

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО СТАРТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Введение

Фаза ввода в полет беспилотного летательного аппарата (БЛА) является одним из первостепенных факторов, критическим образом определяющим его траекторные характеристики. Для ввода в полет БЛА с поверхности используются наземные пусковые устройства (НПУ) – системы, обеспечивающие придание БЛА необходимой скорости на коротком участке траектории за счет внешнего подвода энергии [1].

Существует широчайшее многообразие НПУ (катапульт), механизм создания тягового усилия которых основан на различных физических принципах, ориентированных на обширный диапазон взлетных масс БЛА [2]. Однако запуск ударно-разведывательных БЛА с характерной массой свыше 250 кг с поверхности с помощью пиротехнических средств является безальтернативным.

К пиротехническим типам старта БЛА с поверхности относятся: газодинамический, минометный, с помощью стартового ускорителя и реактивной тележки (рис. 1). Характерной особенностью каждого из них является создание тягового усилия (реактивной струи или трансмиссии расширительной машины) за счет сгорания заряда твердого ракетного топлива (ТРТ).

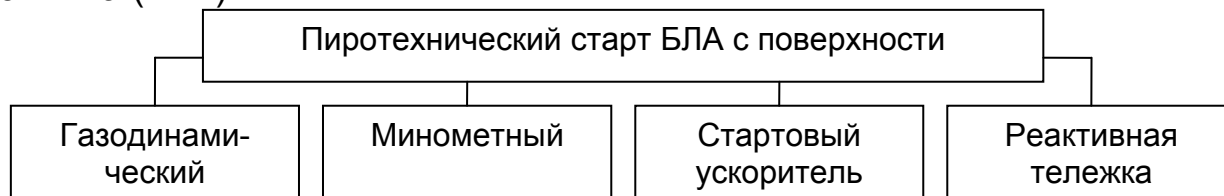


Рисунок 1 – Способы ввода в полет БЛА с поверхности с помощью пиротехнических средств

Причем закон тяги отражает в первую очередь геометрия пороховой шашки, которая определяет динамические характеристики начальной траекторной фазы. В данной статье представлен анализ формы заряда с позиции обеспечения наилучших динамических характеристик НПУ, а также получена оптимальная конфигурация ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) реактивной тележки.

Газодинамический старт

Строго говоря, газодинамический старт БЛА с балочного держателя не относится к катапультному, т. к. ввод в полет

осуществляется за счет внутренней энергии маршевой ступени РДТТ (рис. 2, а). По этой причине проблематика безопасного старта с поверхности, например, конверсионных образцов ракет «воздух-воздух» (AIM-7, AIM-9, AIM-120 и т. д.) становится еще более актуальной.

Газодинамический старт отличается особо коротким участком разгона, который определяется расстоянием между бугелями. В связи с этим для исключения просадки и сваливания БЛА после схода с направляющей тяговооруженность должна быть достаточно высокой. Поэтому в качестве ТРТ при газодинамическом старте применяют заряды с каналами в виде разнолучевых звезд, обеспечивающие значительный импульс тяги и близкий к нейтральному закон на участке эффективного горения.

Минометный старт

Минометный старт является одним из способов газового катапультирования БЛА из глухой трубы – транспортно-пускового контейнера (ТПК) – за счет энергии одного или нескольких пороховых аккумуляторов давления (рис. 2, б). Участок разгона в системах минометного старта ограничен габаритами ТПК, длина которого редко превосходит продольный размер БЛА.

Для выполнения требования обеспечения постоянства давления на днище поддона в условиях увеличения объема ТПК (иногда в 50 – 100 раз по сравнению с начальным [3]) необходим заряд ТРТ с прогрессивным газоприходом. Высокую степень прогрессивности закона обеспечивают многоканальные моноблоки с цилиндрическими каналами или в виде концентрических щелей.

Стартовый ускоритель

В отличие от других типов НПУ полезной функцией порохового ускорителя является не только придание кинетической, но также и потенциальной энергии БЛА (рис. 2, в). Выведение аппарата на высоту обеспечивается значительными углами пуска ($\sim 30^\circ$ и более) [2]. Это делается в ущерб скрытности старта, т. к. световой эффект при значительном возвышении БЛА над линией горизонта становится более заметным.

Для сокращения зоны безопасности и максимально возможного снижения заметности пуска требуется сброс ускорителя на минимальной высоте. При этом БЛА успеет набрать необходимую скорость, если на него будет действовать постоянная перегрузка. В связи с тем, что время работы стартового ускорителя гораздо больше остальных пиротехнических систем (до 2,5 с), наиболее подходящими являются

заряды торцевого или всестороннего горения с цилиндрическим каналом, обеспечивающие нейтральный закон.

Реактивная тележка

Отличительная особенность старта БЛА с помощью реактивной тележки заключается в действии тяги РДТТ только на участке направляющей (рис. 2, г). Сброса тележки после схода БЛА с балки зачастую не происходит: включается реверс тяги или срабатывает амортизатор («Строй-П» с БЛА «Пчела-1»). В связи с малым временем движения по направляющей (до 0,4 с) свод горения должен быть соответствующим.

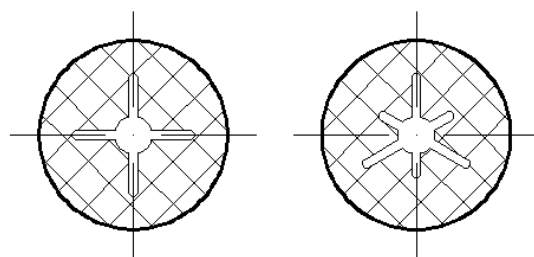
Исходя из характеристик старта РДТТ реактивной тележки должен обеспечивать высокий импульс при постоянном законе тяги. Максимально приближенный к нейтральному закону горения обеспечивают телескопические и щелевые заряды. В последних уменьшение площади секторов на участке со щелями компенсируется увеличением площади цилиндрического канала.

Бессопловой РДТТ пиротехнических НПУ

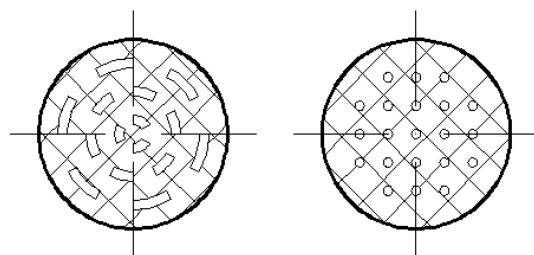
Как видно из анализа, каждый тип пиротехнического старта имеет свои специфические особенности и требует отдельной проработки. Однако большинству НПУ присущи малый свод горения, высокий импульс тяги и нейтральный закон горения. В ракетостроении указанные характеристики реализуют применением телескопических зарядов с каналами в виде звезд и торцевого горения. Но ни одна из указанных конфигураций ТРТ не может быть использована достаточно эффективно в пиротехнических НПУ по следующим причинам.

Сложная геометрия канала в виде звезд (особенно разнолучевых) в малом типоразмере зачастую нереализуема ввиду плохой формуемости топлива. Центральная вкладная часть телескопического заряда будет иметь низкую прочность из-за значительного удлинения и малой толщины свода горения. Для обеспечения необходимой номинальной тяги заряд торцевого горения требует значительного диаметра и поэтому вырождается в цилиндр с малым удлинением («таблетку»).

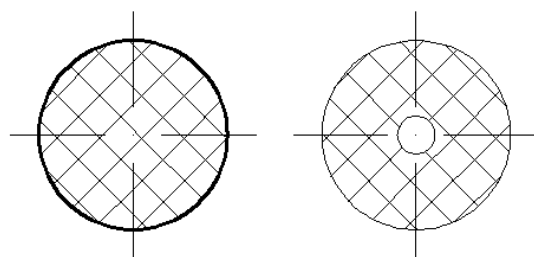
Кроме всего прочего, классический сопловой аппарат РДТТ с избыточной сверхзвуковой скоростью истечения продуктов сгорания в условиях глубоко дозвуковых скоростей перемещения БЛА обеспечивает низкий тяговый КПД. По этой причине предлагается в качестве пиротехнического НПУ использование бессоплового РДТТ с вкладным цилиндрическим зарядом внутреннего горения.



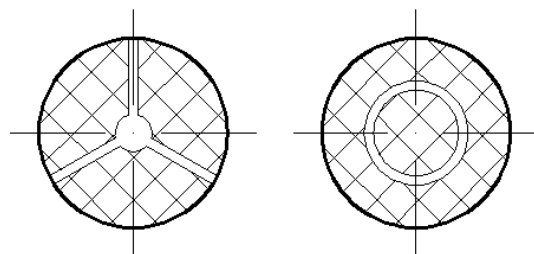
а



б



в



г

Рисунок 2 – Примеры пиротехнического старта БЛА с поверхности и соответствующие им конфигурации шашек ТРТ (бронированная поверхность указана толстой линией): а – газодинамический «Sea Sparrow AIM-7»; б – минометный «С-300»; в – с помощью стартового ускорителя «Hunter»; г – с помощью стартовой тележки «Пчела-1»

Как известно [3], у бесоплового РДТТ выходное сечение заряда является одновременно критическим, поэтому в процессе горения площадь сечения канала растет, а давление падает и тяга, определяемая их произведением, остается постоянной. Такая форма заряда обеспечивает надежную теплозащиту стенок камеры сгорания и обладает необходимой прочностью, а низкие скорости истечения продуктов сгорания обеспечивают высокий тяговый КПД транспортной системы.

Метод оптимизации пиротехнического НПУ

Любой объект техники может иметь множество параметров оптимизации, однако полезная функция устройства позволяет однозначно установить этот параметр. Независимо от типа старта пиротехническая система должна выполнять следующую полезную функцию: обеспечить начальную скорость V_0 (idem) БЛА определенной массы $m_{\text{БЛА}}$ (idem) в условиях ограничения стартовой перегрузки n_x (idem) на заданном участке разгона L (var):

$$\Pi = \{m_{\text{БЛА}}, n_x, V_0, L\}. \quad (1)$$

Таким образом, при прочих равных условиях наилучшими динамическими характеристиками обладает НПУ, которое обеспечивает выполнение полезной функции на минимальном участке разгона ($L \rightarrow \min$). Сведение участка разгона к минимуму позволяет повысить мобильность комплекса, скрытность пуска и сократить зону безопасности. Такое условие выполнимо только в случае обеспечения постоянного значения продольной стартовой перегрузки $n_x(t) = \text{const}$.

Стартовая перегрузка с точностью до константы определяется тяговым усилием РДТТ, которое в свою очередь обуславливается импульсом тяги ТРТ $R = JG$. В связи с тем, что сопло в рассматриваемом типе двигателя отсутствует, тяга будет определяться рядом параметров, взаимосвязь которых можно проследить на основании физико-математической модели высокой степени проработки (рис. 3). Подробно пространственная нестационарная модель РДТТ и ее возможности описаны в [5, 6].

В случае бесоплового РДТТ управляющим параметром в задаче оптимизации является отношение длины канала к его диаметру $\lambda = \frac{L}{D}$ (рис. 4). Критерием эффективности, позволяющим количественно произвести оценку проектного решения, является норма неравновесного суммарного импульса относительно средней линии, которая соответствует постоянному тяговому усилию:

$$\kappa = \frac{J_{\Sigma \pm}}{J_{\Sigma \max}} = \frac{\|(R_{\pm} - \bar{R})\Delta\tau\|}{\|\bar{R}\Delta\tau\|} \rightarrow 1, \quad (2)$$

где $\Delta\tau$ – интервал постоянства знака; $R_{\pm}$ – значение отклонения тяги; $\bar{R}$ – постоянная тяга РДТТ.

Таким образом, задача условной параметрической оптимизация пиротехнического НПУ сводится к отысканию такой геометрии канала λ , при которой суммарный импульс тяги $J_{\Sigma}(\lambda)$ приобретает максимальное значение в области допустимых решений $\lambda \in D$, задаваемых ограничениями типа неравенств по стартовой перегрузке и начальной скорости БЛА:

$$\begin{aligned} J_{\Sigma}(\lambda^*) &= \max_{\lambda \in D} J_{\Sigma}(\lambda); \\ n_x(t) &> n_{x \text{ пд}}(t); \\ V_0 &< V_{0 \text{ min}}. \end{aligned} \quad (3)$$

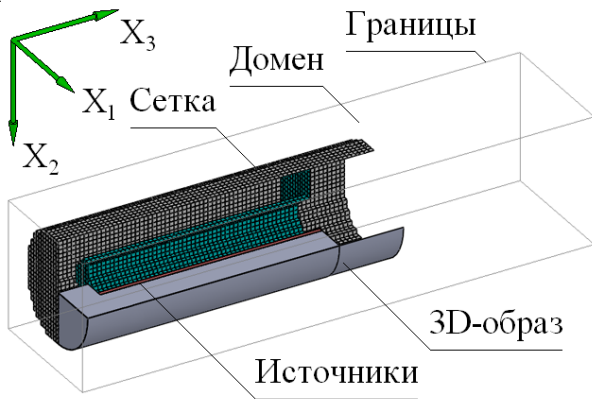


Рисунок 3 – Позиционирование твердотельной и поверхностной масок в 3D-расчетной области

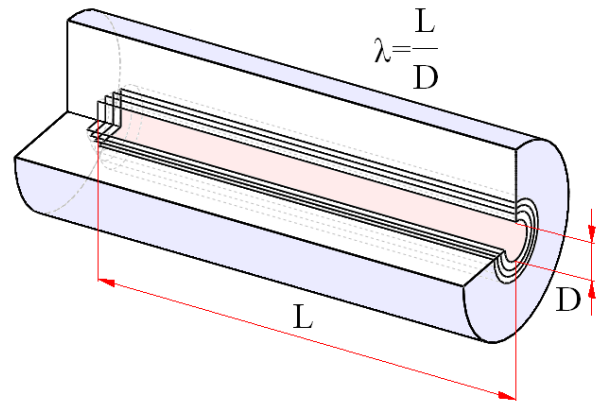


Рисунок 4 – Начальные конфигурации исследуемых зарядов

Оптимальная конфигурация НПУ

Модель и метод реализованы в виде законченного программного продукта на языке Visual Fortran, который позволяет в виде фазовых срезов рабочего процесса отслеживать параметры физических полей (давления, температуры, концентрации продуктов сгорания, скорости потока) в проточной части РДТТ и интегральные характеристики (рис. 5).

Давление на «срезе сопла» из-за значительной площади успевает выравниваться до величины давления окружающей среды (рис. 5), что указывает на расчетный режим работы реактивной тележки на протяжении всего рабочего цикла. Можно констатировать более благоприятные условия истечения для получения высокого пропульсивного КПД транспортной системы «НПУ-БЛА». Так, в конце участка разгона БЛА тяговый КПД примет значение 17,8 %.

Несмотря на малое время работы пиротехнических разгонных систем, важным аспектом их проектирования является тепловая защита корпуса РДТТ, адекватные меры по которой вырабатываются при наличии полей температуры. Расчет показывает, что в силу конструктивных особенностей (отсутствия заднего днища и наличие скрепленного заряда) бесопловой РДТТ полностью защищен от температурной эрозии (рис. 5).

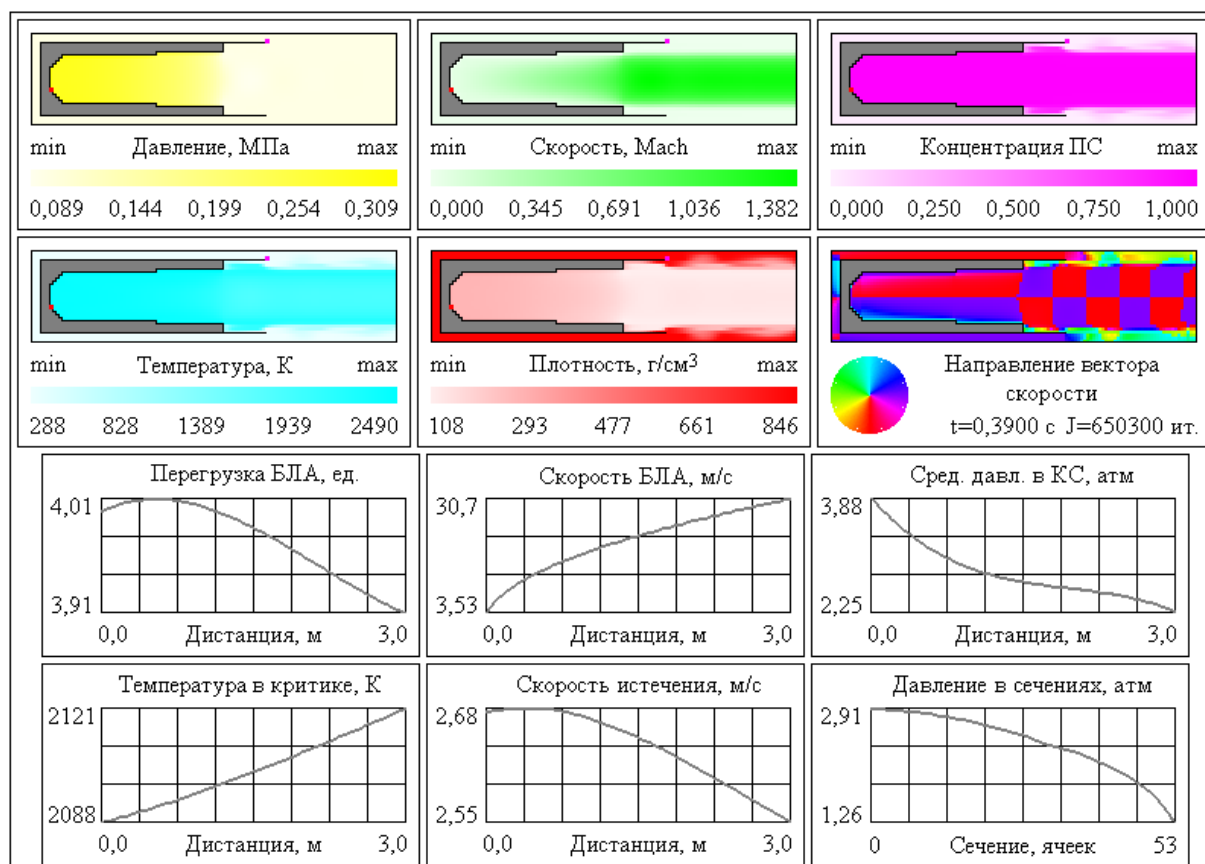


Рисунок 5 – Фазовый срез расчетной области реактивной тележки в момент схода БЛА с направляющей

В бесопловом РДТТ при варьировании соотношения длины канала к его диаметру тяговое усилие изменяется от слабо выраженного прогрессивного (рис. 6, поз. 0) к регрессивному (поз. 4). Дальнейшее увеличение соотношения калибров хотя и повышает стартовую перегрузку (за счет увеличения площади горения), но увеличивает регрессию. Поэтому оптимальная конфигурация ТРТ представляет собой компромисс по максимальной работе разгона БЛА при ограничении стартовой перегрузки.

Наилучшей динамике разгона БЛА по направляющей соответствует стартовая тележка, которая обеспечивает начальную скорость 30,8 м/с (рис. 6, поз. 4). Эти характеристики достигаются на минимальном участке разгона, равном 2,64 м, что на 12 % меньше по сравнению со стартовой тележкой, в которой заряд имеет длину равную

его калибру (поз. 0). В целом можно констатировать, что при любом соотношении калибров значительных отличий в динамике разгона БЛА не наблюдается (поз. 1 – 4), т. е. данный вид РДТТ отличается стабильностью характеристик.

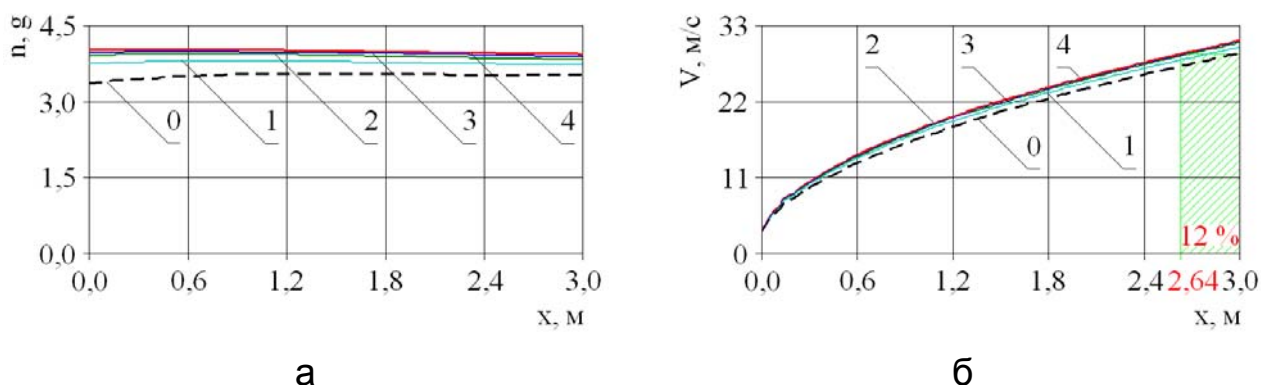


Рисунок 6 – Циклограммы динамических характеристик реактивной тележки при различных формах заряда:
а – стартовая перегрузка; б – скорость разгона БЛА

В качестве исходного образца был выбран заряд с относительным удлинением канала, равным единице (таблица). Удлинение канала проводилось при неизменном диаметре вплоть до двух калибров. Оценка совершенства выполнялась по нескольким параметрам: средней перегрузке, начальной скорости и коэффициенту полноты импульса тяги (2). Заряд относительным удлинением канала 1,83 в наибольшей степени отвечает требованию обеспечения максимального суммарного импульса тяги (на 98 %) при соблюдении заданного уровня перегрузки (4 g).

Интегральные показатели бесоплового РДТТ при различном соотношении длины к диаметру канала

Параметр	Номер итерации				
	0	1	2	3	4
Отношение длины к диаметру канала	1,00	1,22	1,37	1,57	1,83
Средняя перегрузка, g	3,51	3,79	3,91	3,97	4,00
Скорость схода БЛА, м/с	29,0	30,0	30,6	30,7	30,8
Коэффициент полноты импульса тяги	0,86	0,93	0,96	0,97	0,98

Заключение

Исходя из эксплуатационных соображений и принципа создания тягового усилия каждому типу пиротехнического НПУ соответствует наилучший тип геометрии ТРТ и закона горения. Однако в любом случае под оптимальными динамическими характеристиками старта

подразумевают выполнение полезной функции ввода в полет БЛА на минимальном участке разгона.

Технология получения оптимальных динамических характеристик пиротехнических систем старта универсальна для всех типов НПУ и сводится к нормированию импульса тяга, полученного на основании численного эксперимента путем нескольких итераций.

Предлагаемая нестационарная пространственная модель пиротехнического НПУ позволяет учитывать все основные критические факторы: эволюцию выгорания порохового заряда, условия внешнего и внутреннего обтекания, а также реакцию механической составляющей трансмиссии.

Список использованных источников

1. Большая советская энциклопедия [Текст] / гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е изд. // Т. 11. Италия – Кваркуш. – М.: Изд-во БСЭ. – 1973. – 608 с.
2. Середа, В. А. Формирование облика пускового устройства беспилотного летательного аппарата [Текст]: учеб. пособие / В. А. Середа, А. А. Цирюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 57 с.
3. Конюхов, С. Н. Минометный старт межконтинентальных баллистических ракет [Текст] / П. П. Логачев, С. Н. Конюхов. – Дн.: НАН, НКА Украины, Институт технической механики, 1997. – 212 с.
4. Ракетные двигатели [Текст] / Т. М. Мелькумов, Н. И. Мелик-Пашаев, П. Г. Чистяков, А. Г. Шиуков. – М.: Машиностроение, 1976. – 398 с.
5. 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. – Вып. 65 (1) – С. 88 – 93.
6. Амброжевич, М. В. Моделирование процесса в ракетном двигателе 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. – Вып. 66 (2) – С. 116 – 121.

Поступила в редакцию 15.07.2015.

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