

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТАРТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ РЕАКТИВНОЙ ТЕЛЕЖКИ

Введение

Наземная система ввода в полет беспилотного летательного аппарата (БЛА) в виде реактивной тележки представляет собой типичную расширительную машину с пиротехническим рабочим телом (рис. 1). Характерной проблемой для импульсных тепловых машин является переменный характер тягового усилия, передающегося на БЛА.

Одна из основных тактико-технических характеристик БЛА - предельно допустимая стартовая перегрузка, ограниченная свойствами бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО), прочностью конструкции и особенностями двигательной установки. Превышение перегрузки на 10...15% от предельно допустимого значения может привести к срыву полетного задания по причине отказа БРЭО. В период старта вероятность такого заброса перегрузки наиболее велика, поэтому расчет динамики старта БЛА с помощью пиротехнических средств является вполне актуальной задачей.

Многообразие конфигураций зарядов позволяет подобрать заряд твердого ракетного топлива (ТРТ), обеспечивающий теоретически любой вид циклограммы тяги и, следовательно, стартовой перегрузки. В стандартных методах расчета (не ориентированных на использование ЭВМ) применяются геометрические соотношения, специфические для конкретных типов конфигураций зарядов [1].

Нестационарные континуальные модели позволяют получить представление о пространственно неоднородном поле параметров в камере сгорания (КС) и, отслеживая индивидуальный характер выгорания каждой ячейки, рассчитать эволюцию выгорания пространственной шашки произвольной геометрии и в результате определить значительно уточненные тяговые характеристики РДТТ разгонной ступени, а также избежать нежелательных забросов параметров в КС.

Технология метода

Выбор формы порохового заряда зависит от вида желаемой циклограммы давления в КС. Наиболее предпочтительна в данном случае форма заряда с постоянной площадью горения в связи с тем, что при этом на циклограмме обеспечивается обширный участок постоянного давления. Постоянная тяга двигателя является оптимальной с точки зрения динамических характеристик [2]. Кроме того, подобный закон го-

рения является наиболее устойчивым вследствие равенства максимального и минимального давления в КС.

Даже незначительное варьирование конфигурации заряда ТРТ приводит к изменению площади горения и циклограммы тяги.

Технология адаптации формы заряда ТРТ к заданным динамическим характеристикам наземного пускового устройства (НПУ) включает в себя:

- 1) генератор пространственных масок объекта исследования на основе твердотельного образа, полученного в среде проектирования;
- 2) комплексно–сопряженную пространственно неоднородную газотермодинамическую и механическую модель рабочего процесса;
- 3) метод численного решения системы уравнений модели;
- 4) метод оптимизации динамических характеристик НПУ путем нормирования тягового усилия;
- 5) средства программной реализации технологии на языке высокого уровня.

Задача получения адаптивного тягового усилия решается при наличии эксплуатационных ограничений по ряду параметров:

- 1) стартовой перегрузке;
- 2) полному импульсу отдачи на элементы конструкции в передней мертвой точке направляющей;
- 3) форме и размерам зоны безопасности в случае сброса тележки;
- 4) длине направляющей.



Рисунок 1 – Старт БЛА «Пчела» с помощью реактивной тележки

Расчетный инструментарий

Адаптация газотермодинамической модели [3] к условиям эрозивного горения, а также топологическим свойствам объекта исследования (рис. 2) повлекла ряд доработок метода расчета и соответствующего алгоритма, не выходящих за пределы культивируемых принципов [4], но требующих специального изложения, представленного в данной статье.

Расчет заряда ТРТ на очередной итерации подразумевает внесение соответствующих изменений в геометрию. Ресурсоемкость всей технологической цепочки также зависит от затрат на генерацию очередной расчетной сетки. В связи с этим в методе использован автоматизированный пакет импорта твердотельного образа в сетку Mesh3D [5], совместимый со средой твердотельного проектирования SolidWorks.

Для описания скорости горения смесового топлива используется формула Саммерфилда, учитывающая наличие кинетической и диффузионной зон горения:

$$\frac{1}{u_0} = \frac{a}{p} + \frac{b}{\sqrt[3]{p}}, \quad (1)$$

где a , b – коэффициенты, определяющиеся кинетическими и диффузионными факторами.

Для учета эффекта увеличения скорости горения u_0 под действием обдувающего поверхность заряда потока горячего газа в выражение (1) вводится поправка:

$$u = (1 + \varepsilon)u_0, \quad (2)$$

где u – скорость горения при наличии эрозионного эффекта; ε – коэффициент эрозии (малый параметр).

Исходя из физического смысла эрозионных явлений следует полагать, что вынос массы определяется скоростью обдува поверхности w_3 , вязкими свойствами, характеризуемыми коэффициентом кинематической вязкости ν и характерным линейным размером канала, в качестве которого обычно выбирается гидравлический диаметр:

$$\tilde{d} = \frac{A}{4\Pi}, \quad (3)$$

где A – площадь сечения; Π – смачиваемый периметр канала.

Перечисленные факторы эрозионного процесса образуют по типу числа Виллюнова В.Н. [6] масштабное число Рейнольдса:

$$Re_3 = \frac{w_3 \tilde{d}}{\nu}, \quad (4)$$

которое, если принять

$$\varepsilon = Re_3, \quad Re_3 \ll 1, \quad (5)$$

позволяет единообразно учитывать радикальное изменение режима горения при очень малой скорости (саморазогревание конденсированной фазы) и при очень высоких скоростях обдува (газификация).

Для выявления постоянного закона горения среди имеющегося набора конфигураций шашек ТРТ (рис. 3) используется нормирование отклонения тяги РДТТ R_{\pm} относительно средней линии, соответствующей

постоянному значению предельно допустимой стартовой перегрузки неравновесного суммарного импульса тяги $n = const$:

$$\|(R_{\pm} - \bar{R})\Delta\tau_k\| = |R_{\pm} - \bar{R}|\Delta\tau_k, \quad (4)$$

где $\Delta\tau_k$ – интервал постоянства знака; \bar{R} – постоянная тяга РДТТ.

Оптимальной конфигурацией заряда ТРТ соответствуют минимальное значение неравновесного суммарного импульса тяги $R_{\pm}\Delta\tau_k$:

$$\frac{\sum \|(R_{\pm} - \bar{R})\Delta\tau_k\|}{\|\bar{R}\tau_k\|} \rightarrow min. \quad (5)$$

Таким образом, процесс нахождения геометрии порохового заряда для постоянного закона стартовой перегрузки сводится к пошаговой декомпозиции на основе газотермодинамической модели РДТТ [3], где число итераций соответствует количеству вариантов зарядов.

Недопустимо игнорировать влияние технологической заглушки, так как при ее наличии имеет место резкое страгивание БЛА с заданной перегрузкой. Как показал численный эксперимент, разрушение технологической заглушки происходит еще до момента достижения расчетного давления в КС по причине возникновения волны сжатия в начальный момент воспламенения заряда ТРТ.

Основной недостаток пиротехнических стартовых систем – сильное влияние температуры окружающей среды на режимы горения и, как следствие, – динамику разгона.

Результаты численного исследования

Пространственная газотермодинамическая модель РДТТ позволяет исследовать заряды ТРТ произвольной геометрии. Единственным ограничением на отображение сложных криволинейных поверхностей, связанное с применением грубых расчетных сеток, устраняется использованием маски направляющих свойств течения [7]. На рис. 4-7 показаны циклограммы тяги разнообразных видов зарядов согласно такой спецификации: 1 – равнолучевая четырехконечная звезда; 2 – крестовидный заряд наружного горения; 3 – внутренний цилиндрический канал; 4 – горения по наружной цилиндрической поверхности; 5 – всестороннего горения; 6 – торцевого горения; 7 – равнолучевая шестиконечная звезда.

После отделения БЛА от реактивной тележки последняя продолжает свое движение под действием силы инерции. Сброс тележки нежелателен в связи с необходимостью обеспечения значительной зоны безопасности из-за массивности отделяемых частей. Решить указанную проблему позволяет отказ от сброса тележки, что требует ее торможения в конце разгонного участка направляющей. Передача полного импульса тяги на направляющую недопустима, так как влечет за собой

разрушение элементов конструкции НПУ. Очевидно, что эластичный демпфер должен воспринимать только силу инерции после отсечки тяги РДТТ или после полного выгорания заряда. Таким образом, актуальной проблемой использования реактивных тележек является согласование времени работы РДТТ и длины направляющей. Предложенная модель реактивной тележки позволяет определить циклограмму тяги зарядов интересующей геометрии и, как следствие, - полный импульс отдачи, воздействующий на демпфер в установленный момент времени (рис. 4). Кроме того, представляется возможным рассчитать время горения заряда ТРТ при различных начальных температурах.

Среди множества исследованных зарядов с различными законами горения в наибольшей степени требованию обеспечения постоянного тягового усилия отвечает четырехлучевая звезда (рис. 4, поз. 1). После определения профиля заряда следует установление конкретных геометрических размеров – диаметра центрального канала, размера луча и его толщины, отвечающих наименьшему отклонению нормы регрессии (таблица). На рис. 5 изображены зависимости среднеинтегрального давления в КС РДТТ с зарядом ТРТ в виде четырехлучевой звезды различной геометрии согласно спецификации показанной на рис. 3.

Несмотря на криволинейный характер зависимости стартовой перегрузки, действующей на БЛА от пройденного пути, оптимальным стартовым параметрам в наибольшей степени соответствует поз. 4 на рис. 6. Об этом свидетельствует наименьшее значение среднего отклонения нормы регрессии (таблица) – 0,42 Н·м. Следует отметить уникальные динамические свойства реактивных тележек из-за обеспечения максимального значения перегрузки после прохождения половины разгонного пути.

На рис. 7 показаны параметры скорости движения реактивных тележек по длине направляющей. На рис. 7 поз. 4 в наибольшей степени отвечает требованию придания необходимой стартовой скорости БЛА (25 м/с) на заданном участке направляющей (3 м). Практически приближаясь к прямой зависимости, таким образом, данная характеристика соответствует наилучшей динамике разгона БЛА по направляющей.

Таблица – Норма регрессии совершаемой работы рассматриваемых конфигураций зарядов ТРТ согласно рис. 3

Отклонение нормы регрессии, $H \cdot m$	Поз. 1	Поз. 2	Поз. 3	Поз. 4
Положительное	9,21	10,21	4,86	5,39
Отрицательное	2,56	2,64	5,39	4,97
Разность	6,64	7,56	-0,53	0,42

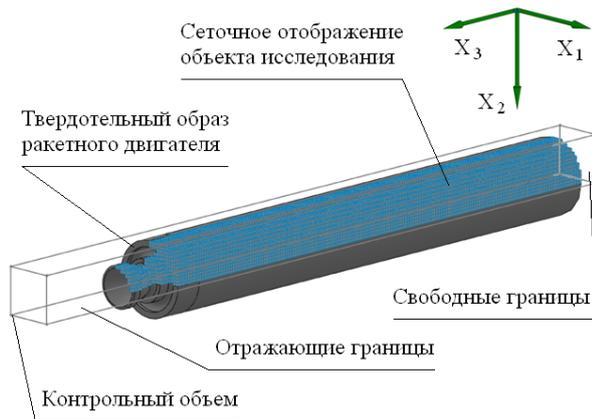


Рисунок 2 – Позиционирование твердотельной и поверхностной масок РДТТ в 3D расчетной области

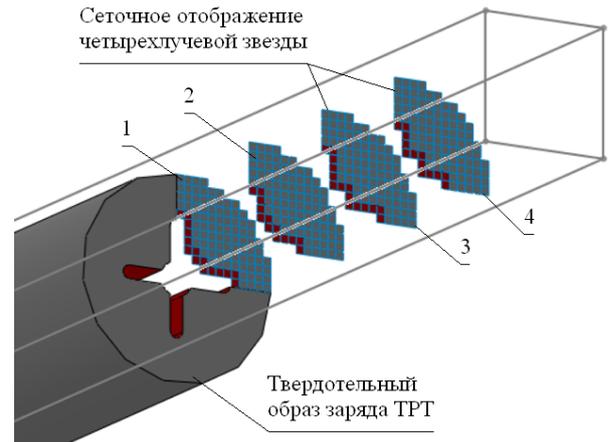


Рисунок 3 – Начальные конфигурации сечения исследуемых зарядов ТРТ

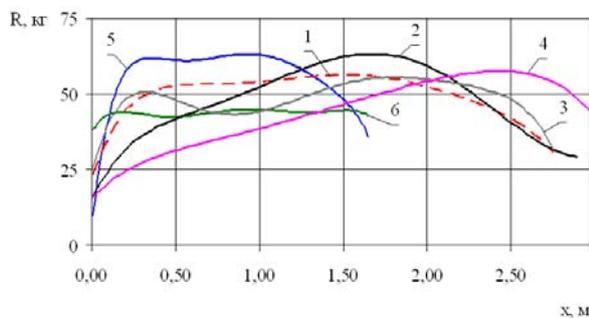


Рисунок 4 – Циклограмма тяги зарядов ТРТ различной геометрии

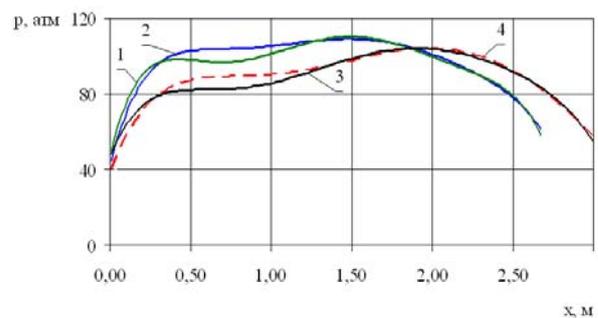


Рисунок 5 – Среднеинтегральное давление в КС реактивной тележки

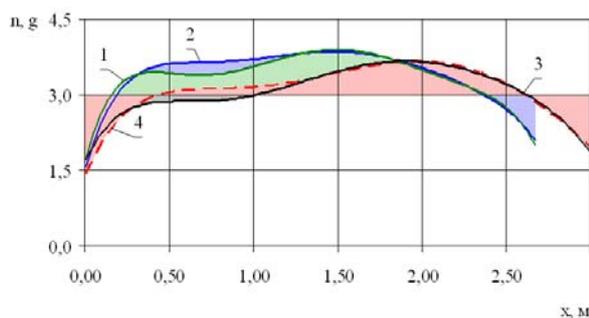


Рисунок 6 – Схема нормирования стартовой перегрузки

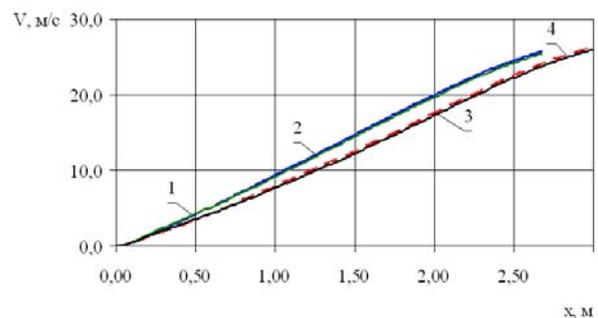


Рисунок 7 – Скорость разгона БЛА на направляющей

Заключение

Предложенный метод оптимизации позволяет подобрать путем последовательных итераций геометрию заряда ТРТ в зависимости от требуемых условий динамики разгона БЛА по направляющей.

Представленная технология опережающих численных исследований универсальна и область ее применимости не ограничивается под-

множеством реактивных тележек и может быть положена в основу модели запуска БЛА с поверхности с помощью стартового ускорителя.

Предложенная технология адаптации формы заряда ТРТ к заданным динамическим характеристикам НПУ на базе реактивной тележки позволяет радикально сократить ресурсоемкость разработки нового образца за счет сокращения объема натурной доводки.

Список использованных источников

1. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст] / В.Е. Алемасов, А.Ф., Дрегаллин, Тишин А.П. // 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 534 с.

2. Середа, В.А. Классификация законов распределения тягового усилия наземных пусковых устройств беспилотных летательных аппаратов [Текст] / В.А. Середа // Авиационно–космическая техника и технология. – 2010. – № 4 (71). – С. 63–66.

3. Амброжевич, М.В. Газотермодинамическая модель ракетного двигателя твердого топлива [Текст] / М.В. Амброжевич, В.А. Середа // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – Х., 2011. – № 1 (65). – С. 88-95.

4. Амброжевич, А.В. Комплексная траекторная модель летательного аппарата [Текст] / А.В. Амброжевич, В.А. Середа // Авиационно–космическая техника и технология. – 2008. – № 5 (52). – С. 40–44.

5. Ларьков, С.Н. Пакет программ Mesh3D. Версия 1.0. Руководство пользователя [Текст] / С.Н. Ларьков // Отчет о НИР. – Х.: ХАИ, 2007. – 14 с.

6. Виллюнов, В.Н. К теории эрозионного горения [Текст] / В.Н. Виллюнов // Доклады АН СССР. – 1961. – Т. 136. – Вып. 2. – С. 381–383.

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

Поступила в редакцию 04.06.2011 г.

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