

*Середа В.А., канд. техн. наук, доц.
Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

*Бойчук И.П., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

К ВОПРОСУ О РАЦИОНАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ БАЛЛОНА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО НАЗЕМНОГО ПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА

sereda_vlad@ukr.net

С целью повышения компактности беспилотного авиационного комплекса сформулированы параметры наземного пускового устройства, которые обеспечивают наилучшие характеристики старта летательного аппарата. Изложена структура комплексной газотермодинамической и механической модели для опережающего численного исследования рабочего процесса наземной пневматической катапульты. Представлены динамические характеристики пусковых устройств в случае интенсивного наращивания заряда рабочего тела путем увеличения емкости баллона. Рассмотрены режимы истечения газа из воздушных аккумуляторов давления при различном перепаде давления. Произведен поиск доступного ассортимента аккумуляторов давления и дополнительного оборудования для использования в приводах катапульт. Указаны сложности в технической реализации пускового устройства на основе воздушного аккумулятора давления и сделан вывод необходимости глубокой модернизации привода для получения наилучших параметров старта летательного аппарата. Изложенный материал структурно дополняет комплекс мероприятий по приданию постоянного тягового усилия привода катапульты в рамках метода оптимизации динамических характеристик старта.

***Ключевые слова:** пневматическая катапульта, беспилотный летательный аппарат, закон тягового усилия, воздушный аккумулятор давления.*

Введение. Мобильность беспилотного авиационного комплекса (БАК) в первую очередь определяется компактностью наземной составляющей – пусковым устройством (катапульты). Придание необходимой начальной скорости беспилотному летательному аппарату (БЛА) на минимальном участке разгона (направляющей) возможно только при обеспечении постоянного ускорения [1]. Для наземных катапульт с пневматическими приводами характерна регрессия закона ускорения вследствие ограниченного объема баллонов со сжатым рабочим телом. Логичным шагом по улучшению динамических характеристик наземного пускового устройства (НПУ) является повышение массы заряда путем увеличения емкости баллона или увеличения давления сжатия [2]. Однако, интенсивное наращивание параметров системы не всегда целесообразно и технически нереализуемо, поэтому улучшение динамических характеристик катапульты должно лежать в русле экстенсивной модернизации привода.

Методология. Максимальная работа перемещения БЛА вдоль направляющей возможна в случае обеспечения постоянного тягового усилия привода НПУ, которое с точностью до знака соответствует стартовой перегрузке (рис. 1). Регрессия тягового усилия приводит к невозможности придания необходимой стартовой скорости БЛА на заданном участке разгона и требует

наращивания длины направляющей (рис. 2). При этом, увеличение работы перемещения за счет прогрессии тягового усилия недопустимо в связи с ограничением БЛА по предельной стартовой перегрузке. Таким образом, наилучшими динамическими характеристиками обладает катапульта, привод которой создает постоянное тяговое усилие. Для пневматических НПУ закон тягового усилия напрямую зависит от объема газа, поступившего в течение рабочего цикла в цилиндр.

Поиск рациональной конфигурации объекта техники, в составе которого содержится расширительная машина и трансмиссия, должен осуществляться на основе комплексной газодинамической (например, [3]) и механической (например, [4]) физико-математической модели. В данной работе математическое описание нестационарной пространственной модели течения в расчетной области НПУ основывается на консервативной форме записи уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии в декартовой системе координат [5]. Совокупность доминирующих факторов модели представляется методом особенностей путем аппликации источников-стоков материальных субстанций. Решение эволюционной задачи базируется на модифицированной конечно-разностной схеме С. К. Годунова, реализованной на регулярной временной сетке.

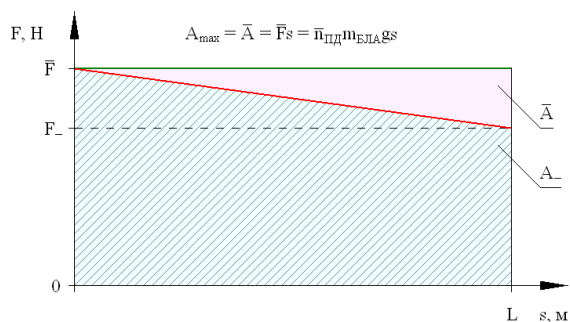


Рис. 1. Схема для определения полноты совершенной работы по разгону БЛА

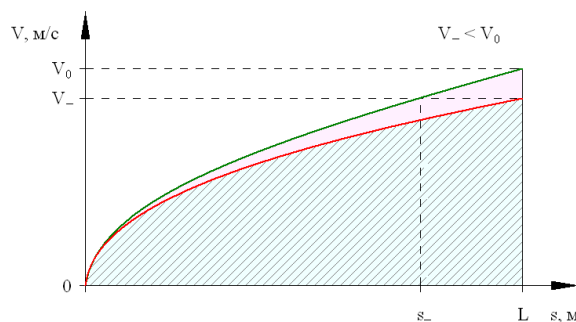


Рис. 2. Отличие в динамике набора скорости БЛА при различной работе привода НПУ

Положение подвижных частей механической трансмиссии подчиняется уравнению Лагранжа II рода, позволяющего представлять сложные кинематические схемы в универсальном виде. Подмодель процесса подачи рабочего тела из емкости с рабочим телом (баллона или аккумулятора давления) в цилиндр подчинена интегралу Эйлера:

$$w = \sqrt{2c_p T \left[1 - \left(\frac{p_l}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}, \quad (1)$$

где w – скорость втекания среды в баллон; T , p – температура и давление газа в емкости; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; γ – показатель политропы; p_l – локальное значение давления в цилиндре.

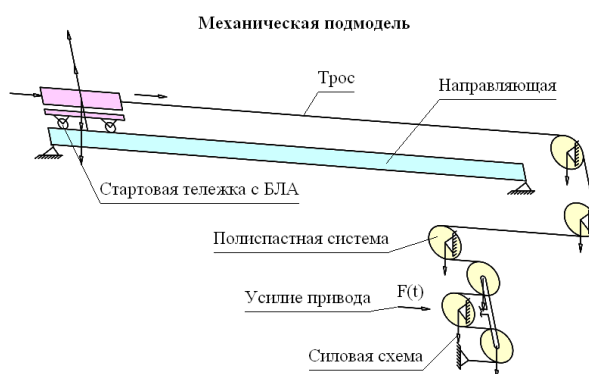
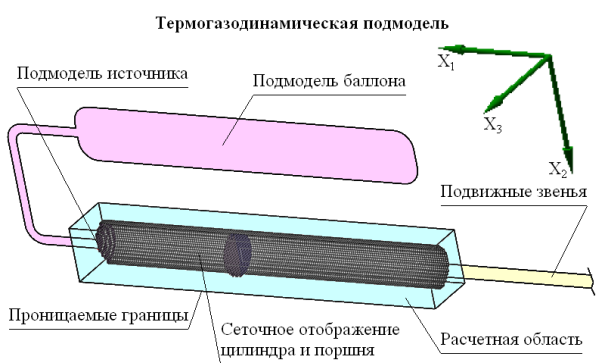


Рис. 3. Структура комплексной термогазодинамической и механической модели НПУ

Комплексно-сопряженная модель НПУ реализована в виде законченного программного продукта, позволяющего синхронно отображать состояние физических полей в расширительной машине (давления, температуры, субстанциональной скорости, концентрации заряда) и динамические характеристики трансмиссии (скорости, ускорения, интегрального давления, заряда газа) в виде фазовых временных срезов (рис. 4).

В качестве примера объекта исследования было выбрано НПУ с направляющей длиной $L = 3$ м для ввода в полет БЛА с минимальной скоростью $V_0 = 25$ м/с массой $m_{\text{БЛА}} = 25$ кг и предельно допустимой перегрузкой $n_{\text{ПД}} = 5$ g.

Основная часть. Существует такая емкость баллона (1280 л при давлении 4 атм), которая позволяет получить близкий к постоянному закон перегрузки (рис. 5) и максимальную скорость схода БЛА – 22 м/с на дистанции разгона 3 м. Дальнейшее увеличение объема представляется нецелесообразным в связи с незначительным приростом скорости БЛА (рис. 6). Очевидно, что полученная емкость баллона технически нереализуема, однако, эквивалентную массу воздуха можно поместить в баллон меньшего объема, но с более высокой компрессией. Т. е. теоретически, чтобы получить постоянный закон тягового усилия, равнозначный баллону «бесконечного» объема при условии, что объем «баллона» будет равным 10 л, воздух необходимо сжать до значения 512 атм.

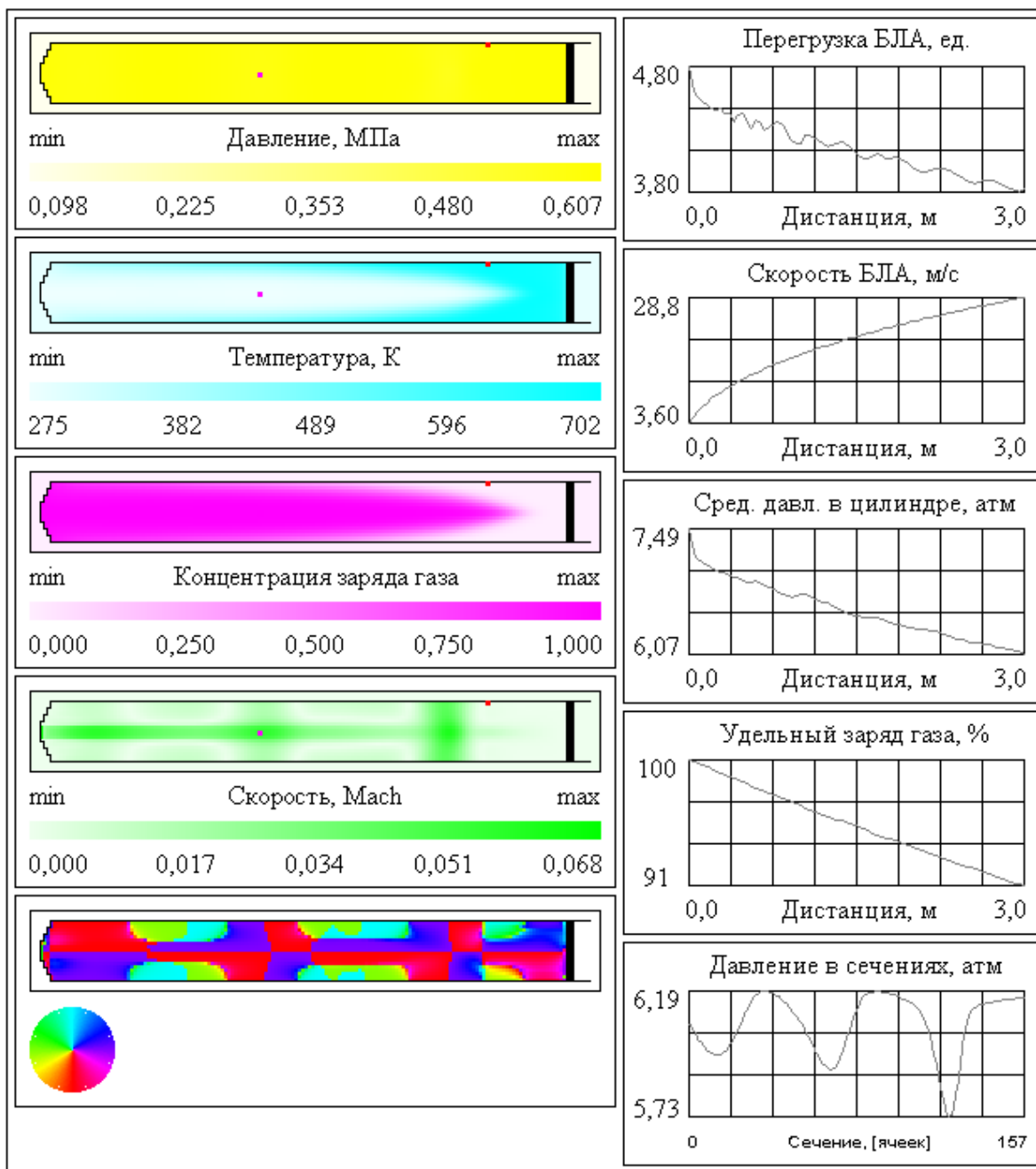


Рис. 4. Фазовый срез рабочей области численного эксперимента

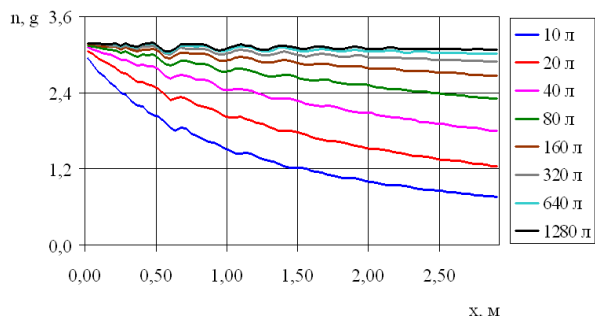


Рис. 5. Уменьшение регрессивности закона перегрузки при увеличении емкости баллона

Таким образом, в p, V -координатах (давление и объем баллона) существует изолиния, соответствующая постоянному закону стартовой перегрузки (рис. 7). Переход на сверхвысокие

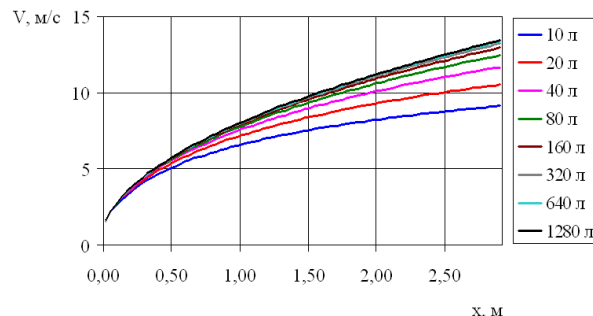


Рис. 6. Динамика разгона БЛА при увеличении емкости баллона

давления влечет за собой использование техники качественно другого класса – воздушных аккумуляторов давления (ВАД). Следует понимать, что баллоном является напрямую соеди-

ненная с цилиндром емкость с газом, в которой происходит синхронное падение давления после срабатывания крана. В свою очередь, аккумулятор высокого давления представляет собой упругую среду, которая соединяется через регу-

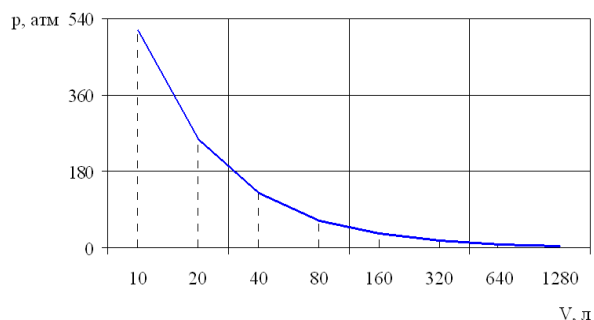


Рис. 7. Изолиния постоянного закона перегрузки в p , V -координатах

Воздушные аккумуляторы и компрессоры высокого давления (до 330 атм) широко применяются в пневматическом оружии и аквалангах. Но транслирование указанных апробированных технологий в область наземных катапульти ограничено высокой инерционностью работы регуляторов давления (редукторов), несоизмеримой с характерной скоростью ввода в полет БЛА (около 0,1...0,2 с). Не известны стандартные редукторы, обеспечивающие регулирование площади проходного сечения дросселя с высокой точностью за столь короткие промежутки времени. Учитывая интенсивный волновой процесс в цилиндре, реакция редуктора на приходящую волну сжатия будет неадекватна интегральному фону давления. Кроме того, переход на оборудования высокого давления (свыше 12 атм) в гражданском секторе затруднительно в связи с необходимостью его лицензирования в органах Котлонадзора [6].

В условиях критического перепада давления (свыше 16 атм) между сообщаемыми емкостями наблюдается сверхзвуковая скорость истечения газа (рис. 8). Возникающие при этом скачки уплотнения, вследствие нерасчетных режимов истечения, способны продвинуться к критическому сечению и «выключить» сужающуюся часть магистрали. Профилирование участка перехода магистрали в виде сопла позволят снизить скорость истечения, но увеличения расхода газа при этом через заданное сечение не произойдет, т. к. в критическом сечении будет наблюдаться максимум плотности тока.

Выводы. Произведенные с помощью модели априорные оценки позволяют сформулировать рациональный облик расширительной системы наземной пневматической катапульти. Применение ВАД в рассматриваемых системах нецелесообразно по ряду причин:

1) ллятор давления с цилиндром и компенсирует падение давления в определенных эксплуатационных пределах. В связи с этим, значительный перепад давления будет определять скорость истечения рабочего тела из ВАД (рис. 8).

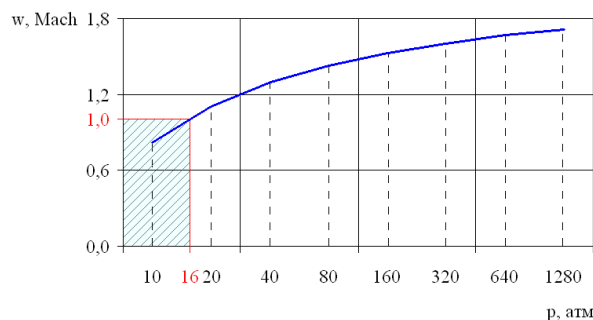


Рис. 8. Скорость истечения газа из баллонов при различных перепадах давления

- 1) необходимостью получения разрешительных документов на эксплуатацию емкостей и компрессоров высокого давления;
- 2) отсутствием стандартной номенклатуры редукторов, скорость срабатывания которых сопоставима с динамикой работы катапульти;
- 3) возникновением сверхкритических скоростей истечения, способных привести к резкому падению расхода.

В свою очередь, баллоны стандартного образца не позволяют получить постоянный закон тягового усилия по причине малой массы заряда, не способной компенсировать падение давления в цилиндре. Для получения наилучших динамических характеристик рационально использовать баллоны:

- 1) с давлением до 16 атм, исключаяющие сверхкритические режимы истечения рабочего тела в цилиндр;
- 2) совместно с электромагнитными клапанами, время срабатывания которых соизмеримо со временем старта;
- 3) значительной емкости (около 80 л) для расширительных машин с малым рабочим ходом, где используются полиспастные системы высокой кратности (свыше 4).

Разумной альтернативой ВАД являются пиротехнические аккумуляторы давления, которые лишены недостатков первых, однако для их применения требуются разрешительные документы на проведение взрывных работ. Кроме того, должны рассматриваться мероприятия по улучшению рабочего процесса путем глубокой модернизации привода [7] или трансмиссии [8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серeda В. А. Постановка задачи оптимизации наземных пусковых устройств [Электронный

ресурс]// Труды МАИ. – 2013. – № 70. 25 ноября 2013. – URL:

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=44445> (дата обращения: 26.10.2014)

2. Fahlstorm P. G., Gleason T.J. Introduction to UAV Systems: Fourth Edition// John Wiley & Sons, Ltd. 2012. P. 280.

3. Осипов О. В. Оптимальное расположение источников тепла в неоднородной среде // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №1. С. 152-158.

4. Novakovic Z., Medar N. Analysis of a UAV Bungee Cord Launching Device// Scientific Technical Review, 2013. Vol. 63. № 3. Pp. 41-47.

5. Авилов И.С., Амброжевич М.В., Серeda В.А. Комплексно-сопряженная модель пневматического наземного пускового устройства легкого беспилотного летательного аппарата //

Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 5 (72). С. 19-23.

6. Антикайн П. А. Зыков А.К. Эксплуатация объектов котлонадзора: Справочник. М.: НПО ОБТ, 1996 г. 325 с.

7. Аленченков Г.С. Импульсная катапульта с дополнительными упругими элементами // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов: Материалы IX всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых// (Тула 16 апреля 2010). Т.: изд-во ТулГУ, 2010. С. 196-201.

8. Патент Украины на полезную модель № 65105. Амброжевич А.В., Серeda В.А. Способ регулирования тягового усилия привода катапульта // Патент Украины U 2011 05796.2011. Бюл. № 22.