

УДК 629.735.33

А.В. АМБРОЖЕВИЧ<sup>1</sup>, И.Ю. ДОЛЖЕНКО<sup>1</sup>, А.В. КОЛОМИЙЦЕВ<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*<sup>2</sup> *Харьковский НИИ судебных экспертиз им. Засл. проф. Н.С. Бокариуса, Украина*

## КОМПЛЕКСНАЯ ТРАЕКТОРНАЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРО-БЛА

*Построена газодинамическая модель микро-БЛА с предельно высокой плотностью компоновки, имеющая внешнее и внутреннее обтекание. Модель задана в контрольном объеме, который связан с БЛА. Также реализованы модели динамики запуска и свободного полета, отображающие траекторное поведение БЛА в переменных полях поверхностных и массовых сил. Представленный полный траекторный цикл миниатюрного БЛА отображается замкнутой нестационарной моделью третьего ранга, представляющей собой комплекс взаимосвязанных элементов. Наглядно продемонстрирована унификация методов решения внутри- и внешнебаллистических задач.*

**Ключевые слова:** микро-БЛА, твердотельная маска, аэрогазодинамическая модель, неотражающие границы.

### Введение

Современное состояние научно-исследовательского инструментария в целом характеризуется унификацией на основе континуальных моделей механики сплошных сред, идущей на смену традиционным узкоспециализированным на частных видах физических процессов интегральным моделям нулевого ранга с решающей ролью эмпирической параметризации. Главной предпосылкой данной тенденции является возможность экстенсивного использования известных сеточных методов решения уравнений механики сплошных сред в условиях перманентного прогресса информационных технологий.

В этом смысле не составляет исключения и класс процессов, традиционно относимый к сфере интересов внутренней и внешней баллистики [1]. Здесь налицо процесс взаимодействия миниатюрного летательного аппарата (метательного снаряда), вводимого в полет тепловой расширительной машиной (ствольного пускового устройства), с внутренней – газовой (генерируемой за счет предварительной аккумуляции или пиротехническим способом) и внешней – воздушной средами в поле сил земного тяготения. Тем самым формулируется аэрогазодинамическая краевая задача, замыкающаяся уравнениями движения по направляющей и динамики полета, соответственно – на внутреннем и внешнем участках траектории [2].

Имеется также и предпосылка функционально-эволютивного характера к подобной трансформации исследовательского инструментария. Наряду с об-

щей тенденцией перехода от транспортных систем с баллистическими траекториями полета к адаптивно управляемым, отмечается рост интереса к перспективным комплексам с беспилотным ЛА масштабного ряда и облика, свойственного объектам артиллерийско-стрелкового вооружения [3].

### Структура комплексной траекторной модели

По аналогии с [2] полный траекторный цикл миниатюрного БЛА отображается замкнутой нестационарной моделью третьего ранга, представляющей собой комплекс взаимосвязанных элементов:

1) газодинамической модели внешнего и внутреннего обтекания, заданной в контрольном объеме (КО), связанном с ЛА (рис. 1);

2) модели динамики запуска и свободного полета, отображающей траекторное поведение БЛА в переменных полях поверхностных и массовых сил.

Заданная согласно п.1 газодинамическая модель является доминантой комплекса, а динамическая модель по п.2 выступает в роли замыкающего звена.

Наличие КО, связанного с ЛА в состоянии траекторного движения, предопределяет использование неинерциальной системы отсчета.

#### 1. Уравнения комплексно-сопряженной аэрогазодинамической и механической модели траекторного движения летательного аппарата

Принципиальная основа физико-математического описания газодинамической составляющей процесса в КО аналогична применяемой в извест-

ных комплексно-сопряженных моделях импульсных тепловых машин и свободнолетающих ЛА [4 – 6]. Для достижения формальной однородности модельных представлений факторов различной физической природы используется аппарат источников-стоков (ИС) массы, импульса и энергии. С учетом пространственной неоднородности полета ЛА в гравитационном поле и условий обтекания набегающим потоком физические поля, образующие процесс свободного полета ЛА, представлены в прямоугольных координатах. Также наподобие [4 – 6] определяющие модель процесса законы сохранения массы, импульса и энергии выражены в векторно-матричных терминах:

$$\frac{\partial \vec{F}}{\partial t} + \vec{\nabla} \Phi = \sum_{n=1}^{M_M} \left( \frac{\partial \vec{F}}{\partial t} \right)_{(n)} + \sum_{n=1}^{M_C} \vec{\Delta}_{(n)}. \quad (1)$$

Основные математические объекты, включенные в систему (1), комплект условий однозначности решения векторно-матричного уравнения унифицированной модели течения в КО, также использующиеся в дальнейшем изложении, представлены в [4 – 6].

Положения подвижных границ КО определяются решением сопряженной задачи запуска и свободного полета ЛА. Также положение этих границ определяет условия сопряжения аэрогазодинамической и динамической составляющих комплексной модели. В соответствии с методом особенностей [7 – 9, 17 – 19], совокупность доминирующих факторов модели представляется аппликацией источников-стоков (ИС) материальных субстанций двух типов: связанных с массопереносом и «свободных». На протяжении малых интервалов времени, ассоциированных с временными шагами, такого рода ИС полагаются автономными явлениями, к которым

применим принцип суперпозиции в виде семейства параллельно-последовательных схем.

## 2. Подмодель процесса генерации рабочего тела

Процесс поступления углекислоты в конечной своей газообразной фазе подчинен интегралу Эйлера:

$$w = \sqrt{2c_{pCO_2} T_{CO_2} \left\{ 1 - \left( \frac{p}{p_{CO_2}} \right)^{\gamma_{CO_2}} \right\}}, \quad (2)$$

откуда

$$T = T_{CO_2} - \frac{w^2}{2c_{pCO_2}} \rightarrow p = \frac{p}{R_{CO_2} T_{CO_2}},$$

где  $p$  – локальное значение давления, чем определяется покомпонентный состав источниковых членов группы «2» системы (1) при условии изоэнтропичности процесса и сохранения импульса скорости:

$$\left( \frac{\partial \vec{F}}{\partial t} \right)_{(2)} = \frac{\rho w A}{\Delta V} \{1, 1, S_{CO_2}, 0, 0, w, \epsilon_{CO_2}\}, \quad (3)$$

где  $A$ ,  $\Delta V$  – площадь и объем зоны истечения  $CO_2$  из баллона (рис. 1).

## 3. Связь уравнений динамики полета с состоянием физических полей в контрольном объеме

Фазы траекторного движения БЛА подчиняется уравнениям динамики тела переменной массы, [10 – 15], движущегося по ствольной направляющей, а затем – в поле сил земного тяготения, под действием несбалансированных сил, приложенных к наружным и внутренним поверхностям и моментов, действующих относительно центра масс:

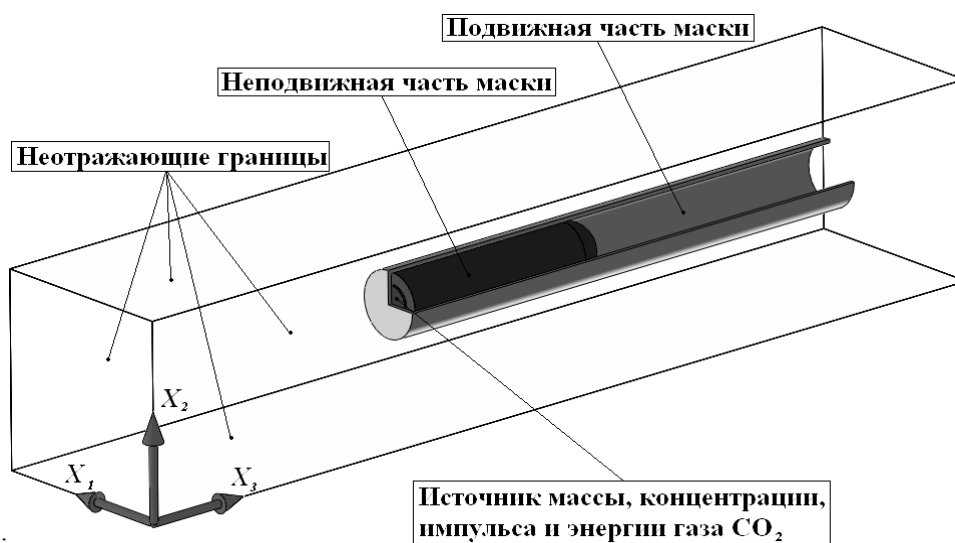


Рис. 1. Контрольный объем с объектом исследований

$$\frac{dM_{\text{ЛА}}}{dt} = - \int_{\Omega_{(3)}} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \omega_{\Gamma} \right)_{(3)} dV; \quad (4)$$

$$\frac{d(M_{\text{ЛА}} \vec{u})}{dt} = - \int_{\sigma_{(5)}} \bar{\Delta}_{I(5)} \vec{n}_{(5)} d\sigma - \vec{i}_k M_{\text{ТС}} g; \quad (5)$$

$$\left( \frac{\partial \omega_k}{\partial t} \right) = \frac{M_k}{I_k}, \quad k=1,2,3, \quad (6)$$

где  $M_{\text{ЛА}}$  – масса БЛА;  $\vec{u}$  – скорость движения центра масс;  $\Omega_{(3)}$  – зона генерации рабочего тела;  $\vec{n}_{(5)}$  – единичный вектор внешней нормали к поверхности БЛА;  $\sigma_{(5)}$  – внутренняя и внешняя поверхности ЛА;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\omega_k$  – компоненты угловых скоростей;  $M_k$  – проекции траекторных моментов;  $I_k$  – осевые моменты инерции.

Интегрирование системы уравнений (4) – (6) позволяет получить внутренний и внешний участки траектории ЛА.

Ускоренное движение КО обуславливает неинерциальный характер связанной системы отсчета:

$$\left( \frac{\partial \vec{w}}{\partial t} \right)_{\text{Неин. СО}} = \left( \frac{\partial \vec{w}}{\partial t} \right)_{\text{Ин. СО}} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}, \quad (7)$$

где Неин. СО и Ин. СО – неинерциальная и инерциальная системы отсчета.

#### 4. Сеточное отображение топологических свойств контрольного объема

Сеточное отображение топологии КО представляет собой телесную твердотельную маску, составленную из ансамбля непроницаемых ячеек, исключенного из геометрической подобласти решения эволюционной аэрогазодинамической задачи в соответствии с условиями взаимодействия подвижных и неподвижных частей комплекса «ЛА + ПУ».

Пример фазовых состояний твердотельной модели и соответствующей маски одного из проектных вариантов комплекса «ЛА + ПУ» представлен на рис. 2. Для отображения условий газодинамического взаимодействия ЛА с прочими телами, вовлеченными в траекторный процесс (пусковым устройством), в КО задается система объемных твердотельных масок, воспроизводящих телесность объектов КО, движение которых определяется решением уравнений процесса запуска и динамики полета ЛА.

Маска формируется с использованием операции импорта твердотельного образа поверхностей, сгенерированного в системе SolidWorks, в среду алгоритмического языка FORTRAN Visual Pro ver. 6.6.

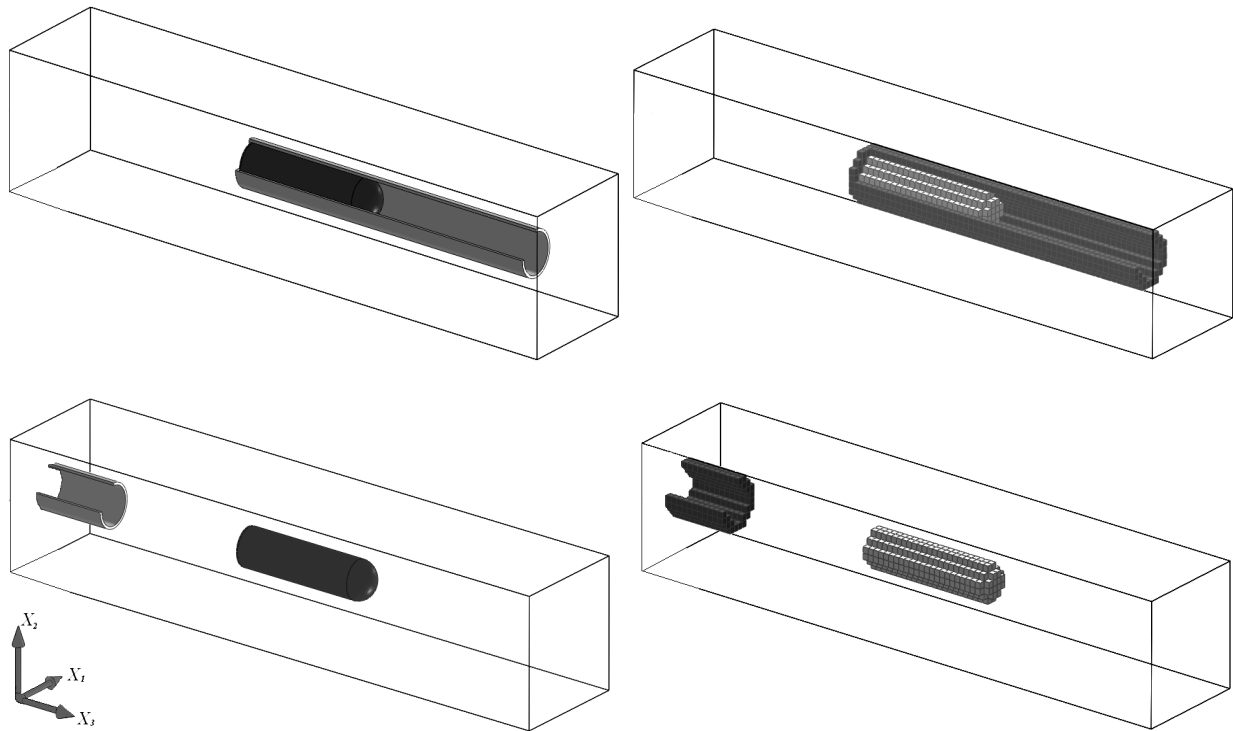


Рис. 2. Траекторная эволюция твердотельных моделей и соответствующих поверхностных масок системы «ПУ + ЛА»

### 5. Имитация диссипативных свойств

Способы отображения диссипативной сигнатуры физического оригинала разнообразны и вариативны: от уравнений Навье-Стокса до приближенных подходов гидравлики. Учитывая имманентную безальтернативность феноменологических форм представления факторов диссипации на фоне модели механики сплошных сред, во всех случаях неизбежно использование эмпирических констант (коэффициентов турбулентной вязкости, гидравлических потерь и т.п.). В условиях комплексных практических задач, как правило, априорная информация вида необходимого набора констант отсутствует, что приводит к нецелесообразности применения усложненных моделей диссипативных процессов.

В связи с вышеизложенным, в представленной модели используется принцип отображения диссипативной сигнатуры, исходящий из подтвержденного на практике предположения о подобии структур коэффициентов вязкости – физической и аппроксимационной [16].

Диссипация в процессе обтекания внешней поверхности БЛА и внутренней поверхности пусковой направляющей воспроизводится путем нормирования аппроксимационной вязкости [4 – 6], что может рассматриваться в качестве однопараметрической модели турбулентности.

### Заключение

Однородность метода применительно к различным режимам полета: активным, активно-реактивным, пассивным: представленный метод моделирования исследования, базирующийся на общих представлениях аэрогазодинамики и динамики полета, универсально пригоден к решению множества задач, ранее составлявших монополярную сферу подходов внутренней и внешней баллистики, и вследствие этого может быть без принципиальных изменений применен к проблематике систем с пиротехническими принципами действия.

### Литература

1. Коломийцев А.В. Метод расчетного и экспериментального определения облика снаряда специального назначения с заданными аэродинамическими свойствами: дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.01; защищена 05.06.05; утв. 11.12.05 / Коломийцев Александр Викторович. – Х., 2005. – 234 с.
2. Амброжевич А.В. Комплексная траекторная модель летательного аппарата / А.В. Амброжевич, В.А. Середа // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 5 (52). – С. 40-44.

3. Данные по микро-БЛА. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://defense-update.com>.

4. Амброжевич А.В. Численное моделирование течений в тепловых двигателях и энергоустановках / А.В. Амброжевич. – Х.: ХАИ, 1995. – 146 с.

5. Амброжевич А.В. Численное моделирование комплекса нестационарных газодинамических процессов в тепловых двигателях: монография / А.В. Амброжевич. – Х.: ХГАДТУ, 1999. – 77 с.

6. Амброжевич А.В. Численное моделирование теплофизических процессов в двигателестроении: учеб. пособие / А.В. Амброжевич. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2005. – 233 с.

7. Рождественский Б.Л. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике / Б.Л. Рождественский, Н.Н. Яненко. – М.: Наука, 1978. – 688 с.

8. Кочин Н.Е. К теории разрывов в жидкости / Н.Е. Кочин. *Собр. соч. в 2-х т., т.2*. – М.: Наука, 1948. – С. 5-42.

9. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1977. – 440 с.

10. Амброжевич М.В. Унифицированные разноразмерные модели поршневых двигателей летательных аппаратов для опережающих исследований рабочего процесса / М.В. Амброжевич // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2003. – Вип. 41/6. – С. 40-44.

11. Амброжевич М.В. Комплексно-сопряженная модель рабочего процесса в авиационном двухтактном поршневом двигателе / М.В. Амброжевич // *Двигуни та енергоустановки: Зб. наук. пр.* – 2002. – Вип. 30. – С. 37-42.

12. Амброжевич М.В. Интегрированная технология опережающих исследований рабочего процесса в авиационном двухтактном поршневом двигателе / М.В. Амброжевич // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2003. – Вип. 42/7. – С. 78-82.

13. Амброжевич М.В. Унифицированные разноразмерные модели поршневых двигателей летательных аппаратов для опережающих исследований рабочего процесса / М.В. Амброжевич // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2003. – Вип. 41/6. – С. 40-44.

14. Амброжевич М.В. Комплексное газодинамическое и механическое моделирование мотокомпрессорных воздушно-реактивных двигателей малых тяг: дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.01; защищена 05.10.04; утв. 11.02.05 / Амброжевич Майя Владимировна. – Х., 2004. – 183 с.

15. Комплексно-сопряженные модели импульсных тепловых машин. Комплексно-сопряженные модели авиационных двухтактных поршневых двигателей: отчет о НИР (заключительный): 84 с. – Г-401-28/2003 Том.1 № Д/р – 0100U004030. – Х.: ХАИ. – 2005.

16. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О.М. Белоцерковский. – М.: Наука, 1984. – 520 с.

17. Мушитуков Д.А. Приближенная модель нестационарных пространственно неоднородных течений в решетках лопаточных машин / Д.А. Мушитуков, А.В. Амброжевич // Энергетическое машиностроение. – 1988. – Вып. 46. – С. 13-18.

18. Амброжевич А.В. Численный метод реализации плоской модели течения среды в решетке лопаточной машины / А.В. Амброжевич // Энергетическое машиностроение. – 1988. – Вып. 46. – С. 93-99.

19. Амброжевич А.В. Малоресурсный метод численного моделирования течений в геометрических областях сложной формы / А.В. Амброжевич, И.П. Бойчук, С.Н. Ларьков, В.А. Серета // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 6(53). – С. 5-10.

Поступила в редакцию 20.03.2009

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры аэрокосмической теплотехники А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### КОМПЛЕКСНА ТРАЕКТОРНА ГАЗОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ МІКРО-БЛА

*О.В. Амброжевич, І.Ю. Долженко, О.В. Коломійцев*

Побудована газодинамічна модель мікро-БЛА з гранично високою щільністю компонування, що має зовнішнє і внутрішнє обтікання. Модель задана в контрольному обсязі, що зв'язаний із БЛА. Також реалізовані моделі динаміки запуску і вільного польоту, що відображають траєкторне поведіння БЛА в перемінних полях поверхневих і масових сил. Представлений повний траєкторний цикл мініатюрного БЛА відображається замкнутою нестационарною моделлю третього рангу, що представляє собою комплекс взаємозалежних елементів. Наочно продемонстрована уніфікація методів рішення внутрішньо- та зовнішньобалістичних задач.

**Ключові слова:** мікро-БЛА, твердотільна маска, аерогазодинамічна модель, невідпорні границі.

### THE COMPLEX GAS-DYNAMICS PATH MODEL OF MICRO-PILOTLESS VEHICLE

*A.V. Ambrozhevitch, I.Y. Dolzhenko, A.V. Kolomijetsev.*

It is constructed gas-dynamic model of mikro-pilotless vehicle with extremely high density of the configuration, having an external and internal flow. The model is set in control volume which is connected with pilotless vehicle. Also models of dynamics of start and the free flight, displaying path behavior pilotless vehicle in variation fields of superficial and mass forces are realized. Presented full path the cycle tiny pilotless vehicle is displayed by the closed non-stationary model of the third rank representing a complex of interconnected elements. Unification of methods of the decision internal and exterior ballistics problems is visually shown.

**Key words:** micro-pilotless vehicle, solid model, aerogasdynamics model, nonreflective frames.

**Амброжевич Александр Владимирович** – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры ракетных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Долженко Иван Юрьевич** – аспирант кафедры ракетных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: dolzhenko\_ivan@mail.ru.

**Коломійцев Александр Викторович** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Харьковского научно-исследовательского института судебных экспертиз имени Засл. проф. Н.С. Бокариуса, Харьков, Украина.