

УДК: 621.454.3.01

DOI: 10.53816/20753608_2022_1_72

**РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ВНЕШНЕЙ ЗАГЛУШКИ
ВОЗДУХОЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА РАКЕТНО-ПРЯМОТОЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ
НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ**

**CALCULATION OF THE DYNAMICS OF THE EXTERNAL PLUG
OF THE AIR INTAKE DEVICE OF A ROCKET-RAMJET ENGINE ON SOLID FUEL**

Чл.-корр. РАРАН В.А. Сорокин, П.В. Никитин, А.Ю. Беляков, А.Н. Логинов

АО «МКБ «Искра»

V.A. Sorokin, P.V. Nikitin, A.Yu. Belyakov, A.N. Loginov

В статье приведено обоснование перспективности использования ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе.

Описана конструкция, принцип действия и результаты расчета динамики работы внешней заглушки воздухозаборного устройства ракетно-прямоточного двигателя на твердом топливе. Результаты расчета динамики работы заглушки представлены в виде зависимостей от времени: давление в свободном объеме газогенератора, скорость перемещения основного и вспомогательного поршня, сила набегающего воздушного потока и основного поршня на заслонку, угол атаки заслонки.

Представлены исходные данные для моделирования и математическая модель процесса открытия внешней заглушки воздухозаборного устройства.

Применимость разработанной математической модели подтверждается результатами экспериментов.

Ключевые слова: динамическая модель, воздухозаборное устройство, внешняя заглушка, метод Эйлера, газодинамика процесса открытия заслонки, численное моделирование, прямоточный воздушно реактивный двигатель.

The article provides a rationale for the prospects of using rocket-ramjet engines on solid fuel. The design, principle of operation and results of calculating the dynamics of the operation of the external plug of the air intake device of a rocket-ramjet engine on solid fuel are described. The results of calculating the dynamics of the plug operation are presented in the form of time dependences: pressure in the free volume of the gas generator, the speed of movement of the main and auxiliary pistons, the force of the incoming air flow and the main piston on the damper, the angle of attack of the damper. The initial data for modeling and a mathematical model of the process of opening the external plug of an air intake device are presented. The applicability of the developed mathematical model is confirmed by the experimental results.

Keywords: air intake, external plug, Euler's method, gas dynamics of the damper opening process, numerical simulation, ramjet engine.

Одним из перспективных направлений развития ракетного вооружения является использование ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе (РПДТ) в качестве двигательных установок ракет различного назначения.

Это обуславливается тем, что возможность совершенствования ракетного вооружения за счет модернизации широко применяемых ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) практически отсутствует. РПДТ имеют преимущество

по сравнению с РДТТ в экономичности, за счет того, что большая часть окислителя, необходимый для горения топлива, берется из атмосферы, что позволяет значительно увеличить дальность полета ракеты [1–3].

Во время работы РПДТ наиболее сложным является момент перехода от стартового режима работы к маршевому. Одним из этапов этого перехода, которому посвящена данная статья, является процесс открытия внешней заглушки.

Внешняя заглушка предназначена для защиты внутренних элементов воздухозаборного устройства (ВЗУ) от внешних атмосферных факторов, она обеспечивает герметичность камеры дожигания во время стартового режима работы двигательной установки (ДУ). В открытом положении заглушка служит клином торможения для уменьшения скорости и увеличения давления набегающего потока воздуха [4, 5].

На рис. 1 представлена геометрическая схема заглушки, на рис. 2 — компоновочная схема заглушки.

Заглушка представляет собой кривошипно-шатунный механизм (рис. 2), состоящий из заслонки 1, основного поршня 2, вспомогательного поршня 3, тяги 4, рычага передачи нагрузки 5.

Заслонка имеет два клина торможения, количество изгибов (поверхность 6) равняется необходимому количеству скачков для торможения набегающего потока воздуха. Ее вращение осуществляется в осях вращения 7 на кронштейне 8.

Система поршней 2 и 3 работает от внутреннего давления газа, от инициатора (пиропатрона). При срабатывании пиропатрона в полости газогенератора 9 возникающее давление газов перемещает вспомогательный поршень 3, удерживающий основной поршень 2, который в свою очередь кинематически соединен с заслонкой. После сдвига вспомогательного поршня 3, поток газов проходит через открывшееся отверстие 10 сдвигает центральный поршень 2 в сторону задней части ВЗУ. Основной поршень 2 в результате сдвига тянет за собой рычаг передачи нагрузки 5 по направляющим 11. Рычаг передачи нагрузки 5 увлекая за собой тяги 4, вскрывает заслонку 1. Фиксируясь в отверстиях пластины 12 после вскрытия с помощью цилиндрических штырей, заслонка 1 формирует клин торможения набегающего потока воздуха.

Для оценки динамики процесса открытия заглушки воздухозаборного устройства РПДТ была разработана математическая модель. Данная математическая модель включает в себя газо-

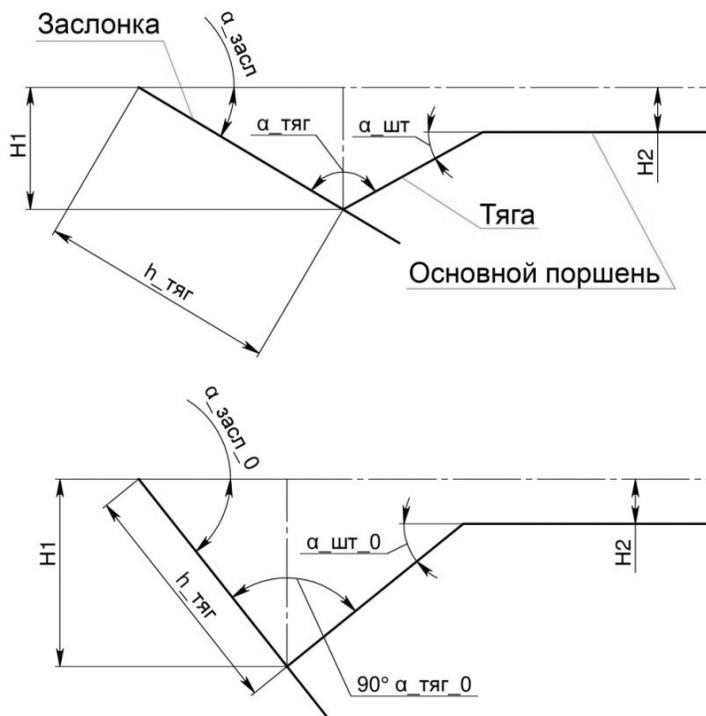


Рис. 1. Геометрическая схема заглушки

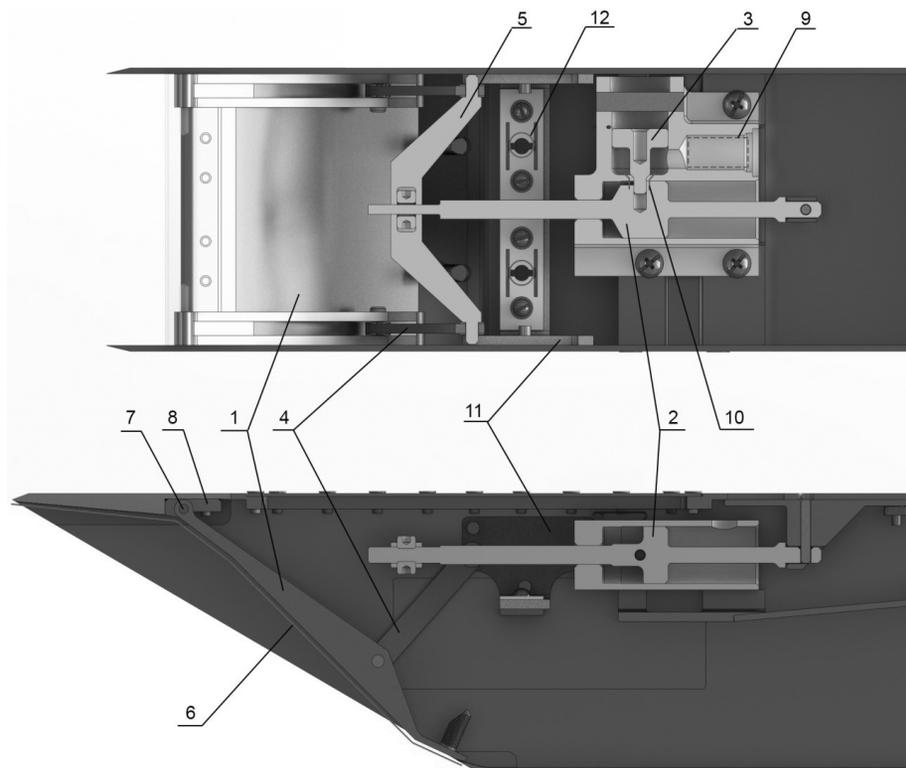


Рис. 2. Компонировочная схема заголовки

динамику процесса открытия заслонки, динамику перемещения механизма заслонки, основного и вспомогательного поршней [6–8].

Входными данными являются геометрические размеры и массы всех элементов конструкции, параметры набегающего потока воздуха, навеска пороха в пиропатроне, коэффициенты трения в механизмах привода заголовки.

Исходные данные для описания процесса открытия заголовки занесены в таблицу.

Газодинамика процесса открытия заслонки описывается следующим образом.

Система уравнений внутренней баллистики для продуктов сгорания пиропатрона во внутреннем пространстве вспомогательного и основного поршней [9, 10] имеет следующий вид:

$$\frac{dM}{dt} = G_{\text{пр}} - G_p; \quad (1)$$

$$\frac{d(ME)}{dt} = \eta_{\text{ТГ}} \cdot I_{\text{Т}} \cdot G_{\text{пр}} - I \cdot G_p; \quad (2)$$

$$\frac{dV_{\text{к}}}{dx} = u \cdot S_{\text{зар}}; \quad (3)$$

$$\frac{de}{dx} = u, \quad (4)$$

- где (1) — уравнение баланса массы;
 (2) — уравнение баланса энергии;
 (3) — уравнение изменения свободного объема;
 (4) — изменение свода горения.

Используя уравнение состояния идеального газа ($P = \rho \cdot R \cdot T$) найдем массу продуктов сгорания в камере газогенератора [11, 12]:

$$G_{\text{пр}} = P_{\text{пор}} \cdot u \cdot S_s; \quad (5)$$

$$G_p = A(\gamma) \cdot \frac{\Phi_{P_{\text{к}}} \cdot F_{\text{вых}}}{\sqrt{R \cdot C}}; \quad (6)$$

$$E = \frac{R \cdot T_{\text{к}}}{\kappa - 1}; \quad (7)$$

$$I = \frac{\kappa \cdot R \cdot T_{\text{к}}}{\kappa - 1}; \quad (8)$$

$$I_{\text{Т}} = \frac{\kappa \cdot R \cdot T_{\text{ТГ}}}{\kappa - 1}, \quad (9)$$

где (5) — газоприход с поверхности заряда пиропатрона;

(6) — расход продуктов сгорания через выходное отверстие;

(7) — внутренняя энергия продуктов сгорания;

(8) — энтальпия продуктов сгорания;

(9) — энтальпия порохового заряда.

Подставляя выражения (5), (6), (7), (8), (9) в уравнения (1), (2), (3) и (4) получим систему дифференциальных уравнений:

Таблица

Исходные данные для описания процесса открытия заслонки

Наименование физической величины	Обозначение	Значение
Начальный угол атаки заслонки, град	$\alpha_{\text{засл0}}$	40
Конечный угол атаки заслонки, град	$\alpha_{\text{заслК}}$	12
Площадь основного поршня, м ²	$S_{\text{осн}}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Площадь вспомогательного поршня, м ²	$S_{\text{всп}}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Площадь заслонки, м ²	$S_{\text{засл}}$	0,008
Площадь порохового заряда, м ²	$S_{\text{пор}}$	$9 \cdot 10^{-6}$
Площадь выходного отверстия, м ²	$S_{\text{вых}}$	10^{-4}
Плечо заслонки при передаче момента от набегающего потока воздуха, м	$h_{\text{засл}}$	0,04
Плечо передачи силы от заслонки к основному поршню, м	$h_{\text{тяг}}$	0,06
Ход основного поршня, м	$r_{\text{осн}}$	0,06
Ход вспомогательного поршня, м	$r_{\text{всп}}$	0,03
Масса основного поршня, кг	$m_{\text{осн}}$	0,13
Масса вспомогательного поршня, кг	$m_{\text{всп}}$	0,05
Масса заслонки, кг	$m_{\text{засл}}$	0,12
Число Маха набегающего потока	v_{∞}	2,3
Плотность воздуха, кг/м ³	ρ_{∞}	0,527
Масса пороха в пиропатроне, кг	$m_{\text{пор}}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$
Плотность пороха, кг/м ³	$\rho_{\text{пор}}$	600
Температура горения пороха, К	$T_{\text{гп}}$	2000
Скорость горения пороха при атмосферном давлении, м/с	u_0	0,008
Коэффициент скорости горения пороха	$k_{\text{п}}$	0,2
Начальный свободный объем газогенератора, м ³	$V_{\text{св}}$	$3 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент трения основного поршня	μ_3	1
Коэффициент трения вспомогательного поршня	μ_2	1
Коэффициент трения вспомогательного поршня об отверстие основного поршня	μ_1	1
Сила, которую необходимо приложить, чтобы срезать проволоку вспомогательного поршня, Н	$F_{\text{пор}}$	50
Расстояние от начального положения основного поршня до выходного отверстия для лишних продуктов сгорания, м	b	0,05
Длина заслонки, м	$l_{\text{засл}}$	0,08
Показатель адиабаты продуктов сгорания	κ	1,33

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_K}{dt} &= \frac{u \cdot S_{зар}}{V_{св}} \cdot (P_T \cdot \eta_{ГГ} \cdot \kappa \cdot R \cdot T_{ГГ} - P_K) - \\ &\quad - \frac{m \cdot P_K \cdot S_{вых} \cdot \kappa \cdot \sqrt{R \cdot T_K}}{V_{св}}; \\ \frac{dT_K}{dt} &= \left(\frac{P_T \cdot R \cdot u \cdot S_{зар} \cdot T_K}{P_K \cdot V_{св}} \right) \cdot (\eta_{ГГ} \cdot \kappa \cdot T_{ГГ} - T_K) - \\ &\quad - \left(\frac{T_K \cdot m \cdot S_{вых} \cdot \sqrt{R \cdot T_K}}{V_{св}} \right) \cdot (\kappa - 1); \\ \frac{dV_{св}}{dt} &= u \cdot S_{зар} + S_{всп} \cdot v_{всп} + S_{осн} \cdot v_{осн}; \\ \frac{dm_{пор}}{dt} &= P_{пор} \cdot u \cdot S_{зар}, \end{aligned} \right.$$

где

$$m = \sqrt{\kappa} \cdot \left(\left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \right);$$

$u = u_0 + k_n \cdot P_K$ — закон горения дымного пороха (P_K в размерности кг/м²);

$\eta_{ГГ}$ — коэффициент неполноты сгорания пороха (принимается равным 0,98);

T_K и P_K — температура и давление продуктов сгорания порохового заряда в области поршней;

κ — показатель адиабаты продуктов сгорания;

$T_{ГГ}$ — температура горения пороха;

$S_{зар}$, $S_{осн}$, $S_{всп}$ — площади поверхности горения заряда пороха, основного и вспомогательного поршней;

$V_{св}$ — свободный объем внутреннего пространства поршней;

$v_{всп}$, $v_{осн}$ — скорости перемещения основного и вспомогательного поршней;

R — газовая постоянная продуктов сгорания;

$S_{вых}$ — площадь выходного отверстия для выхода лишнего продукта сгорания, которое открывается при перемещении основного поршня на расстояние b .

Граничные условия для уравнений внутренней баллистики следующие:

$$P_K = P_\infty;$$

$$T_K = T_\infty;$$

$$V_{св} = V_{св0};$$

$$m_{пор} = m_{пор0}.$$

Динамика перемещения вспомогательного поршня описывается следующим образом:

$$\frac{dv_{всп}}{dt} = \frac{S_{всп} \cdot P_K - \mu_1 \cdot F_{засл} - \mu_2 \cdot v_{всп}}{m_{всп}};$$

$$\frac{dx_{всп}}{dt} = v_{всп};$$

$$M_{засл} = S_{засл} \cdot \sin \alpha_{шт0} \cdot \rho_\infty \cdot \frac{v_\infty^2}{2} \cdot \alpha_{засл};$$

$$F_{засл} = \frac{M_{засл}}{h_{тяг}} \cdot \cos \alpha_{шт0} \cdot \sin \alpha_{тяг0};$$

где $M_{засл}$ — момент аэродинамической силы, действующей на заслонку относительно оси открития заслонки;

$v_{всп}$, $x_{всп}$ — скорость и перемещение вспомогательного поршня;

$F_{засл}$ — сила, действующая на срез со стороны заслонки через основной поршень на вспомогательный поршень;

μ_1 — коэффициент трения выступа вспомогательного поршня об отверстие основного;

μ_2 — коэффициент трения штока о внутреннюю поверхность вспомогательного поршня;

$m_{всп}$ — масса вспомогательного поршня;

$\alpha_{засл}$ — угол атаки заслонки;

$\alpha_{тяг0}$ — угол между заслонкой и тягой;

$\alpha_{шт0}$ — угол между тягой и штоком основного поршня;

индекс «0» — означает начальный момент времени, индекс «к» означает конечный момент времени.

Вспомогательный поршень стопорится проволокой. Для того, чтобы он сдвинулся с места, необходимо, чтобы сила, действующая на срез проволоки превысила некоторую величину $F_{порог}$.

Граничные условия процесса перемещения вспомогательного поршня на начальный момент времени:

$$x_{всп} = 0;$$

$$x_{осн} = 0;$$

$$v_{всп} = 0.$$

Граничные условия процесса перемещения вспомогательного поршня на конечный момент времени:

$$x_{\text{всп}} = h_{\text{всп}}.$$

Динамика перемещения заслонки описывается следующим образом:

$$\frac{d\omega_{\text{засл}}}{dt} = \frac{M_{\text{засл}}}{I_{\text{засл}}} + F_{\text{осн}} \cdot h_{\text{тяги}} \cdot \sin \alpha_{\text{тяги}} \cdot \cos \alpha_{\text{шт}};$$

$$F_{\text{осн}} = S_{\text{осн}} \cdot P_{\text{к}} - \mu_3 \cdot v_{\text{осн}};$$

$$M_{\text{засл}} = S_{\text{засл}} \cdot \sin \alpha_{\text{засл}} \cdot P_{\infty} \cdot \frac{v_{\infty}^2}{2} \cdot h_{\text{засл}};$$

$$\frac{d\alpha_{\text{засл}}}{dt} = \omega_{\text{засл}};$$

где μ_3 — коэффициент трения штока основного поршня.

Углы между элементами конструкции заслонки определяются следующими соотношениями:

$$\alpha_{\text{шт}} = \arcsin \frac{H_1 - H_2}{h_{\text{тяги}}};$$

$$\alpha_{\text{тяги}} = 180 - \alpha_{\text{засл}} - \alpha_{\text{шт}};$$

$$H_1 = h_{\text{засл}} \cdot \sin \alpha_{\text{засл}};$$

где H_2 — расстояние от горизонтальной плоскости, содержащей ось заслонки до оси основного поршня.

Граничные условия процесса перемещения основного поршня на начальный момент времени:

$$\alpha_{\text{засл}} = \alpha_{\text{засл}0};$$

$$x_{\text{осн}} = 0;$$

$$v_{\text{осн}} = 0;$$

$$x_{\text{всп}} = r_{\text{всп}}.$$

Граничные условия процесса перемещения основного поршня на конечный момент времени:

$$\alpha_{\text{засл}} = \alpha_{\text{засл}к}.$$

Был проведен расчет математической модели динамики открытия заглушки методом Эйлера, в результате которого были получены зависимости, отображенные на рис. 3–10.

По результатам расчета на основе данной модели время открытия заглушки составляет 0,123 с.

В ходе стендовых испытаний вскрытия внешней заглушки РПДТ, проведенных АО «МКБ «Искра» в 2020 году, было зафиксировано время открытия заглушки около 0,12 с, что можно наблюдать по фото, представленных на рис. 11.

Стендовая установка имитирует летный вариант рукава воздухозаборного устройства, за исключением толщины стенок самого рукава.

Экспериментальная отработка вскрытия внешней заглушки РПДТ состояла из двух частей:

1. Испытания стенда с механизмом вскрытия без скоростного напора воздуха. Данные испытания подтверждают надежность стендовой установки и всех узлов механизма. Подобные испытания являются зачетными для дальнейшей отработки в условиях скоростного потока.

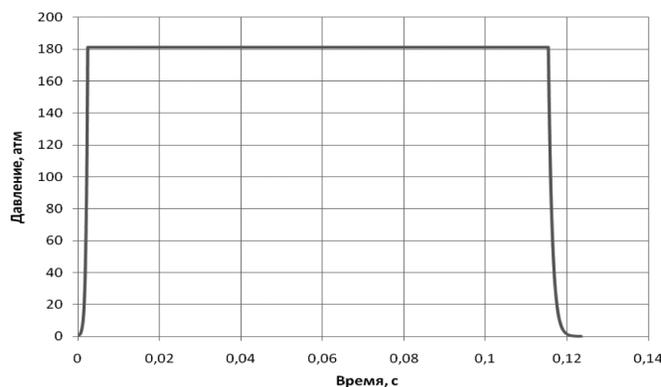


Рис. 3. Давление в свободном объеме газогенератора

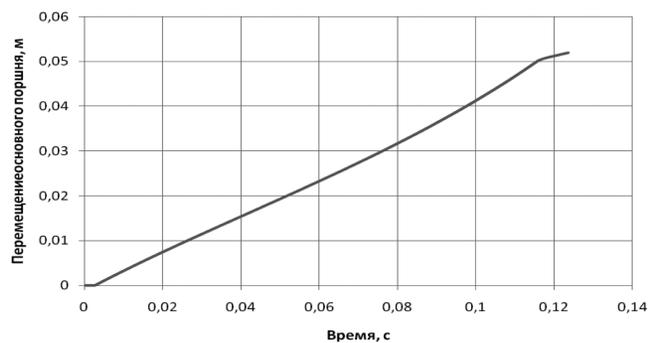


Рис. 4. Перемещение основного поршня

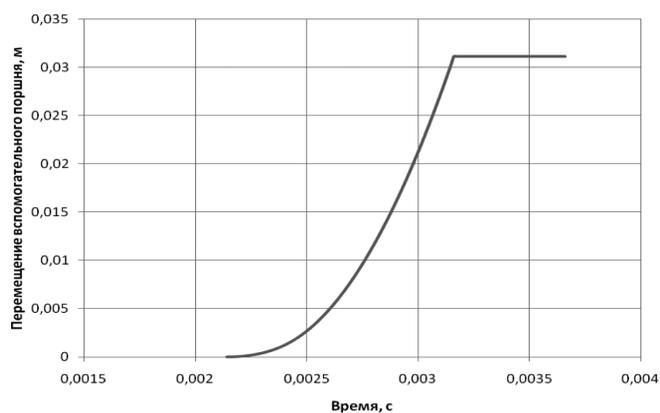


Рис. 5. Перемещение вспомогательного поршня

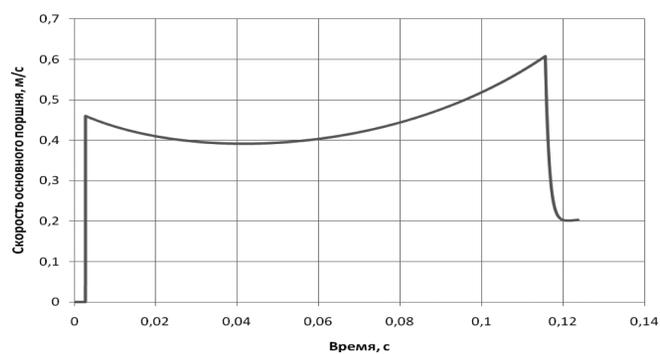


Рис. 6. Скорость основного поршня

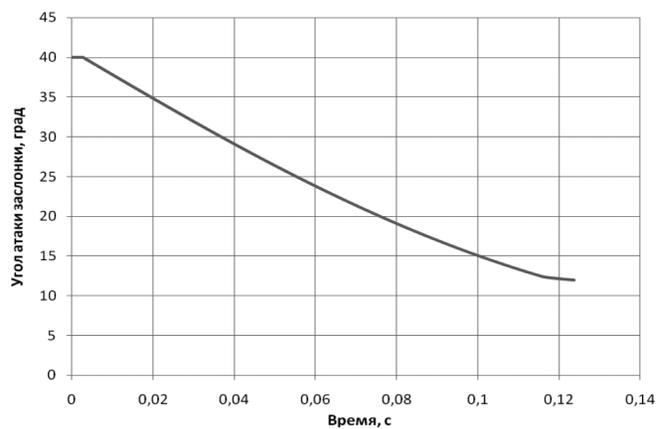


Рис. 7. Скорость вспомогательного поршня

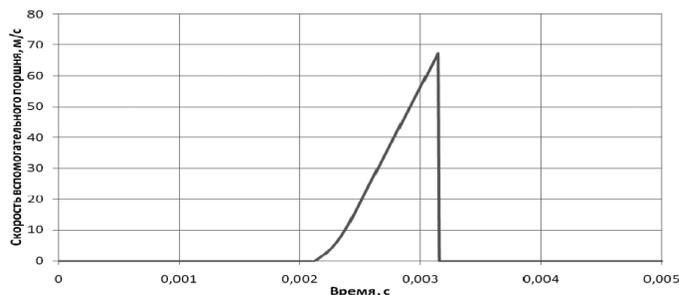


Рис. 8. Сила набегающего воздушного потока, действующая на заслонку

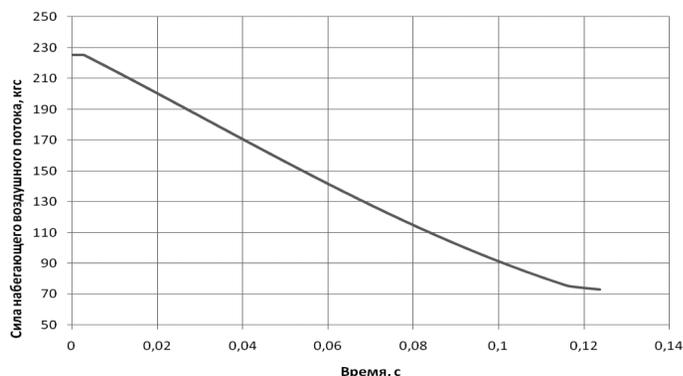


Рис. 9. Сила, действующая на заслонку со стороны основного поршня

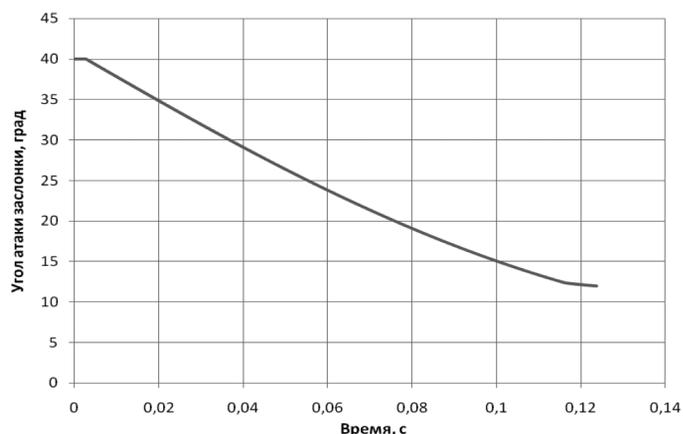


Рис. 10. Угол атаки заслонки

При проведении испытания механизм вскрытия аналогичный летному варианту. Для инициации давления в системе поршней используется пиропатрон.

2. Испытания стенда в условиях скоростного потока воздуха. Дополнительно к стенду крепится ступень имитирующая положение ВЗУ в скоростном потоке воздуха (угол скольжения и угол атаки, а также положение ВЗУ относительно ракеты носителя). При проведении испытания в качестве инициатора давления системы поршней используется пневматический электроклапан (ПЭК) вместо пиропатрона. ЭПК обеспечивает

давление системы поршней схожее с давлением пиропатрона и скорость прироста давления.

Результаты расчета с помощью созданной математической модели сходятся с результатами стендовых испытаний вскрытия внешней заглушки РПДТ.

Заключение

Основным преимуществом РПДТ по сравнению с РДТТ является их экономичность и повышенная эффективность. Применимость разработанной математической модели функциониро-

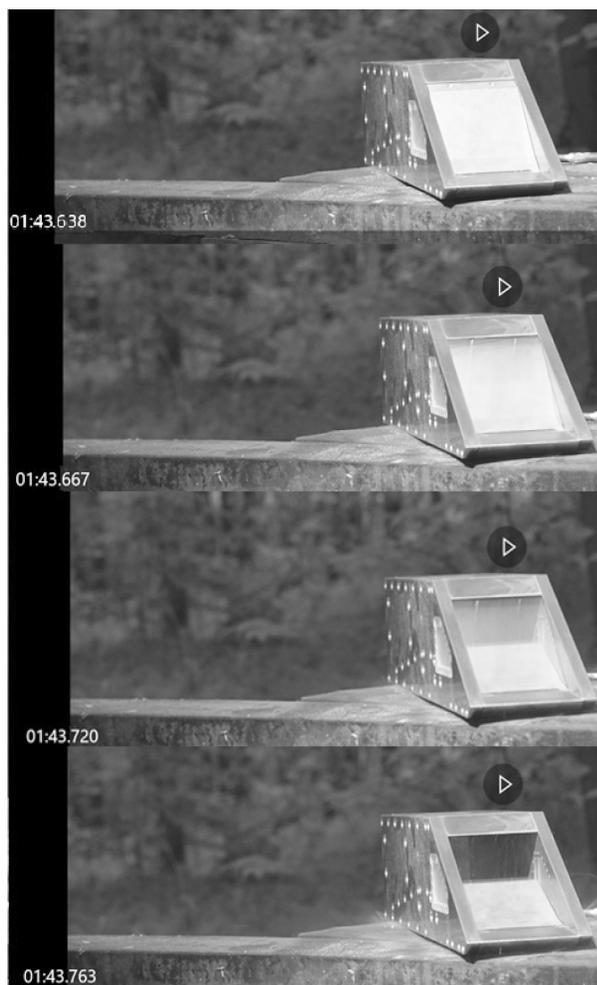


Рис. 11. Испытание вскрытия внешней заглушки РПДТ

вания внешней заглушки ВЗУ РПДТ в момент перехода от стартового режима работы РПДТ к маршевому подтвердилась в ходе стендовых испытаний вскрытия внешней заглушки РПДТ, проведенных в АО «МКБ «Искра». Также подтверждена работоспособность и перспективность конструкции и работы механизма вскрытия внешней заглушки РПДТ.

Литература

1. Сорокин В.А. Яновский Л.С. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2010. 320 с.

2. Сорокин В.А., Яновский Л.С. Проектирование и отработка ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. 320 с.

3. Обносов Б.В., Сорокин В.А. Конструкция и проектирование комбинированных ракетных двигателей на твердом топливе. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 304 с.

4. Сорокин В.А., Норенко А.Ю., Логинов А.Н., Федоров Д.Ю., Молодцов А.Н., Сомов О.В. Расчет и проектирование двухканального воздухозаборного устройства для современных ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2019. № 2 (107). С. 84–93.

5. Норенко А.Ю., Тихомиров М.А., Логинов А.Н., Кобко Г.Г., Мокрецова О.В., Сомов О.В. и др. Моделирование и результаты расчета перспективной конструкции воздухозаборного устройства для современных ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. № 3 (108). С. 76–81.

6. Заяц М.Л., Туркина Л.В., Прикладная механика. — Екатеринбург: УрГУПС. 2016. 238 с.

7. Козарев А.В., Механика. — Томск: «Эль Контент». 2012. 136 с.

8. Калинин В.В., Ковалев Ю.Н., Нестационарные процессы и методы проектирования узлов РДТТ. — М.: «Машиностроение». 1986. 110 с.

9. Панкратов Б.М. Основы теплового проектирования транспортных космических систем. — М.: «Машиностроение». 1988. 303 с.

10. Максимов С.Ф., Бобров А.Н., Антонов Ю.В., Исследование эффективности регулирования параметрами реактивных двигательных установок на комбинированных топливах // Наука и образование. 2015. № 11 (1). С. 267–275.

11. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. Справочник. — М.: «Машиностроение». 1989. 240 с.

12. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — М.: «Дрофа». 2003. 840 с.