению заданной полноты сгорания (для бедной смеси) или концентрации воздуха, равной нулю (для богатой смеси).

### Выводы

Разработанная модель пульсирующего воздушно-реактивного двигателя универсально пригодна для проведения опережающих исследований различных вариантов организации рабочего процесса, включая эжекторные, что обеспечивается использованием в ней общего вида маски, отображающей топологические свойства внешней и внутренней подобластей течения. Использование однородных описаний основных факторов процесса на основе метода особенностей, позволило авторам получить достаточно компактный программный продукт, адаптированный к возможностям ЭВМ класса Pentium III/IV.

### Литература

1. Амброжевич М.В. Комплексное газодинамическое и механическое моделирование мотокомпрессорных воздушно-реактивных двигателей малых тяг. Дисс. ... канд. техн. наук. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2004. – 186 с.

2. Амброжевич А.В. Численное моделирование комплекса нестационарных газодинамических про-

цессов в тепловых двигателях. – Х.: ХГАДТУ. – 1999. – 77 с.

3. Амброжевич А.В., Потапенко А.А., Ларьков С.Н., Яшин С.А., Симбирский В.Л., Беляков К.В. Воздушно-реактивные двигатели для миниатюрных БЛА // Космічна наука і технологія. – 2003. – № 1. – С. 78 – 84.

4. Амброжевич М.В. Комплексно-сопряженная модель рабочего процесса в авиационном двухтактном поршневом двигателе // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2002. – Вип. 30. – С. 37 – 42.

5. Амброжевич М.В., Ларьков С.Н. Результаты моделирования мотокомпрессорного ВРД малой тяги с компрессором объемного типа // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 8/16. – С.70 – 73.

6. Кутовой О.П. Тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів // Наука і оборона. – 2000. – № 4. – С. 39 – 47.

7. Облик двигательных установок перспективных малоразмерных БЛА / А.В. Амброжевич, К.В. Беляков, А.С. Карташов, А.Н. Коровай, С.Н. Ларьков, А.Г. Сахно, В.Л. Симбирский, А.А. Цирюк // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2003. – Вип. 41/6. – С. 36 – 39.

8. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 440 с.

9. Мунштуков Д.А., Амброжевич А.В. Одномерная модель газодинамического процесса в камере сгорания периодического действия // Газовая динамика двигателей и их элементов. – 1987. – С. 106 – 115.

*Поступила в редакцию 18.11.2004*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.