

УДК 629.7.085

В.А. СЕРЕДА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

КОМПЛЕКСНО–СОПРЯЖЕННАЯ МОДЕЛЬ ВАКУУМНОГО НАЗЕМНОГО ПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА ЛЕГКОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

С целью выявления особенностей рабочего процесса, а также определения места и роли среди прочих типов наземных пусковых устройств (НПУ) легких беспилотных летательных аппаратов (БЛА) предложена комплексно–сопряженная модель вакуумной катапульти. Модель учитывает преобладающее влияние волновых факторов на интегральные характеристики НПУ. Представлены основные термогазодинамические (физические поля параметров в 3D–расчетной области) и динамические (распределение скорости и перегрузки по длине направляющей) результаты численного эксперимента. Отмечены специфические свойства вакуумного привода и его возможности по сравнению с остальными типами НПУ.

Ключевые слова: пусковое устройство, беспилотный летательный аппарат, компрессионная расширительная машина, вакуумный привод, гибкая трансмиссия.

Введение

В предыдущих статьях [1, 2] рассматривались способы совершенствования наземных пусковых устройств (НПУ) с целью обеспечения постоянства стартовой перегрузки беспилотного летательного аппарата (БЛА). Эффект падения давления присущ всем без исключения расширительным машинам, основанным на принципах насосного хода, и при работе НПУ с соответствующим приводом обуславливает регрессивный характер тягового усилия. Ввиду ограниченной вместимости воздушного аккумулятора давления (ВАД) увеличение рабочего объема расширительной машины влечет снижение давления цикла. Существует класс расширительных машин, основанных на принципах компрессионного хода, т.е. работающих за счет сжатия газа в камере под внешним воздействием рабочей среды. В качестве рабочего тела выступает атмосферный воздух, продвигающий поршень внутрь камеры с давлением, значительно меньшим атмосферного. Ввиду неизменности атмосферного давления и неограниченности объема рабочего тела (окружающего воздуха) вакуумное НПУ непосредственно обеспечивает постоянство тягового усилия при неварьируемом передаточном отношении трансмиссии.

Задачей исследований является идентификация свойств вакуумных НПУ и определение их принадлежности к тому или иному классу катапульти, а также выработка рекомендаций по сохранению постоянства динамических характеристик при изменении геометрии привода или трансмиссии.

Для решения поставленной задачи использовался комплексный подход к исследованию рабочих процессов сложных технических систем на базе универсальных физико-математических моделей и методов численной реализации [3].

Принцип действия вакуумных катапульти

Основным конструктивными элементами вакуумной катапульти являются рабочий цилиндр и механическая трансмиссия – четырехкратный полиспасный механизм. Разгон БЛА производится по направляющей с помощью сбрасываемой стартовой тележки. Разрежение в цилиндре создается вакуумным насосом с приводом от электрического или поршневого двигателя.

Отличительной особенностью вакуумных импульсных тепловых машин (ИТМ) является значительная площадь рабочего поршня (рис. 1) в связи с фиксированным и достаточно низким значением рабочего (атмосферного) давления (101300 Па).

По мере продвижения поршня внутрь цилиндра давление в вакуумной камере возрастает, что негативно сказывается на эффективности работы устройства. Для этого объем цилиндра используется не полностью – на 2/3 рабочей длины, как например, в катапульти производства государства ЮАР для запуска БЛА Vulture (рис. 1) [4]. Также возможно применение вспомогательных спаренных камер равного или меньшего объема при постоянно работающем вакуумном насосе.



Рис. 1. Работоспособный образец вакуумного НПУ с установленным БЛА «Vulture»

Компрессионные расширительные машины (вакуумные ИТМ) позволяют гармонично реализовать цилиндры значительной длины, т.н. «бесштоковую» схему. В свою очередь, единственным способом получения большого хода насосных ИТМ (паровые авиационные катапульты) являются цилиндры с вырезом вдоль всей длины цилиндра для жесткого зацепления поршня и тележки. Однако щелевые цилиндры требуют использования ленточного уплотнения, что связано с множеством конструктивных трудностей [5].

Интегральные характеристики исследованной вакуумной НПУ представлены в табл. 1. Кинематическая схема и принцип действия реконструированы на основании [4].

Таблица 1
Расчетные характеристики вакуумного НПУ

Физический параметр	Значение
Начальное давление в цилиндре, Па	240
Кратность полиспаста	4
Длина направляющей, м	3
Масса запускаемого БЛА, кг	12
Среднеинтегральная перегрузка, ед.	не более 5

Проектный инструментарий

Комплексная модель НПУ представляет собой реконфигурацию обобщенной модели [6] и образована термогазодинамическим описанием процесса в поршневой машине, замкнутым уравнениями динамики подвижных звеньев системы. На рис. 2 показана схема построения контрольного объема с интегрированными масками (поверхностной и твердотельной) вакуумного НПУ.

Для решения краевой задачи в расчетной области и вакуумной камере задается начальное состояние:

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}(\vec{x}, 0) &= \{p, T, 0, 0\} \Pi(\vec{x}, 0), \rightarrow \\ \rightarrow \vec{x} &= \{x_1, x_2, x_3\} \in \Omega, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{\Pi}$ – матрица состояния полей течения; \vec{x} – координатный вектор; p, T – давление и температура в контрольном объеме и цилиндре; Ω – геометрическая подобласть решения.

Интенсивность обменных процессов между ячейками находится из решения задачи о распаде произвольного разрыва. Внутри расчетной области данная схема работает вполне пригодно, но в местах стыковки с магистралями узкого сечения дает заниженные расходные характеристики. По этой причине, при втекании среды в скачкообразно сужающийся канал, используются количественные соотношения пространственной волны разрежения [3]. Согласно [3] субстанциональная скорость втекания среды в канал определяется по интегралу Эйлера:

$$w = \sqrt{w_-^2 + 2c_p T_- \left[1 - \left(\frac{p}{p_-} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}, \quad (2)$$

где T_-, p_- – температура и давление газа в дальних окрестностях скачка сечения; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; γ – показатель политропы; p – локальное значение давления в цилиндре.

Для моделирования истечения из сужающегося канала в окружающее пространство используется приближение римановой волны. Скорость истечения на срезе определяется соотношением:

$$w = w_- + 2 \frac{a_- - a}{\gamma_- - 1}, \quad (3)$$

где a – скорость распространения возмущений; $(...)_-$ – обозначение параметров вниз по потоку.

Имитация утечек осуществляется локализацией по периметру внешней и внутренней поверхности поршня источников и стоков, интенсивность которых соответствует назначаемому зазору, согласно (2) и (3).

Расчет двух- и однокамерной катапульты проводился на прямоугольной расчетной сетке размером $26 \times 26 \times 150$ ячеек с регулярным пространственным шагом 10 мм. Требуемое машинное время для расчета 1 цикла работы НПУ при одноядерном режиме работы ПЭВМ класса Pentium 4 с тактовой частотой процессора 2,6 ГГц составило 9 часов.

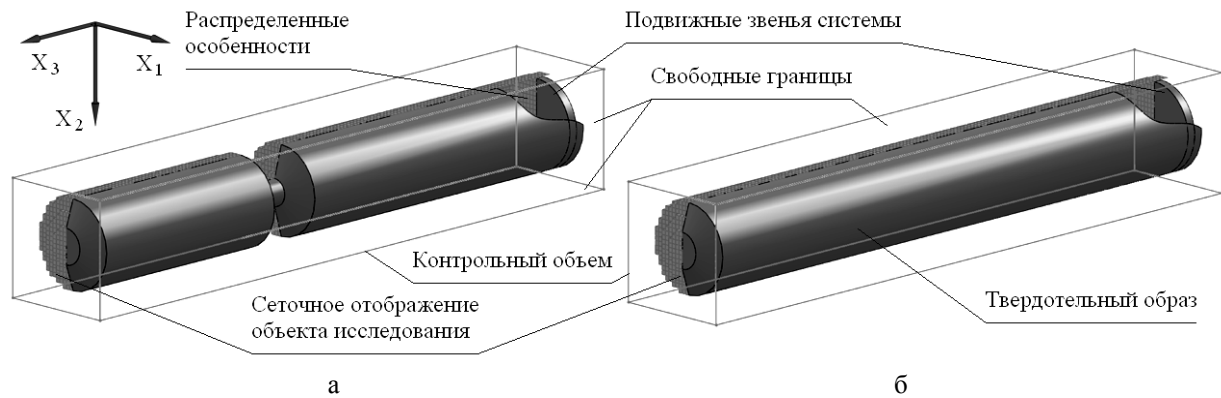


Рис. 2. Маска в сеточной области, отображающая геометрию двух- (а) и однокамерного (б) типов привода вакуумного НПУ

Результаты численного моделирования

На рис. 3 и 4 представлены результаты численного моделирования двух- и однокамерной вакуумных катапульти в виде временных срезов расчетной области. Поля давления, температуры, концентрации воздуха и скорости позволяют получить полное представление о характеристиках пневмосистемы. В виде графиков представлены основные интегральные характеристики трансмиссии и привода: среднее давление в камере, давление расширения на поверхности поршня, действующая на БЛА перегрузка и скорость его движения по направляющей.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что квазистационарные представления о процессах, происходящих в НПУ далеки от действительности. В вакуумной катапulte не обеспечивается прогнозируемое квазистационарными расчетами значение внешнего давления, равного атмосферному, ввиду образования зоны разрежения на внешней поверхности продвигаемого поршня. Принципиально значимы также волновые факторы внутрикамерных процессов НПУ, оказывающие влияние на динамические характеристики трансмиссии, включая закон тягового усилия.

Наружное обтекание. Циклограмма давления сжатия, т.е. среднеинтегрального атмосферного давления, воздействующего на наружную поверхность поршня (рис. 3 и 4, см. график атмосферного давления), в момент начала движения системы имеет прямолинейный характер. Данное явление объясняется низкой скоростью поршня (до 3 м/с), не способной привести к образованию сколь угодно значительных зон разрежения. Дальнейший разгон подвижной системы вовлекает в движение воздушные массы окружающей среды и приводит к образованию стоячей зоны разрежения, которая незначительно сдвигается в сторону поршня в течение всего рабочего цикла. За практически неподвижной зоной разреже-

ния (с минимальным уровнем давления 0,97 атм) следует зона сжатия (с максимальным уровнем давления 1,07 атм) с постепенным угасанием амплитуды колебания. В связи с этим в начальный момент времени наблюдается падение рабочего давления, а затем поддержание его на постоянном уровне до момента падения перегрузки вследствие увеличения давления сопротивления.

Таким образом, процессы внешнего обтекания для одно- и двухкамерных вакуумных катапульти при прочих равных условиях не имеют принципиальных отличий.

Внутреннее обтекание. Продвижение поршня внутрь рабочего цилиндра приводит к снижению уровня вакуумированности камеры и, тем самым к снижению эффективности всей компрессионной машины (рис. 3 и 4, см. график среднеинтегрального давления). Особое влияние на данный процесс оказывают нестационарные процессы, зависящие от геометрических.

На протяжении всей фазы рабочего цикла перед движущимся поршнем наблюдается зона пониженной температуры и давления, наличие которой свидетельствует о непрерывной генерации волны сжатия малой интенсивности $D - w < a$ (скорость движения фронта волны $D = 0,5M$ в системе координат, связанной с цилиндром).

Для двухкамерного привода можно констатировать более низкую интенсивность волнового процесса в основном цилиндре и практически его полное отсутствие во вспомогательной камере (рис. 3). Причиной этому служит возникновение высокоскоростной зоны течения в соединительном патрубке, которая разрушает приходящие волны сжатия-разрежения и препятствует их дальнейшему распространению. В связи с этим кривая нарастания давления в камере носит гладкий характер, что свидетельствует об отсутствии сильных рывков трансмиссии.

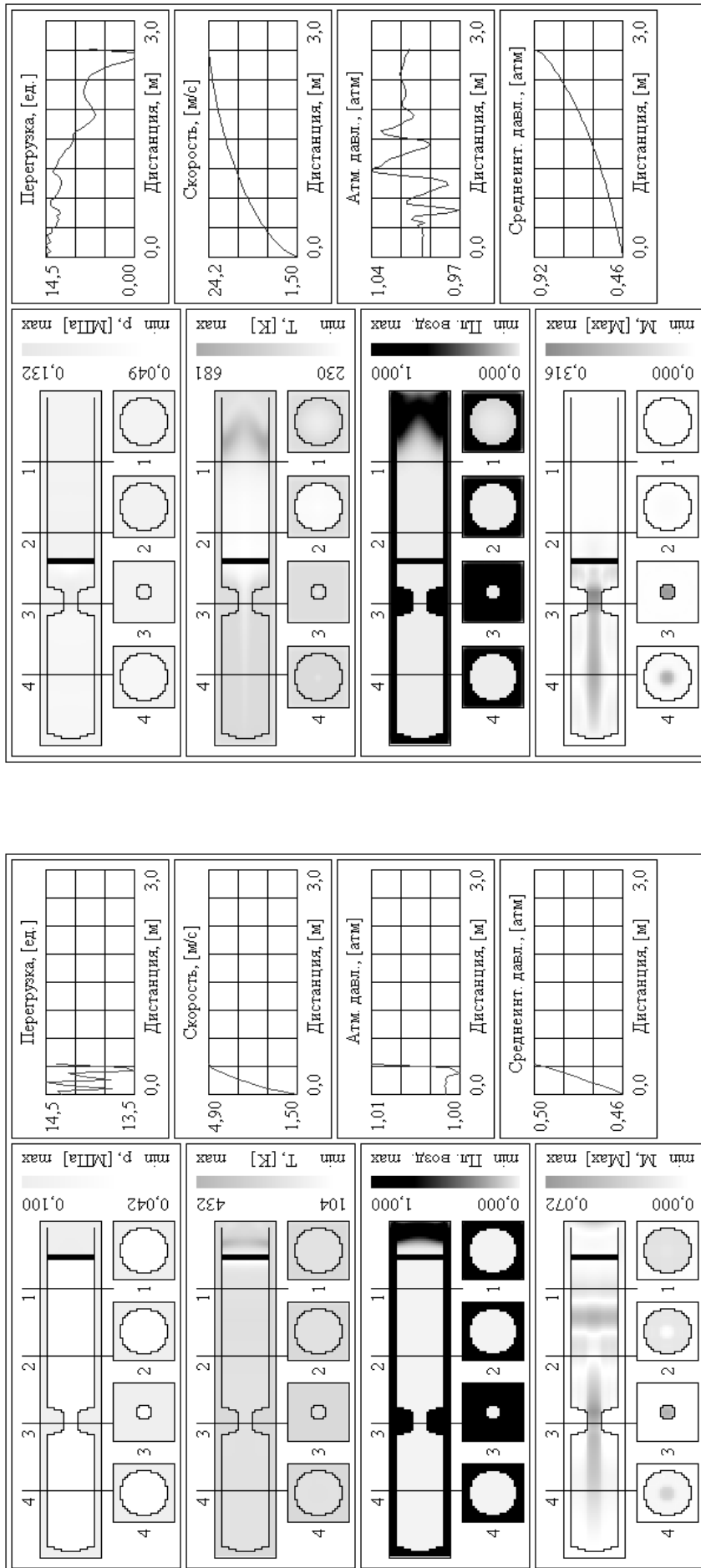


Рис. 3. Начальная и конечная фазы рабочего цикла вакуумной капапулты с двухкамерным приводом

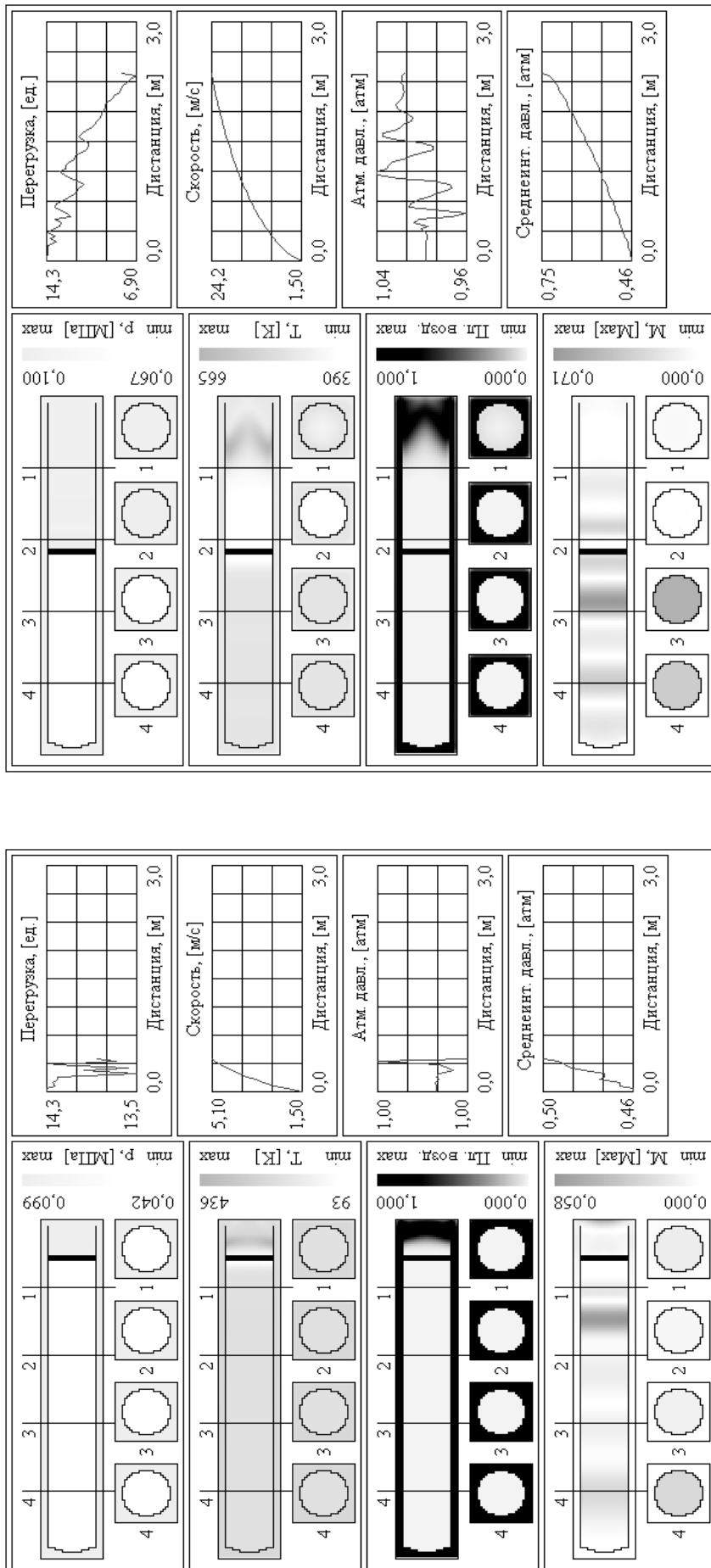


Рис. 4. Начальная и конечная фазы рабочего цикла вакуумной кагапулты с однокамерным приводом

Волновой процесс в цилиндре однокамерного вакуумного НПУ значительно сильнее по причине отсутствия препятствий на пути распространения возмущений (рис. 4, см. поля изолиний М). Приходящая волна разрежения–сжатия беспрепятственно отражается от плоского дна цилиндра и приводит к эффекту реверберации – поля скоростей отображают целую серию зон сжатия–разрежения. В совокупности с пульсациями внешних характеристик, колебания внутрикамерного давления могут привести к значительным изменениям усилия, действующего на БЛА.

Таким образом, характеристики внутреннего обтекания двух– и однокамерных ИТМ вакуумных катапульти не идентичны.

Динамические характеристики. Следствием вышеописанных процессов являются особенности циклограммы перегрузки двух– и однокамерных приводов, которые приобретают индивидуальный характер, отличный от всех остальных расширительных машин (пневматических, пневмогидравлических и т.д.).

Двухкамерная схема привода по показателям совершенства близка к классическим пневматическим катапультам [1], обеспечивающим тяговое усилие на 50% меньшее от первоначальных показателей в момент страгивания БЛА (рис. 3, см. график перегрузки).

Можно констатировать более высокую эффективность динамических характеристик однокамерной катапульти (рис. 4, см. график перегрузки), обеспечивающей незначительное падение тягового усилия (не более 30% от начальной величины).

Вышеуказанное отсутствие принципиальных отличий в законах перегрузки приводит к идентичному характеру кривой набора скорости (рис. 3 и 4, см. график линейной скорости), но динамика старта БЛА по направляющей благоприятнее во втором случае, когда необходимая скорость схода обеспечивается на меньшем разгонном участке.

Выбор схемы привода. Выбор схемы привода расширительной машины является компромиссом между массогабаритным совершенством конструкции НПУ и эффективностью его работы.

Двухкамерная схема, хотя и позволяет вдвое сократить длину всей конструкции, но на некоторых режимах работы может стать вовсе неэффективной. Так, по мере увеличения скорости движения поршня, скорость истечения газа в дополнительную полость возрастает и расход через магистраль падает. При достижении значения скорости $w = 0,5M$ происходит запирание потока и перетекание из рабочего цилиндра во вспомогательный резервуар прекращается. В таких условиях давление в основном цилиндре резко повышается и становится равным ат-

мосферному, вследствие чего привод НПУ перестает создавать усилие. Для обеспечения постоянного расхода рабочей среды через магистраль рекомендуется увеличение диаметра соединительного шланга.

По причине отсутствия каналов изменяемого сечения, однокамерная схема лишена вышеуказанных недостатков и обеспечивает непрерывные расходные характеристики на протяжении всего рабочего цикла. Таким образом, обеспечивается более эффективное использование объема вакуумной камеры на всем рабочем ходе поршня. Подобная компоновка, хотя и имеет более выгодные динамические характеристики, в конечной фазе цикла является не лучшим массогабаритным решением, поэтому в качестве альтернативы предлагается использовать двухкамерную схему.

Рассматриваемый вакуумный привод обеспечивает примерно постоянные стартовые характеристики, зависящие от объема вспомогательной камеры и очертаний внутренних форм расширительной машины. Тем не менее, применение однокамерной схемы значительного объема при коротком рабочем ходе поршня позволяет безоговорочно отнести вакуумное НПУ в стандартной конфигурации привода к категории с ярко выраженным постоянным законом тягового усилия.

Вакуумное НПУ является достаточно безопасным устройством в связи с отсутствием находящихся под высоким давлением элементов конструкции. Следует отметить сходные черты с пневмогидравлической НПУ:

- 1) постановка подвижных элементов на шептало до момента создания в вакуумной камере необходимого разрежения;
- 2) страгивание БЛА с идентичной перегрузкой вне зависимости от условий окружающей среды;
- 3) сглаживание закона тягового усилия при увеличении объема пневмокамеры;
- 4) низкие массогабаритные характеристики ввиду неполного использования длины пневмоцилиндра.

Заключение

Предложенная комплексно–сопряженная модель вакуумного НПУ позволяет получить полный спектр газотермодинамических и механических характеристик устройства на ранних стадиях проектирования.

Волновые факторы оказывают значительное влияние на протекание рабочих процессов в НПУ и должны учитываться при проектировании. Общие принятые в инженерной практике квазистационарные модели подобных устройств представляются не вполне адекватными физике.

Способность модели отражать волновые факторы дает возможность получить существенно уточненные среднеинтегральные характеристики рабочих процессов НПУ.

Вакуумное НПУ вследствие постоянства атмосферного давления обеспечивает равномерное тяговое усилие и, таким образом, способно придать БЛА необходимую начальную скорость (25..28 м/с) на меньшем участке направляющей (2 м).

Компенсирующие двухкамерные устройства выглядят более рационально, исходя из условия обеспечения компактности конструкции и ограничения продольного размера цилиндра.

Сбалансированный подход к проектированию наземной составляющей беспилотного авиационного комплекса отражает типовую тенденцию развития сложных технических систем.

Литература

1. Авилов, И.С. Комплексно-сопряженная модель пневматического наземного пускового устрой-

ства легкого беспилотного летательного аппарата [Текст] / И.С. Авилов, М.В. Амброжевич, В.А. Середда // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 5 (72). – С. 19-23.

2. Авилов, И.С. Оптимизация динамических характеристик пневматического пускового устройства беспилотного летательного аппарата [Текст] / И.С. Авилов, В.А. Середда // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 6 (73). – С. 23-27.

3. Амброжевич, А.В. Численное моделирование теплофизических процессов в двигателестроении [Текст]: учеб. пособие / А.В. Амброжевич. – Х.: ХАИ, 2005. – 233 с.

4. 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. – 29.03.2011 г.

5. Андреев, И. Боевые самолеты [Текст] / И. Андреев, А. Захаров. – М.: Прострекс, 1992. – 160 с.

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

Поступила в редакцию 29.03.2011

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

КОМПЛЕКСНО-СПРЯЖЕНА МОДЕЛЬ ВАКУУМНОГО НАЗЕМНОГО ПУСКОВОГО ПРИСТРОЮ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

В.О. Середда

З метою виявлення особливостей робочого процесу, а також визначення місця та ролі серед решти типів наземних пускових пристроїв (НПП) легких безпілотних літальних апаратів (БЛА) запропоновано комплексно-спряжену модель вакуумної катапульти. Модель враховує переважний вплив хвильових факторів на інтегральні характеристики НПП. Наведено основні термогазодинамічні (фізичні поля параметрів у 3D-розрахунковій області) та динамічні (розподілення швидкості та перевантаження по довжині напрямної) результати чисельного моделювання пристрою. Зазначені унікальні властивості вакуумного приводу та його можливості порівняно з іншими типами НПП.

Ключові слова: пусковий пристрій, безпілотний літальний апарат, компресійна розширювальна машина, вакуумний привід, гнучка трансмісія.

COMPLEX-CONNECTED MODEL OF VACUUM GROUND LAUNCHING DEVICE OF THE LIGHT UNMANNED AERIAL VEHICLE

V.O. Sereda

For the purpose of revealing of features of working process, and also definition of a place and a role among other types of ground launching device (GLD) easy unmanned aerial vehicle (UAV) the in a complex-interfaced model of a vacuum catapult is offered. The model considers prevailing influence of wave factors on integrated characteristics GLD. The basic are presented thermogas-dynamic (physical fields of parameters in 3D-settlement area) and dynamic (distribution of speed and an overload on length directing) results of numerical modelling of the device. Unique properties of a vacuum drive and its possibility in comparison with other types GLD are noted.

Key words: launching device, unmanned aerial vehicle, compression expansion the car, vacuum drive, flexible transmission.

Середда Владислав Александрович – канд. техн. наук, вед. инженер кафедры ракетных двигателей факультета ракетно-космической техники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: sereda_vlad@ukr.net.