

УДК 629.7.085.24

## НАСТРОЙКА ПНЕВМОПРИВОДА НАЗЕМНОЙ КАТАПУЛЬТЫ НА ПОСТОЯННЫЙ ЗАКОН ТЯГОВОГО УСИЛИЯ

© 2013 В. А. Серeda

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», Украина

Представлен анализ баланса давлений в полостях пневмопривода наземного пускового устройства (НПУ, катапульта). Предложен метод оптимизации динамических характеристик НПУ путём подбора закона противодействия, который позволяет получить постоянный закон тягового усилия. Получен оптимальный диаметр проходного сечения клапана сброса давления в результате однопараметрического решения вариационной задачи. Представлены динамические характеристики исследуемых конфигураций катапульта и произведена оценка их динамических характеристик.

*Наземная катапульта, беспилотный летательный аппарат, клапан сброса давления, тяговое усилие, вариационная задача.*

### Введение

Одно из основных условий оптимизации динамических характеристик наземных пусковых устройств (НПУ, катапульта) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) состоит в обеспечении постоянства перегрузки в процессе старта. В классе НПУ, приводимых в действие импульсными тепловыми машинами (ИТМ), это условие может быть реализовано либо за счёт адаптивной характеристики трансмиссии, либо путём соответствующей организации газодинамического процесса в рабочем цилиндре.

Являясь механической составляющей НПУ, трансмиссия занимает значительную долю в общей массе конструкции и её габариты прямо пропорциональны энергетическим возможностям привода. Модернизация трансмиссии путём настройки на постоянный закон передачи тягового усилия не всегда целесообразна, т.к. влечёт за собой ещё большее увеличение массы всей конструкции, что негативно сказывается на характеристиках компактности и мобильности НПУ.

Преобразование тяги в результате газодинамической настройки может быть эффективно реализовано путём воздействия на составляющие, действующие в противоположном направлении главного

вектора силы. В области артиллерийского стрелково-пушечного вооружения проблема преобразования передаваемого усилия успешно решена с помощью различных амортизаторов, демпферов, тормозов и т.д. [1].

Принцип действия данных устройств заключается в создании силы сопротивления  $R(x)$  основному усилию  $F(x)$ , которая преобразуется в результирующее усилие в виде разности  $P(x) = F(x) - R(x)$ . В зависимости от назначения устройства и преследуемых целей представляется возможным получить результирующее усилие любого вида путём подбора соответствующего закона сопротивления  $R(x)$ . Этот опыт, направленный на получение оптимальных характеристик классических ИТМ, может быть успешно транслирован в область систем низкой баллистики, к которым относятся катапульти.

В статье рассмотрен способ влияния на динамические характеристики привода НПУ путём воздействия на силовой баланс ведущего звена (поршня) за счёт создания дополнительного сопротивления с целью получения закона тягового усилия, близкого к постоянному. Изложенный материал структурно дополняет комплекс мероприятий по приданию постоянного

тягового усилия привода в рамках метода оптимизации динамических характеристик НПУ [2].

### Принцип настройки привода

Большинство ИТМ наземных катапульт реализуется в виде пневматического линейного двигателя двустороннего действия с односторонним штоком (рис. 1). Для возврата в исходное положение подвижных звеньев ИТМ и создания усилия натяжения троса НПУ используется подача газа в запоршневое пространство с помощью золотникового распределителя (ЗРМ). В момент старта для быстрого опорожнения полости за поршнем используют клапаны быстрого сброса давления (КС), эффективность которых зави-

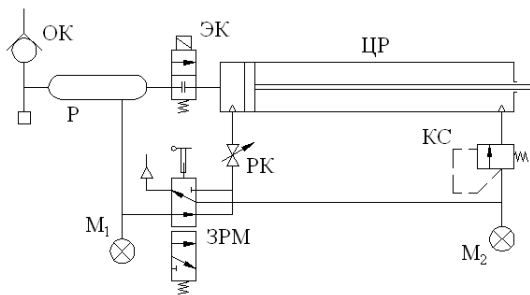


Рис. 1. Принципиальная пневмосхема катапульты:  
ОК – обратный клапан; Р – ресивер;  
ЭК – электрокран; РК – ручной кран;  
ЗРМ – золотниковый распределитель механический; КС – клапан сброса давления;  
ЦП – цилиндр рабочий; М1, М2 – манометры

В классическом пневматическом линейном двигателе клапан быстрого сброса давления понижает противодействие до уровня атмосферного  $p_{II}(x) = p_0 = 1 \text{ атм}$ , в результате чего результирующее давление выражается эквидистантой к давлению расширения (рис. 3):

$$p(x) = p_p(x) - p_0. \quad (1)$$

Отсюда тривиальным является утверждение, что для получения постоянного значения результирующего давления  $p(x)$  необходимо, чтобы противодействие было эквидистантно давлению расширения (рис. 4):

сит от подбора величины проходного сечения.

Для решения задачи настройки НПУ не требуется принципиально новых средств моделирования, т.к. конфигурация не имеет принципиальных отличий от классического пневмопривода. Необходимый для этого инструментарий с достаточной полнотой представлен в виде универсальной технологии численного моделирования НПУ [3]. На рис. 2 изображена расчётная область нестационарной газотермодинамической 3D модели пневмопривода НПУ разрешением  $24 \times 24 \times 170$  ячеек и пространственным шагом 0,005 м.

Расчёты проводились на базе программного комплекса, разработанного в среде программирования Compaq Visual Fortran.

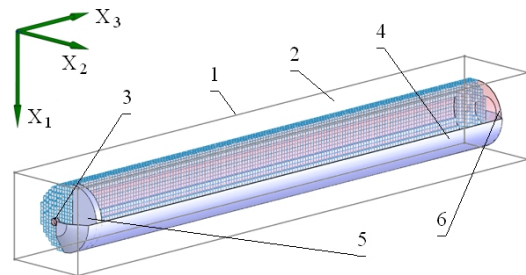


Рис. 2. Сеточное отображение объекта исследования в расчётной области:  
1 – контрольный объём; 2 – свободные границы;  
3 – распределённые особенности;  
4 – импортируемый твёрдый образ объекта; 5 – подвижные звенья системы;  
6 – начальное состояние

$$p_p(x) - p_{II}(x) = p(x) = \text{const}. \quad (2)$$

Такой закон сопротивления выражается в виде разности давления расширения на каждом временном слое  $p_p(x)$  и значением в конце рабочего цикла  $p_p(L)$  с учётом атмосферного давления  $p_0 = 1 \text{ атм}$  (рис. 4):

$$p_{II}(x) = p_p(x) - p_p(L) + p_0. \quad (3)$$

Таким образом, пространство за поршнем играет роль демпфирующей камеры, интегрированной в единый рабочий цилиндр.

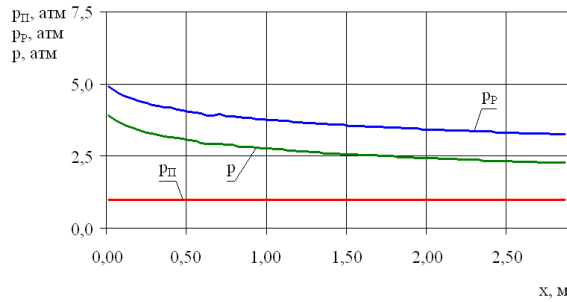


Рис. 3. Баланс давлений в классическом пневмоприводе

### Постановка задачи оптимизации

Диаметр проходного сечения клапана сброса давления  $d_{KC}$  при прочих равных условиях однозначно определяет закон истечения воздуха из запоршневого пространства и поэтому единственным образом устанавливает зависимость изменения противодействия  $p_{II}(x)$ .

Таким образом, задача оптимизации НПУ сводится к отысканию такой величины проходного сечения клапана сброса давления  $d_{KC}$ , при которой функционал длины направляющей  $J(L)$  приобретает минимальное значение с областью определения  $L \in D(J)$  [4]:

$$J(d_{KC}) = \inf_{L \in D(J)} J(L). \quad (4)$$

В приведённой формулировке вариационная задача (4) имеет дополнительные ограничения по стартовой перегрузке, минимальному диаметру клапана и начальному уровню давления ВАД:

$$\begin{aligned} n_x(x) &\leq n_{x \text{ доп}}; \\ d_{KC} &\leq d_{KC \text{ кр}}; \\ p_p(x) \Big|_{x=0} &\leq p_{\text{доп}}, \end{aligned}$$

где  $n_{x \text{ доп}}$  – предельно допустимый уровень стартовой перегрузки;  $d_{KC \text{ кр}}$  – критический диаметр сечения, при котором скорость истечения приближается к звуковой;  $p_{\text{доп}}$  – предельно допустимый уро-

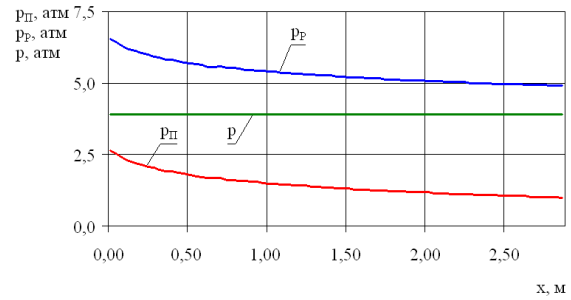


Рис. 4. Баланс давлений в пневмоприводе с сопротивляющейся воздушной полостью

вень давления в ВАД, установленный органами Котлонадзора.

Поиск оптимальных значений диаметра клапана проводился в несколько итераций с шагом 0,001 м (табл. 1) и последующим нормированием полученного тягового усилия согласно культивируемому методу [3] с помощью коэффициента полноты циклограммы тяги (КПЦТ), а также оценки начальной скорости БЛА.

Анализ показывает, что оптимальной является конфигурация НПУ с диаметром клапана сброса давления 0,27 дюймов (табл. 1, третья итерация), т.к. при этом имеется необходимая скорость ввода в полёт БЛА ( $V_{min} = 22 \text{ м/с}$ ) и сохраняется достаточно высокое значение КПЦТ. Уменьшение диаметра клапана ниже 0,23 дюймов (четвёртая – шестая итерации) ведёт к забросу тягового усилия в начальный момент времени выше допустимого значения  $n_{x \text{ доп}} = 4 g$ .

### Оптимальная конфигурация катапульты

Полученные в результате каждого приближения интегральные характеристики привода, а также динамические характеристики НПУ изображены на рис. 5-8.

Закон перегрузки отличается от идеального постоянного  $n_x(x) = const$  и имеет незначительный заброс в начале разгона (рис. 5, четвёртая – шестая итерации). Однако удаётся компенсировать падение перегрузки в конце рабочего цикла катапульты.

В результате оптимизации НПУ удаётся получить практически линейный закон набора скорости БЛА (рис. 6, третья итерация) и сократить участок разгона на 30% при гарантии достижения минимальной скорости ввода в полёт БЛА.

Кривые изменения давления расширения и сопротивления, соответствующие третьей итерации, эквидистантны (рис. 7), что делает закон изменения стартовой перегрузки наиболее близким к постоянному.

С уменьшением диаметра клапана сброса давления истечение газа в конце разгона происходит быстрее (рис. 8, четвёртая – шестая итерации), что приводит к быстрому падению тяги.

### Анализ физических полей пневмопривода

На рис. 9 представлен фазовый срез рабочего процесса на одной из итераций пневматической катапульты с демпфирующей камерой в конечный момент времени в виде карт физических полей основных параметров и интегральных характеристик.

Низкая дифференциация карт давления даёт основания судить об однородности физических полей в основной полости и запоршневом пространстве ИТМ, что свидетельствует о низкой интенсивности волнового процесса.

Таблица 1. Результаты однопараметрического метода оптимизации НПУ

№ п/п	Параметр	Итерация						
		0	1	2	3	4	5	6
1	Диаметр, м / дюйм	>0,5	0,38	0,31	0,27	0,23	0,19	0,15
2	КПЦТ	0,57	0,69	0,76	0,81	0,85	0,87	0,89
3	Скорость схода, м/с	18,7	19,8	21,7	23,2	24,2	25,0	25,5

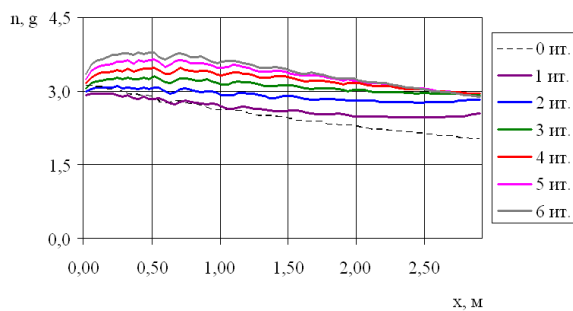


Рис. 5. Зависимость изменения стартовой перегрузки

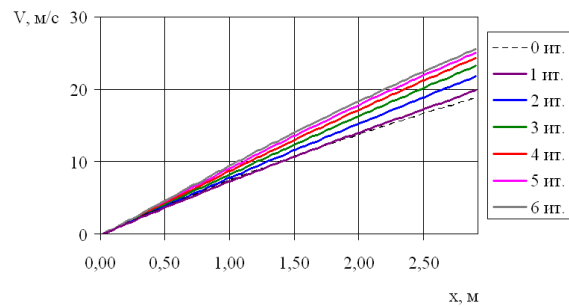


Рис. 6. Динамика набора скорости БЛА

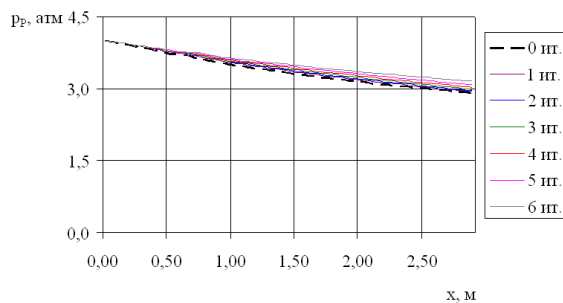


Рис. 7. Давление расширения

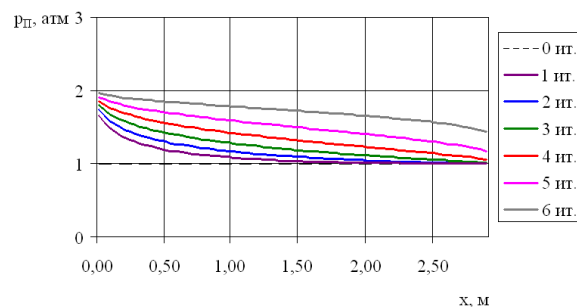


Рис. 8. Противодействие

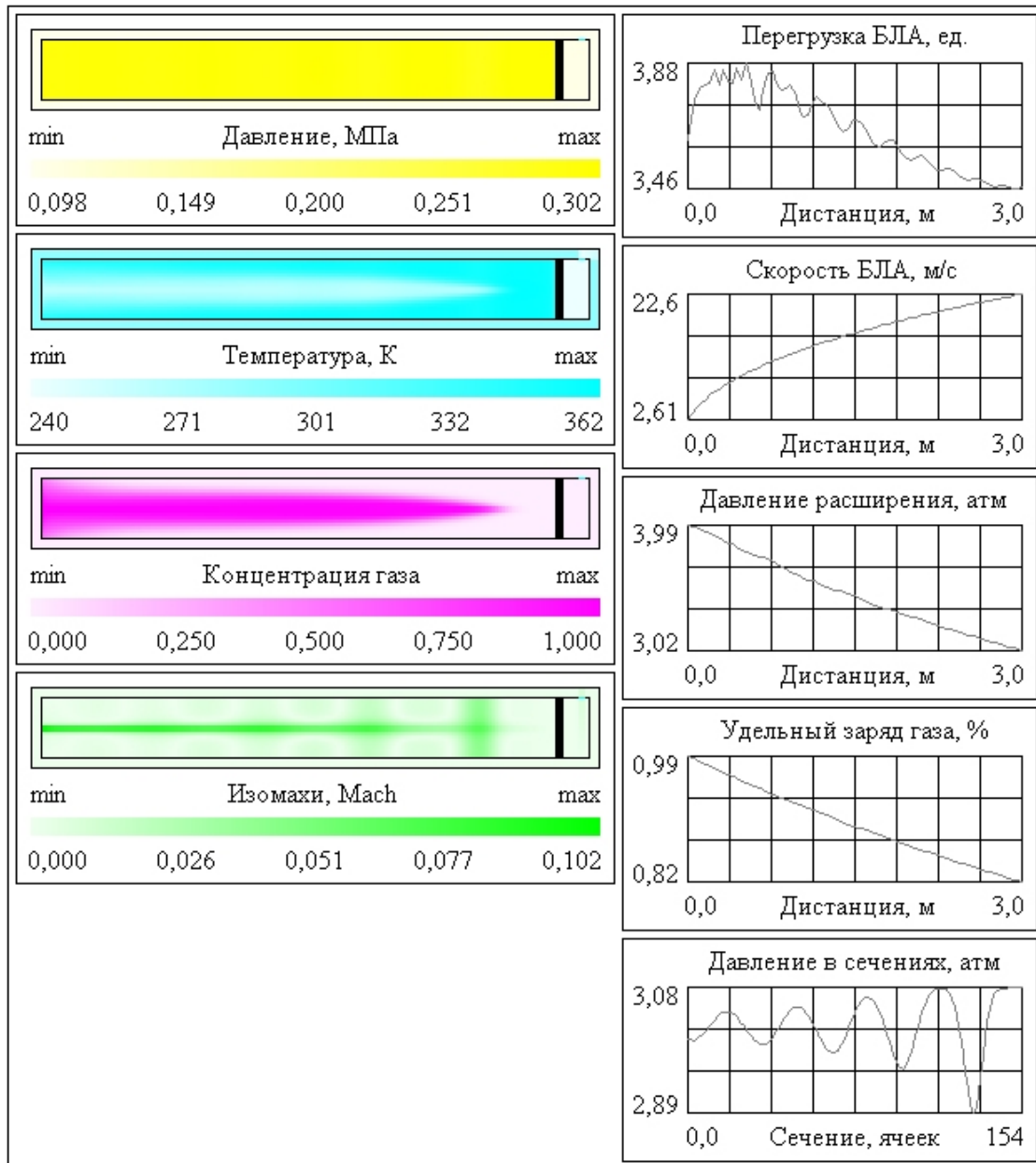


Рис. 9. Состояние в НПУ в конце рабочего цикла

За движущимся поршнем наблюдается локальное повышение температуры. Это приводит к увеличению скорости распространения волн разряжения и усилению амплитуды колебаний среды, что в целом выглядит не критично (рис. 9).

НПУ с демпфирующей камерой обладает наилучшими характеристиками заполнения цилиндра рабочим телом, т.к. движение поршня замедляется по причине повышенного сопротивления воздуха в пространстве за поршнем.

На протяжении всего времени работы устройства наблюдается истечение га-

за через окно сброса давления в дозвуковом режиме. Исключение составляет непродолжительный момент открытия клапана, когда скорость истечения близка к звуковой.

### Заключение

Состояние внутреннего течения не имеет принципиальных отличий от классической пневмокатапульты [3] и, тем не менее, обладает более совершенными динамическими характеристиками.

Использование пневмодемпферов для ввода в полёт тяжёлых БЛА требует

перехода на оборудование высокого давления (более 12 атм), что затруднительно в связи с необходимостью его лицензирования в органах Котлонадзора.

В целом, можно констатировать сложности в достижении идентичных законов  $p_p(x)$  и  $p_{II}(x)$  путём однопараметрического регулирования проходного сечения клапана сброса давления. Поэтому также не исключено варьирование величины начального уровня давления в запоршневом пространстве.

### Библиографический список

1. Серeda, В.А. Постановка задачи оптимизации наземных пусковых устройств [Электронный ресурс] / В.А. Серeda // Труды МАИ. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=44445>. – 25 ноября 2013. – № 70. – 10 с.

2. Соколов, И. А. Основания устройства и конструкция орудий и боеприпасов наземной артиллерии [Текст] / И.А. Соколов – М.: Военное изд-во Министерства обороны СССР, 1976. – 460 с.

3. Серeda, В.А. Оптимизация динамических характеристик катапульты с телескопическим приводом [Текст] / В.А. Серeda // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – Х., 2012. – Вып. 2 (70) – С. 34-41.

4. Серeda, В.А. Комплексно-сопряженная модель вакуумного наземного пускового устройства легкого беспилотного летательного аппарата [Текст] / В.А. Серeda // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 3 (80). – С. 30-36.

5. Мышкис, А.Д. Математика для втузов. Специальные курсы [Текст] / А.Д. Мышкис – М.: Наука, 1971. – 632 с.

## ADJUSTMENT OF THE PNEUMATIC DRIVE OF A GROUND CATAPULT TO THE PERMANENT LAW OF TRACTIVE FORCE

© 2013 V. A. Sereda

National Aerospace University  
named after N. E. Zhukovski «Kharkov Aviation Institute», Ukraine

The paper presents an analysis of pressure balance in the pneumatic drive of a ground launching device (GLD, catapult). A method for optimizing the dynamic characteristics of GLD by choosing the counter pressure law is proposed that makes it possible to obtain a permanent traction law. An optimal diameter of the opening area of the depressurization valve is obtained as a result of one-parameter solution of a variational problem. The dynamic characteristics of the catapult configuration being tested are presented and evaluated.

*Ground catapult, unmanned aircraft, depressurization valve, propulsion thrust, variational problem.*

### Информация об авторе

**Серeda Владислав Александрович**, кандидат технических наук, ассистент кафедры ракетно-космических двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». E-mail: [sereda\\_vlad@ukr.net](mailto:sereda_vlad@ukr.net). Область научных интересов: наземные пусковые устройства беспилотных летательных аппаратов.

**Sereda Vladislav Alexandrovich**, candidate of engineering, assistant professor of the department of space-rocket engines and aircraft power plants, National Aerospace University named after N. E. Zhukovski «Kharkov Aviation Institute». E-mail: [sereda\\_vlad@ukr.net](mailto:sereda_vlad@ukr.net). Area of research: ground launching devices of unmanned aircraft.