

УДК 629.7.085.24

В. А. СЕРЕДА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА РАСШИРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ НА КОМПАКТНОСТЬ НАЗЕМНОГО ПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА**

*Описана проблематика наземных пусковых устройств (НПУ) с приводами от тепловых расширительных машин. Сформулирована полезная функция наземных катапульти и ее связь с длиной направляющей. Представлен специальный критерий для оценки совершенства рабочего процесса НПУ. Дано описание расчетного инструментария для проектирования компактных НПУ. Представлены результаты поиска рациональной емкости баллона по отношению к объему привода. Указаны основные технические ограничения на применение аккумуляторов высокого давления. Сделан вывод о невозможности достижения наибольшей компактности НПУ только за счет увеличения объема рабочего тела.*

**Ключевые слова:** пусковое устройство, расширительная машина, полнота совершенной работы.

**Введение**

Использование систем внешней энергетики для ввода в полет с поверхности беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с высокой удельной нагрузкой на крыло (например, мишеней, имитирующих крылатые ракеты) выглядит безальтернативным. К таким системам относится обширный класс [1] пусковых устройств (катапульти) в составе наземного комплекса с приводами от тепловых расширительных машин. В классе расширительных машин, наибольшее распространение получили пневматические катапульти, которые в отличие от пиротехнических имеют меньший разброс в начальной скорости БЛА при изменении параметров окружающей среды.

Действие расширительной машины обеспечивается рабочим телом, которое может генерироваться (пиротехнические) или храниться в готовом виде (пневматические). Объем запасенного рабочего тела в значительной степени будет определять работу по разгону БЛА вдоль направляющей, а полнота совершения работы – ее длину. В данной статье приведен анализ влияния относительного объема расширительной машины на компактность пневматического наземного пускового устройства (НПУ), под которой понимается длина разгонного участка БЛА.

**Полезная функция катапульти**

Полезная функция любого НПУ состоит в придании заданной кинетической энергии  $E_k = idem$  запускаемому объекту, т. е. БЛА определенной массы  $m_{БЛА}$  должен получить начальную скорость  $V_0$ . Этой формулировке эквивалентно утверждение, что привод расширительной машины НПУ должен со-

вершить работу по разгону БЛА с определенным усилием  $F$  вдоль направляющей  $L$ , т. е.  $A = FL$ .

С целью повышения компактности НПУ  $L \rightarrow \min$  фиксированное значение работы  $A = idem$  может быть выполнено за счет усиления привода. Однако величина тягового усилия  $F = m_{БЛА} n_x g$  ограничена предельно допустимой стартовой перегрузкой  $n_{х\text{пд}}$ . Поэтому минимальная длина направляющей может быть обеспечена только в случае создания приводом катапульти постоянного тягового усилия  $F = \text{const}$ .

$$\Phi = \{m_{БЛА}, V_0\}, \text{ при } n_x(x) \leq n_{х\text{пд}}, \forall x. \quad (1)$$

Основным параметром, оказывающим существенное влияние на закон распределения тягового усилия, является емкость баллона. Очевидно, что бесконечно большая емкость обеспечит идеально постоянное тяговое усилие, но реализовать на практике в классическом НПУ это не представляется возможным. Однако в вакуумном НПУ [2] бесконечно большой объем атмосферного воздуха совершает работу по перемещению поршня внутрь камеры, где создано разрежение.

Решим задачу поиска рациональной емкости баллона пневматической катапульти, которая обеспечит выполнение полезной функции  $\Phi$  при сохранении габаритов НПУ в разумных пределах. Кроме того, рациональная емкость баллона позволит провести дальнейшую оптимизацию НПУ минимальным набором средств модернизации трансмиссии или привода (в отличие от [2]).

При решении задачи целесообразно параметризовать облик пневматического НПУ с помощью безразмерных критериев (табл. 1). Для поиска рациональной емкости баллона воспользуемся определением относительного объема расширительной

машины  $\nu$ , который представляет собой отношение объема баллона  $W_B$  к объему цилиндра  $W_{Ц}$ .

$$\nu = \frac{W_B}{W_{Ц}} \quad (2)$$

В качестве предельного случая будем рассматривать НПУ с относительным объемом  $\nu = 1$ . Критерием оценки качества проектирования принимается коэффициент полноты совершенной работы – отношение действительной работы привода к идеальной, которая может быть получена с помощью баллона неограниченного размера  $\nu = \infty$ :

$$\kappa = \frac{A(\nu_d)}{A^*(\nu_\infty)} \quad (3)$$

### Расчетный инструментарий

По аналогии с [3] полный рабочий цикл НПУ отображается замкнутой нестационарной пространственно-неоднородной моделью, представляющей собой комплекс взаимосвязанных элементов: газодинамической подмодели процесса в цилиндре и подмодели динамики перемещения звеньев трансмиссии (рис. 1).

Математическое описание газодинамической подмодели основывается на консервативной форме записи системы уравнений пространственного течения среды в декартовых координатах, состоящей из уравнений законов сохранения массы, импульса (в проекциях на оси координат) и энергии. Система уравнений в тензорном виде имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_1 \vec{F})}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho w_2 \vec{G})}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho w_3 \vec{H})}{\partial x_3} = \sum_{n=1}^{M_M} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \vec{U} \right)_n + \sum_{m=1}^{M_C} \vec{\Delta}_m \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \vec{U} &= \{1, \omega, S, w_1, w_2, w_3, \varepsilon^0\}; \\ \vec{F} &= \left\{1, \omega, S, w_1 + \frac{p}{\rho w_1}, w_2, w_3, i^0\right\}; \\ \vec{G} &= \left\{1, \omega, S, w_1, w_2 + \frac{p}{\rho w_2}, w_3, i^0\right\}; \\ \vec{H} &= \left\{1, \omega, S, w_1, w_2, w_3 + \frac{p}{\rho w_3}, i^0\right\}; \\ \vec{\Delta} &= \left\{0, \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho S)}{\partial t}, f_1, f_2, f_3, \frac{\partial(\rho\varepsilon^0)}{\partial t}\right\}, \end{aligned}$$

где  $\vec{U}$  – тензор потоковых факторов;  $\vec{F}$ ,  $\vec{G}$ ,  $\vec{H}$  – тензоры конвективных и волновых факторов;  $w_1, w_2, w_3$  – компоненты вектора скорости;  $f_1, f_2, f_3$  – компоненты вектора напряженности поля массовых сил;  $\varepsilon^0, i^0$  – внутренняя энергия и энтальпия системы по полным параметрам;  $\omega$  – концентрация массы;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $S$  – энтропия;  $\vec{\Delta}$  – тензор «свободных» источников-стоков (ИС);  $M_M$  – общее число групп ИС, связанных с массопереносом;  $M_C$  – общее число «свободных» групп ИС.

Таблица 1

Безразмерное представление технических характеристик НПУ с пневматическим приводом

Физический параметр	Значение
Предельно допустимая перегрузка, ед	не более 4
Начальная скорость БЛА по отношению к эволютивной	не менее 1
Кратность полиспастного механизма	4:1
Отношение объемов баллона и цилиндра	$\nu$
Рабочее тело	воздух

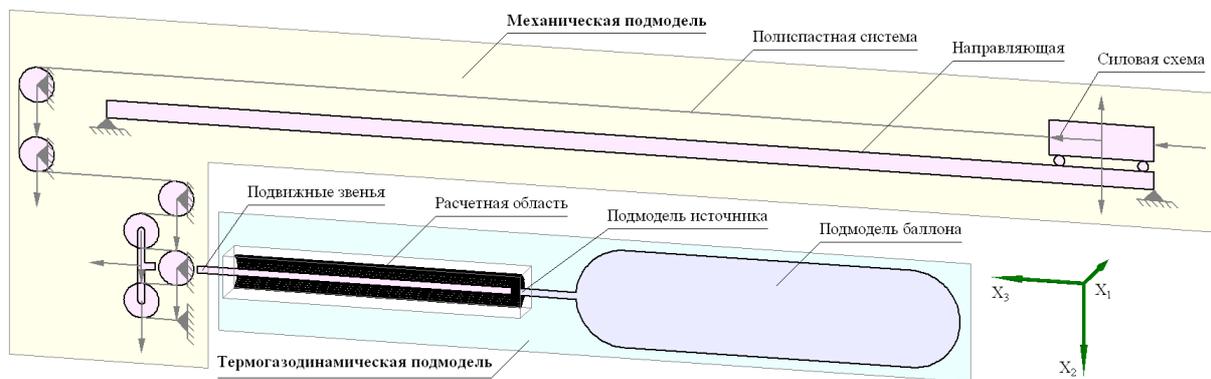


Рис. 1. Структура комплексной газодинамической и механической модели НПУ

В комплект условий однозначности уравнения (4) входят термическое и калорическое уравнения состояния, начальные и граничные условия, а также соотношения, определяющие интенсивности ИС. Математическое описание механической подмодели НПУ получено на основании уравнения Лагранжа II рода и представлено дифференциальным уравнением общего вида:

$$a[F(t)]\ddot{s} + c[F(t)]\dot{s}^2 = b[F(t)], \quad (5)$$

где  $a[F(t)]$ ,  $b[F(t)]$ ,  $c[F(t)]$  – заданные функции основных характеристик трансмиссии НПУ;  $s$  – координата подвижного звена механизма.

Для решения эволюционной задачи, заданной системой уравнений (4) и (5) при наличии условий однозначности, используется конечно-разностный метод С. К. Годунова, реализованный на регулярной сетке. Доминирующие факторы рабочего процесса НПУ представляются аппликацией особенностей вида ИС материальных субстанций двух типов: связанных с массопереносом и «свободных».

Параметры невозмущенного течения рассчитываются на основании решения задачи о распаде произвольного разрыва. На непроницаемых границах используется изэнтропическое решение задачи о взаимодействии однородного одномерного потока газа с преградой. Диссипативные свойства среды воспроизводятся путем нормирования аппроксимационной вязкости [4].

Моделирование подвода рабочего тела в крышку цилиндра подчиняется интегралу Эйлера. Откуда термическое уравнение состояния  $p = \rho RT$  позволяет определить плотность рабочей среды  $\rho$ , исходя из заданного давления в баллоне  $p_B$ . Чем определяется покомпонентный состав обобщенного потокового тензора уравнения (4) при условии изэнтропичности процесса и сохранения импульса скорости.

$$\vec{U} = \frac{\rho w \Delta}{\Delta V} \{1, S, 0, 0, w, \varepsilon^0\}, \quad (6)$$

где  $A$ ,  $\Delta V$  – площадь и объем зоны истечения газа из баллона;  $c_p$  – теплоемкость при  $p = \text{const}$ ;  $p_C$ ,  $p_B$  – локальное значение давления в цилиндре и баллоне.

Для верификации проектного инструментария использовались данные, полученные на основании серии натурных экспериментов с помощью НПУ Р12П фирмы «Ротор», имеющей 4 независимых баллона одинаковой емкости, способных подключаться в любой заданной последовательности.

Производился сравнительный анализ циклограмм перегрузки и скорости разгона БЛА, полученных в натурном эксперименте и предсказанных моделью. Можно заключить, что разработанный метод проектирования с приемлемой для ранних стадий НИОКР точностью воспроизводит динамические характеристики НПУ.

### Результаты расчета

Средства визуализации результатов, представляют собой специальную графическую оболочку анимационного сопровождения вычислительного эксперимента в реальном масштабе времени. Визуализация физических полей осуществляется путем отображения их актуальных состояний в виде цветных карт сечений расчетной области (рис. 2).

Получены динамические характеристики НПУ при условии удвоения емкости баллона, согласно геометрической прогрессии  $v_i = 2^{i-1}$ ,  $i = 1, \dots, n$  (рис. 3, 4). Расчеты проводились исходя из неизменного давления в баллонах, эквивалентного предельно допустимой стартовой перегрузке. Критерием окончания серии численных экспериментов ( $n = 8$ ) является достижение максимального коэффициента полноты совершенной работы, т. е.  $\kappa \approx 1$ .

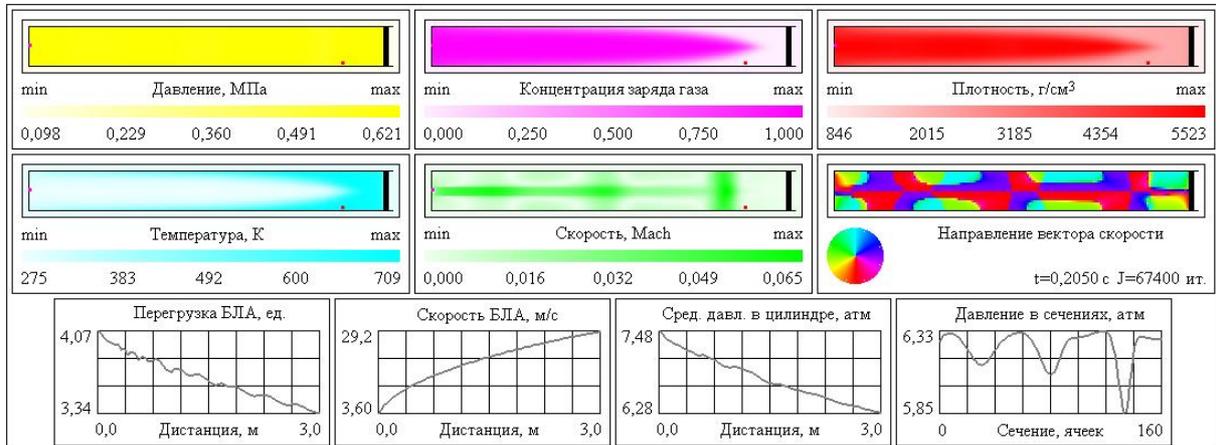


Рис. 2. Конечная фаза работы НПУ с многокаскадным пневмоприводом

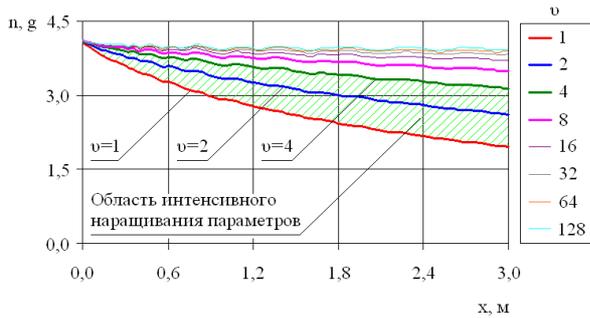


Рис. 3. Циклограммы стартовых перегрузок НПУ при различных емкостях баллона

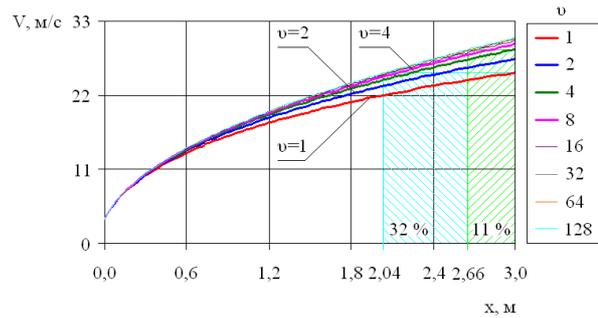


Рис. 4. Кривые динамики набора скорости БЛА вдоль направляющей

При равных объемах баллона и цилиндра наблюдается сильная регрессия закона тягового усилия (рис. 3). Начальная скорость БЛА в таком случае достигается на участке разгона максимальной длины направляющей требуется наращивание объема рабочего тела, т. к. коэффициент (3) не превышает 0,68 (табл. 2).

Расчеты показали, что НПУ с относительным объемом расширительной машины 128 реализует постоянный закон тягового усилия (табл. 2). Такое гипотетическое устройство обеспечивает придание заданной скорости скорости схода БЛА на укороченном участке направляющей на 32 % (рис. 4).

Очевидно, что столь значительная емкость баллона технически нереализуема, но эквивалентную массу воздуха можно поместить в баллон меньшего объема с более высокой компрессией. Т. е. идентичными динамическими характеристиками будет обладать катапульта на основе баллона с давлением 512 атм, объем которого равен объему цилиндра. Однако, положительный эффект достигается уже при давлении 128 атм (см. табл. 2)  $\kappa \approx 0,977$ .

Баллоны высокого давления хорошо освоены и широко применяются в газовой промышленности, но их транслирование в область систем ввода в полет затруднительно по ряду причин. Во-первых, в свободной продаже имеются баллоны до 40 л, а использование емкостей большего объема ограничено правилами Котлонадзора. Во-вторых, редукторы для понижения давления до допустимого уровня имеют высокую инерционность несовместимую с характерным временем срабатывания НПУ 0,2-0,4 с.

В-третьих, критический перепад давления может привести к возникновению скачка уплотнения в

магистральной подвода газа. В результате расход газа через критическое сечение будет неизменным и прогрессивного наполнения цилиндра рабочим телом не произойдет. Величина безопасного начального давления в баллоне, при котором исключается критический перепад, для рассматриваемого случая ограничена 18 атм.

Представляется рациональным интенсивное наращивание относительного объема расширительной машины до значения  $v = 4$  (рис. 3), т. к. дальнейшее увеличение нивелирует достигнутый положительный эффект по компактности НПУ. Вообще, наилучшее соотношение  $v$  не должно превышать передаточное число гибкой трансмиссии.

Дальнейшее повышение компактности НПУ должно лежать в русле экстенсификации рабочего процесса, т. е. глубокой модернизации трансмиссии или привода [2]. Одним из вариантов увеличения коэффициента  $v$  за счет сокращения объема цилиндра  $W_{ц}$  (в отличие от увеличения объема баллона  $W_{б}$ ) является использование гидротрансмиссии, как например в НПУ НР-2002 фирмы ESCO [5].

### Заключение

Наилучшими показателями компактности обладает НПУ, обеспечивающее максимальную полноту совершенной работы в условиях ограничения стартовой перегрузки. Увеличение запаса рабочего тела способствует повышению работы по разгону БЛА. Использование баллонов высокого давления в НПУ связано с рядом технических трудностей и представляется неэффективным. Рационально интенсивное наращивание емкости баллона в 4 раза по отношению к объему цилиндра.

Таблица 2

Интегральные характеристики НПУ при различных значениях объема баллона

$v$	$n, g$	$V, m/c$	$\kappa$	$p, atm$	$v$	$n, g$	$V, m/c$	$\kappa$	$p, atm$
1	2,72	25,3	0,680	4	16	3,85	30,1	0,962	64
2	3,19	27,4	0,797	8	32	3,91	30,3	0,977	128
4	3,52	28,8	0,880	16	64	3,94	30,4	0,985	256
8	3,73	29,6	0,932	32	128	3,96	30,5	0,999	512

## Литература

1. Valavanis, K. O. *Unmanned Aircraft Systems [Text]* / Kimon O. Valavanis, Paul Y. Oh, Les A. Pieggl // *International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles, UAV'08*. – Springer Science + Business Media. – 2009. – 532 p.
2. Сведения о НПУ и БЛА «Vulture» с сайта «Война в воздухе» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.spacewar.com/reports/South\\_African\\_Vulture\\_UAV\\_for\\_Production\\_999.html](http://www.spacewar.com/reports/South_African_Vulture_UAV_for_Production_999.html). – 15.12.2015.
3. Амброжевич, М. В. *Комплексное газодинамическое и механическое моделирование мотокомпрессорных воздушно-реактивных двигателей малых тяг [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.05; защищена 08.10.2004, утверждена 09.02.2005 / Амброжевич Майя Владимировна. – Х., 2004. – 186 с.*
4. Амброжевич, А. В. *Комплексная математическая модель ПуВРД малой тяги [Текст]* / А. В. Амброжевич, С. Н. Ларьков // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2004. – № 4. – С. 118-121.*
5. Fahlstorm, P. G. *Introduction to UAV Systems [Text]* / P. G. Fahlstorm, T. J. Gleason. – *Fourth Edition*. – John Wiley & Sons, Ltd, 2012. – 280 p.

Поступила в редакцию 21.01.2016, рассмотрена на редколлегии 14.04.2016.

### ВПЛИВ ВІДНОСНОГО ОБ'ЄМУ РОЗШИРЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ НА КОМПАКТНІСТЬ НАЗЕМНОГО ПУСКОВОГО ПРИСТРОЮ

*В. О. Серєда*

Описано проблематику наземних пускових пристроїв (НПУ) з приводами від теплових розширювальних машин. Сформульовано корисну функцію наземних катапульт і її зв'язок з довжиною напрямної. Наведено спеціальний критерій для оцінювання досконалості робочого процесу НПУ. Подано опис розрахункового інструментарію для проектування компактних НПУ. Представлено результати пошуку раціональної ємності балона по відношенню до обсягу приводу. Вказано основні технічні обмеження на застосування акумуляторів високого тиску. Зроблено висновок про неможливість досягнення найбільшої компактності НПУ тільки за рахунок збільшення обсягу робочого тіла.

**Ключові слова:** пусковий пристрій, розширювальна машина, повнота здійсненої роботи.

### INFLUENCE THE RELATIVE VOLUME AN EXPANSION MACHINE TO COMPACT GROUND LAUNCHING DEVICE

*V. A. Sereda*

Described problems of land-starting devices (GLD) with drives from thermal expansion of machines. Formulated useful feature catapults land and its relationship to the length of the guide. It presents a special criterion for the evaluation of perfection workflow GLD. A description of the design tools for the design of compact GLD. Presents the search results of a rational capacity the balloon in relation to the drive volume. Said main technical limitations to use of high-pressure accumulators. The conclusion about impossibility of achieving the highest compact GLD only by increasing the working fluid volume.

**Key words:** the launching device, the expansion machine, the fullness of accomplished work.

**Серєда Владислав Александрович** – канд. техн. наук, доц. кафедри Конструкції і проектування ракетної техніки, Национальний аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: sereda\_vlad@ukr.net.

**Sereda Vladislav Aleksandrovich** – Candidate of Technical Science, Associate professor, Department of Construction and design of missile technology, National Aerospace University named after N. E. Zhukovski «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: sereda\_vlad@ukr.net.

## References

1. Valavanis, K. O., Paul, Y. Oh, Les A. Pieggl, *Unmanned Aircraft Systems. International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles, UAV'08*, Springer Science + Business Media Publ., 2009. 532 p.
2. UAV News. South African Vulture UAV. Available at: [http://www.spacewar.com/reports/South\\_African\\_Vulture\\_UAV\\_for\\_Production\\_999.html](http://www.spacewar.com/reports/South_African_Vulture_UAV_for_Production_999.html) (accessed 15.12.2015).
3. Ambrozhevych, M. V. *Kompleksnoe hazodynamycheskoe y mekhanycheskoe modelyrovanye moto-kompressornikh vozduшно-reaktyvnykh dvyhateley malikh tyah*. Dys. ... kand. tekhn. nauk [The complex gasdynamic and mechanical modeling motocompressor jet of small thrust. Diss. ... cand. tech. sci.]. Nat. aerosp. univ. name N. E. Zhukovsky «Kh. aviat. inst.», 2004. 186 p.
4. Ambrozhevych, A. V., Lar'kov S. N. *Kompleksnaya matematycheskaya model' PuVRD maloy tyahy* [Complex mathematical model of a pulsejet small thrust]. *Electronic and computer systems*, 2004, no. 4, pp. 118-121. (In Russian).
5. Fahlstorm, P. G., Gleason, T. J. *Introduction to UAV Systems*. Fourth Edition, John Wiley & Sons, Ltd Publ., 2012. 280 p.