



УДК 004.942:536.46:533.17

М. Н. Правидло, Н. А. Любимова, Л. В. Быков

Численное исследование газодинамических процессов в пиротехническом приводе механизма раскрытия аэродинамических поверхностей

Представлена математическая модель пиропривода механизма раскрытия аэродинамических поверхностей летательного аппарата, включающая коллекторную систему. Предложенная математическая модель учитывает сопряженные процессы газовой динамики во внутренних полостях пиропривода и динамику его подвижной части. Приведены результаты численного исследования основных параметров потока рабочего тела в программном комплексе ANSYS.

Ключевые слова: пиропривод, газовая динамика, математическое моделирование.

Введение

На этапах отработки новой авиационной техники математическое моделирование поведения конструкции во всех возможных диапазонах условий ее работы представляется целесообразным. Такое моделирование позволяет оценить эксплуатационные характеристики изделия, а также возможные направления корректировки его технического облика, что ведет к сокращению временных и финансовых затрат на отработку и испытания, выявление недочетов конструкции на ранних этапах проектирования.

В настоящей работе представлена задача численного моделирования процесса раскрытия управляющих аэродинамических поверхностей (рулей) беспилотного летательного аппарата (БПЛА) при его отделении от самолета-носителя. Численное моделирование процесса раскрытия рулей, приводимых в действие за счет срабатывания пиротехнического патрона, позволяет с достаточной вероятностью предсказать характер газодинамических процессов в механизме пиропривода, появляется возможность конструкторской проработки изделия с заданными тактико-техническими характеристиками. В связи со сложностью экспериментальных исследований динамики рабочего тела в камерах пироприводов, вызванных ограниченным временем их срабатывания, получить достоверные опытные данные о газодинамических процессах довольно проблематично.

Цель данной работы – создание математической модели, определяющей зависимость времени раскрытия рулей от параметров

системы, влияющих на динамику пиропривода.

В результате анализа конструктивных особенностей пиропривода принято решение представить функционирование разрабатываемой модели в виде двух этапов, на которых рассматриваются последовательные физические процессы. На рис. 1 представлена принятая расчетная схема модели.

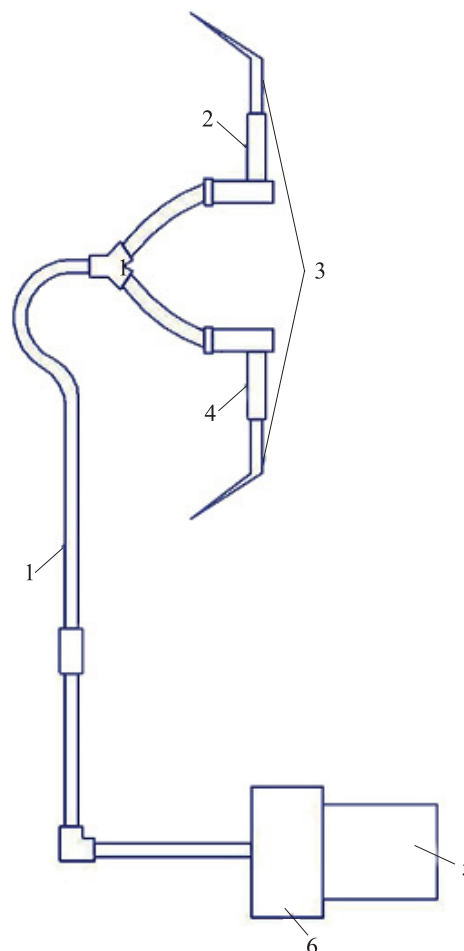


Рис. 1. Расчетная схема пиропривода рулей:
1 – коллекторная система; 2, 4 – поршни; 3 – рули;
5 – газогенератор; 6 – газовый блок

На первом этапе проводилось исследование нестационарной газовой динамики в подводящем трубопроводе с целью установить степень влияния проходного сечения и протяженности трубопровода на время срабатывания системы в целом.

Второй этап заключался в численном исследовании процесса газовой динамики продуктов сгорания внутри рабочей полости привода в условиях изменения ее объема и моделировании динамики движения штока. Все вышеописанные расчеты проводились с использованием программного комплекса *ANSYS CFX*.

Геометрическая 3D-модель расчетной области, включающая в себя газогенератор, соединительные трубопроводы, исполнительный механизм и аэродинамические поверхности рулей, представлена на рис. 2.

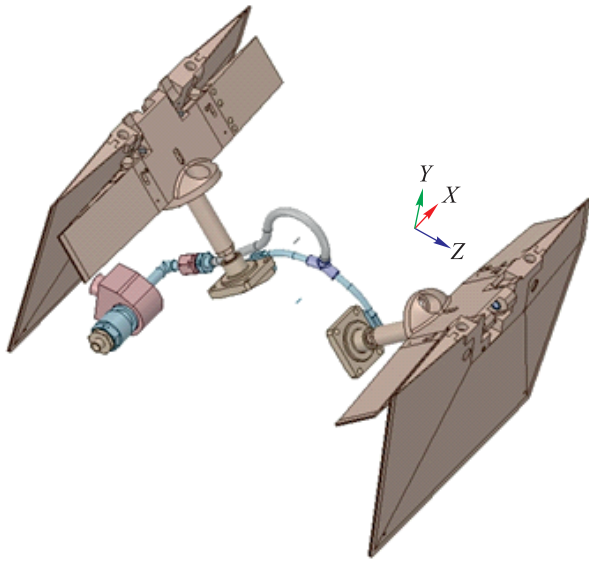


Рис. 2. Геометрическая 3D-модель расчетной области

Проведенное численное моделирование позволило обосновать возможность построения эффективной инженерной модели динамики пиропривода. При проектировании такая инженерная модель позволяет оперативно вносить изменения в основные конструктивные элементы системы, оказывающие влияние на его динамику.

Описание математической модели

Система уравнений Навье – Стокса, лежащая в основе математической модели, описываю-

щей течение сжимаемого совершенного газа при больших скоростях [1], включает:

- 1) уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0; \tag{1}$$

- 2) уравнение сохранения количества движения

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla(\tau_m + \tau_t); \tag{2}$$

- 3) уравнение сохранения энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} H) = \\ = \nabla[\mathbf{u}(\tau_m + \tau_t) - (\mathbf{q}_m + \mathbf{q}_t)]; \end{aligned} \tag{3}$$

- 4) уравнение состояния

$$\rho = \frac{pm}{RT}. \tag{4}$$

Здесь ρ – плотность газа;

\mathbf{u} – вектор скорости осредненного течения с компонентами u, v, w ;

p – давление газа в объеме;

τ_m, τ_t – молекулярная и турбулентная составляющие тензора вязких напряжений;

$E = C_v T + 0,5(u^2 + v^2 + w^2)$ – полная энергия газа;

$$H = E + \frac{p}{\rho} = C_p T + 0,5(u^2 + v^2 + w^2) \quad -$$

полная энтальпия газа;

$\mathbf{q}_m, \mathbf{q}_t$ – молекулярный и турбулентный векторы плотности теплового потока;

m – молярная масса газа;

$R = 8,31434$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;

T – температура;

C_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме;

C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Представленная выше система уравнений Навье – Стокса (1)–(4) является незамкнутой и должна быть замкнута с помощью дополнительных соотношений, описывающих модель турбулентности.



В приведенной задаче применена модель турбулентности *SST* Ментера [2], включающая следующие уравнения:

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \nabla[(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k + P_k - \beta^* \rho \omega k]; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho \omega)}{Dt} = \nabla[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + \\ + \gamma \frac{\rho}{\mu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + (1 - F_1) D_{k\omega}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial}{\partial x_i}$ – вещественная производная по времени;

k – кинетическая энергия турбулентности;

μ_t – турбулентная вязкость;

P_k – генерационный член;

ω – удельная скорость ее диссипации;

$\sigma_k, \beta, \gamma, \sigma_\omega$ – эмпирические константы;

F_1 – первая весовая функция;

$D_{k\omega}$ – член с перекрестной диффузией.

Для определения зависимости коэффициента динамической вязкости газа μ от температуры T использована формула Сазерленда [3]

$$\mu = \mu_{ref} \left[\frac{T_{ref} + S}{T + S} \right] \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/2}, \quad (7)$$

где $T_{ref} = 273,15$ К – температура, при которой задана контрольная вязкость μ_{ref} ;

S – константа Сазерленда (в рассматриваемой задаче $S = 110,56$ К).

Поиск решения приведенной выше системы уравнений (6) осуществлялся методом контрольного объема. Уравнение динамики твердого тела реализовано в виде

$$m\ddot{\mathbf{x}} = \sum \mathbf{F}, \quad (8)$$

где m – масса, присоединенная к штоку (может быть задана как переменная величина);

$\ddot{\mathbf{x}}$ – вектор ускорения;

$\sum \mathbf{F}$ – сумма всех сил, действующих на шток.

Анализ результатов численного моделирования

Было проведено моделирование нестационарной газовой динамики в подводящем коллекторе пиропривода для определения степени его влияния на время срабатывания системы целом.

Рассматриваемая задача решалась с помощью расчетного комплекса *ANSYS Fluent* [4] в двухмерной постановке, что позволяет значительно сэкономить вычислительные ресурсы. При этом использовалась формулировка уравнений Навье – Стокса в параболической форме, применяемая для решения задач высокоскоростных течений. В результате проведенного исследования получены поля основных параметров течения в подводящем коллекторе от активации заряда до полного выравнивания поля давления в коллекторе.

На рис. 3 представлены поля распределения статического давления и чисел Маха для момента, когда происходит выравнивание давления в выходной части трубопровода

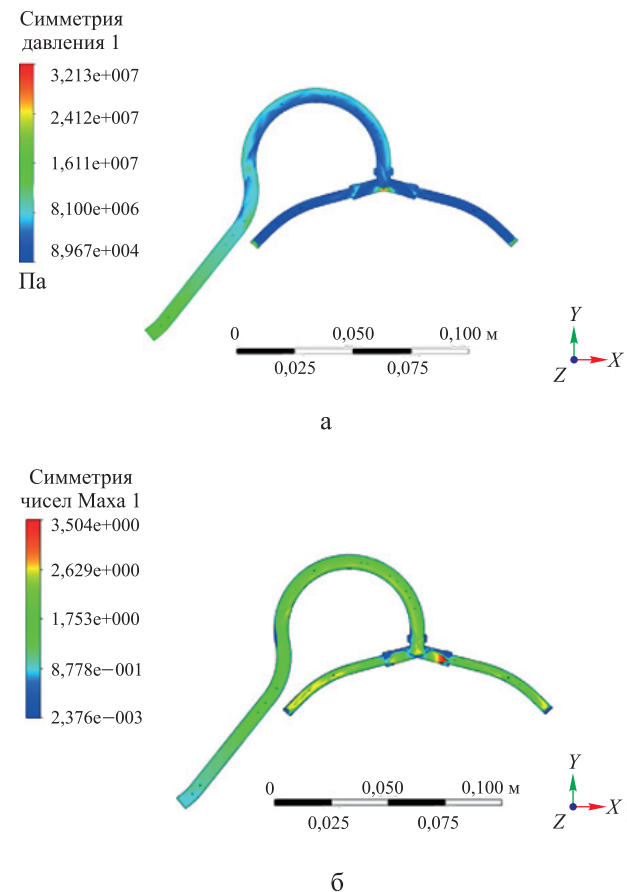


Рис. 3. Распределение статического давления (а) и числа Маха в трубопроводе (б)

(условно можно считать давление в полостях пиропривода равным этому давлению) с давлением на входе в трубопровод.

Опираясь на полученные результаты численного моделирования, можно сделать вывод, что временным фактором, вносимым подводящим коллектором в полученное решение, можно пренебречь. Следовательно, поставленная задача исследования газодинамических процессов в пиротехническом приводе механизма раскрытия рулей сводится к моделированию работы их исполнительного механизма и представляет собой решение нестационарной сопряженной задачи газодинамики и динамики твердого тела. Для решения нестационарной сопряженной задачи газодинамики и динамики твердого тела конструкции пиропривода были сделаны следующие допущения:

- при расчете теплообмена в продуктах сгорания перенос тепла за счет переизлучения в потоке не учитывается;
- моделирование динамики штока пиропривода проводится на основе уравнения динамики для материальной точки без учета распределения массы по объему штока;
- движение хода штока пиропривода происходит только по одной координате;
- силы жесткости и демпфирования при движении штока не учитываются;
- влияние массовых сил на работу пиропривода не учитывается.

Решение сопряженной задачи газовой динамики и динамики твердого тела показало, что поле давления в рабочей полости привода достаточно быстро становится практически равномерным, отличия давления в разных областях рабочей полости составляют порядка 0,1 атм, как это показано на рис. 4 (момент времени $t = 0,014$ с). Это можно объяснить сравнительно небольшими размерами рабочей камеры пиропривода и отсутствием явных утечек.

Распределение полей давления и скоростей в полости пиропривода в момент времени $t = 0,014$ с показано на рис. 5. Значения рассчитанной скорости течения свидетельствуют об отсутствии высокоскоростных потоков на момент начала движения.

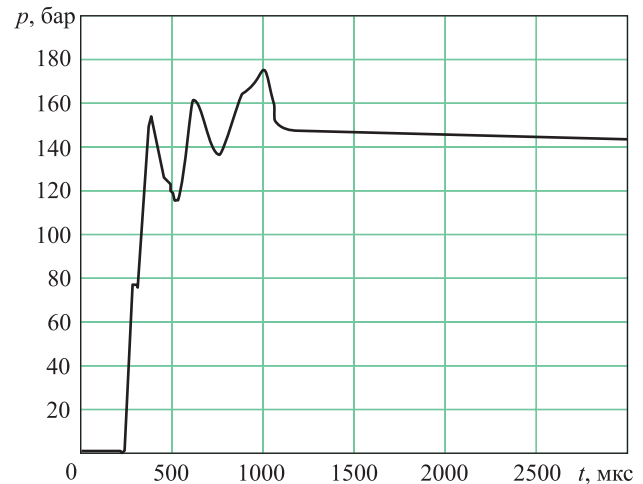


Рис. 4. График изменения среднего статического давления в конечных точках трубопровода

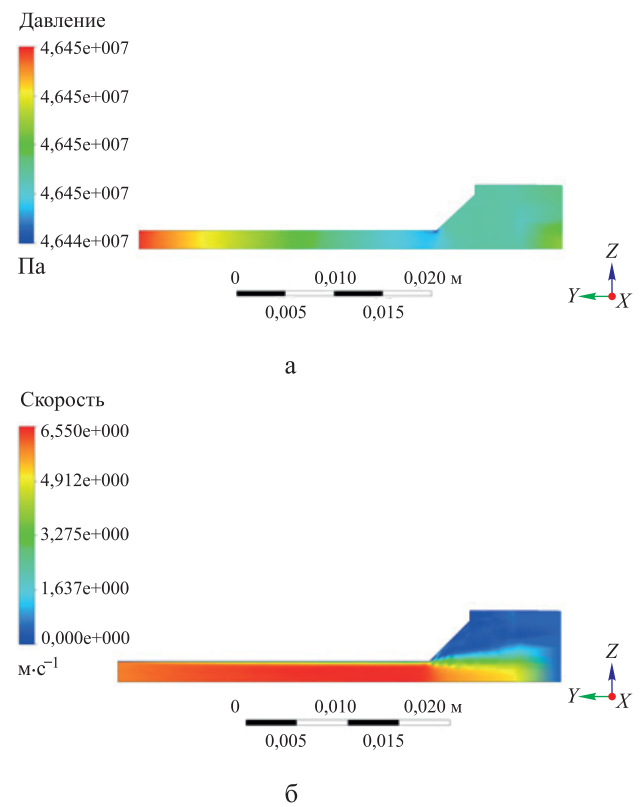


Рис. 5. Распределение поля давления (а) и поля скоростей (б) в полости пиропривода в момент времени $t = 0,014$ с

Полученные параметры динамики хода штока и изменения среднего статического давления в камере пиропривода показаны на рис. 6.

Следует отметить, что результаты, полученные в процессе численного моделирования, хорошо совпадают с данными экспериментальных исследований, в которых определя-

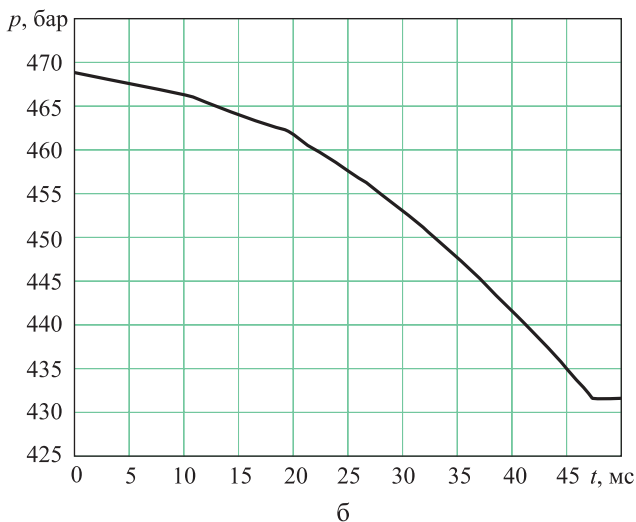
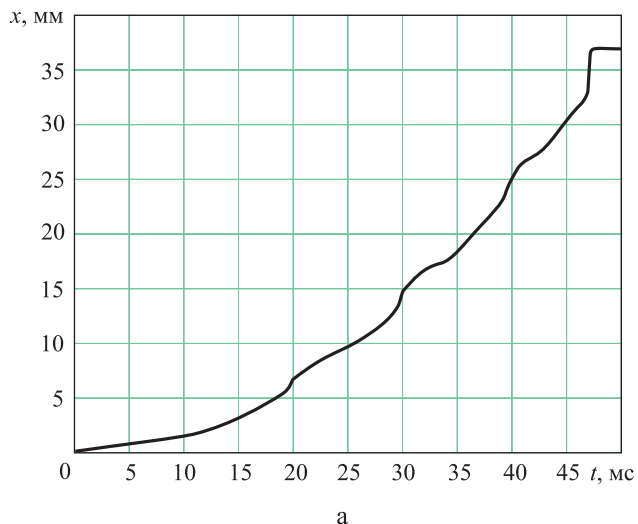


Рис. 6. Динамика хода штока (а) и изменения среднего статического давления (б) в рабочей камере пиропривода

лось время срабатывания (при погрешности порядка 4–5 %) и статическое давление (велся поиск его максимальной величины, погрешность, вызванная различиями в процентном содержании компонентов топлива, достигала 12 %, что принципиально не влияло на работоспособность устройства).

Правдло Михаил Натанович – доктор технических наук, директор научно-исследовательского и летно-испытательного центра АО «Гос МКБ «Вымпел» им. И. И. Торопова», г. Москва.

Область научных интересов: динамика полета объектов управления, динамика сложных механических систем в составе авиационных комплексов.

Любимова Наталья Андреевна – инженер-математик третьей категории АО «Гос МКБ «Вымпел» им. И. И. Торопова», г. Москва.

Область научных интересов: тепломассообмен, газовая динамика, динамика сложных механических систем в составе авиационных комплексов.

Заключение

По результатам численного моделирования определены основные закономерности работы пиропривода. Анализ закономерностей работы модели с распределенными параметрами, рассмотренной в данной статье, позволяет сделать заключение о принципиальной возможности построить на ее базе инженерную модель с сосредоточенными параметрами, которая более проста и наглядна в реализации. В таких моделях отдельные области описываемой системы могут группироваться в подсистемы, состояние которых характеризуется единым для всей подсистемы набором параметров, не зависящих от пространственных координат. Однако при этом необходимо учитывать, что существенное влияние на газодинамику в пироприводе оказывают статическое давление в его рабочей камере и положение штока.

Список литературы

1. Быков Л. В., Молчанов А. М., Щербаков М. А., Янышев Д. С. Вычислительная механика сплошных сред в задачах авиационной и космической техники. М.: ООО «Ленанд», 2015. 668 с.
2. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.
3. Янышев Д. С. Применение функции Ламберта в теории турбулентного трения // Труды МАИ. 2012. № 50.
4. ANSYS FLUENT The Contents of the Other Manuals. URL: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node4.htm> (дата обращения 25.10.2017).

Поступила 04.10.16



Быков Леонид Владимирович – кандидат технических наук, директор института дополнительного образования, доцент кафедры «Авиационно-космическая теплотехника» Московского авиационного института, г. Москва.
Область научных интересов: высокоэнтальпийные течения, теплообмен, газовая динамика, турбулентность, аэродинамика летательных аппаратов.

Numerical investigation of gas dynamics in the pyro actuator found in the mechanism for unfolding aerodynamic surfaces

The article presents a mathematical model of a pyro actuator found in the mechanism for unfolding aerodynamic surfaces of aircraft, which includes a collector system. The mathematical model proposed takes into account linked gas dynamic processes in the internal pyro actuator chambers and the dynamics of its mechanical traveller. We supply results of numerically investigating the main parameters of working body flow, obtained by using the ANSYS software package.

Keywords: pyro actuator, gas dynamics, mathematical modelling.

Pravidlo Mikhail Natanovich – Doctor of Engineering Sciences, Director of the Research and Development and Flight Test Centre, Joint Stock company “State Machine Building Design Bureau “Vympel” by name I. I. Toropov”, Moscow.
Science research interests: flight dynamics of control objects, dynamics of complex mechanical systems forming part of aircraft systems.

Lyubimova Natalya Andreevna – Mathematician Engineer of the third rank, Joint Stock company “State Machine Building Design Bureau “Vympel” by name I. I. Toropov”, Moscow.
Science research interests: heat and mass transfer, gas dynamics, dynamics of complex mechanical systems forming part of aircraft systems.

Bykov Leonid Vladimirovich – Candidate of Engineering Sciences, Director of the Institute of Further Education, Associate Professor, Department of Aerospace Thermal Engineering, Moscow Aviation Institute, Moscow.
Science research interests: high-enthalpy flows, heat and mass transfer, gas dynamics, turbulence, aerodynamics of aircraft.