

УДК 629.7.085.24

В.А. Серeda

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

СОГЛАСОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА И ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ НАЗЕМНОЙ КАТАПУЛЬТЫ

Изложена проблематика ввода в полет беспилотных летательных аппаратов с помощью катапульти с приводами прямой реакции. Указаны особенности работы наземных катапульти с телескопической трансмиссией. Предложена схема организации рабочего процесса, реализующая минимальную регрессию тягового усилия. Приведена методика расчета характеристик пневмопривода, основанная на нормировании работы расширения. Описана комплексно-сопряженная физико-математическая модель пневматической катапульти. Представлены результаты расчета наземного пускового устройства в виде цветowych карт физических полей и основных интегральных характеристик.

Ключевые слова: наземная катапульта, динамические характеристики, телескопическая трансмиссия, норма работы.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БЛА), оснащенные реактивной силовой установкой малой тяги, требуют высоких скоростей ввода в полет. Применение внешней энергии, т. е. наземных пусковых устройств (НПУ, катапульти), в таких случаях выглядит безальтернативно. Однако НПУ с характерными скоростями перемещения стартовой тележки 65-70 м/с по своему облику приближаются к артиллерии (например, LAE или АН-01 фирмы «Aries Ingeniería Y Sistemas»), нежели к промышленным расширительным машинам.

Действующие характерные усилия и скорости перемещения подвижных частей трансмиссии делают применение классической гибкой связи (полиспастных механизмов) в таких системах затруднительным либо невозможным и требуют применения жестких узлов передачи тяги. При этом отказ от гибкой связи, обладающей передаточным числом, приводит к равенству длин рабочего хода расширительной машины и участка разгона БЛА – направляющей.

Положительным моментом расширительных машин прямой реакции следует считать возможность работы на низких давлениях, характерных для пневматических приводов. Существенным недостатком является сложности в обеспечении для цилиндров НПУ значительного удлинения достаточного газопритока вследствие ограниченного объема запаса рабочего тела (в баллоне).

Значительный объем расширительной машины приводит к заметному падению уровня давления и, как следствие, – регрессии тягового усилия. В свою очередь, для достижения высокой скорости ввода в полет БЛА необходимо увеличение участка разгона, отчего снижается мобильность всего комплекса. Та-

ким образом, для НПУ прямой реакции проблема согласования характеристик пневмопривода и трансмиссии требует решения и является крайне актуальной.

Принцип действия катапульти

Пневматические цилиндры прямой реакции, в которых поршень жестко связан со стартовой тележкой, нашли свое единственное применение в паровых палубных катапультах [1]. Причиной такой эндемичности является разрезной цилиндр, который приводит к значительным утечкам рабочего тела через щель. Избыток пара на авианосцах позволяет компенсировать потери избыточным газопритоком, но для НПУ такие схемы неприемлемы.

Известно пневматическое НПУ фирмы «Adcom» с приводом прямой реакции, в которой используется цельный цилиндр и шток значительного удлинения. Жесткая связь штока и стартовой тележки обуславливает их совместное падение после схода БЛА с направляющей. Подобная схема решает проблему утечек, но требует высокой жесткости (а значит и массы) штока для предотвращения его деформации вследствие удара о землю.

Телескопический привод лишен указанных недостатков: он обеспечивает приемлемую обтюрацию и компактность в стартовом состоянии [2]. НПУ с телескопическим приводом (рис. 1) состоит из вложенных в центральный неподвижный цилиндр нескольких свободных звеньев, совмещающих в себе роль трансмиссии с передаточным числом равным единице. В зависимости от порядка разложения закон тягового усилия будет кардинально отличаться.

В стандартной конфигурации телескопический привод не имеет механизмов принудительного согласования разложения секций, поэтому тяговое

усилие будет ступенчато снижаться к каждой последующей вложенной секции прямо пропорционально ее рабочей площади [3]. Таким образом, продвигаемые внешними секциями в движение придут одновременно все звенья телескопической системы, и их количество будет уменьшаться по мере полного разложения предыдущих – от 4 к 1.

Следствием ступенчатого сокращения рабочей площади является также ярко выраженный ступенчатый регрессивный характер тягового усилия и принципиальная невозможность достижения заданных стартовых характеристик на коротком участке направляющей. В рамках устранения указанного несовершенства предлагается изменить порядок разложения секций на обратный [4], т. е. организовать последовательное вовлечение секций в движение – от 1 к 4.

Методика расчета

Независимо от типа трансмиссии, НПУ должно обеспечивать ввод в полет БЛА с минимальной начальной скоростью V_0 в условиях ограничения по продольной стартовой перегрузке n_x . Придание БЛА заданной скорости на участке минимальной длины $L \rightarrow \min$ возможно только при условии разгона с постоянной стартовой перегрузкой $n_x = \text{const}$, т. е. с минимальной регрессией тяги.

Стартовая перегрузка с точностью до константы соответствует тяговому усилию, циклограмма которой ограничивает работу по перемещению БЛА вдоль направляющей $A = FL$. Таким образом, под согласованием характеристик привода и трансмиссии будем понимать такие параметры телескопической катапульты, при которых будет выполняться максимальная работа $\bar{A} \rightarrow \max$.

Поиск экстремума, так или иначе, подразумевает постановку и решение задачи оптимизации НПУ в классическом виде. Во-первых, проводится декомпозиция НПУ на отдельные подсистемы: трансмиссию, привод, баллон и БЛА. Во-вторых, в качестве целевой функции принимается работа по разгону БЛА вдоль направляющей. В-третьих, управляющим параметром, оказывающим максимальное влияние на целевую функцию, считается площадь подключаемых секций S_i , $i = 1..4$.

В-четвертых, формируется физико-математическую модель (ФММ) НПУ, которая будет описывать взаимосвязь внутрисистемных переменных. Полная картина течения во внутреннем объеме привода и взаимодействия подвижных механических узлов трансмиссии НПУ может быть получена только с помощью ФММ [3, 5], в которой осуществляется неразрывная связь между газодинамической и механической подмоделями (рис. 2). Определяющие модель процесса течения среды законы сохранения

массы, импульса и энергии в векторно-матричных терминах выражаются

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial t} + \nabla \bar{\Phi} = \sum_{n=1}^{M_M} \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial t} \right)_{(n)} + \sum_{n=1}^{M_C} \bar{\Delta}_{(n)}, \quad (1)$$

где $\bar{F} = \rho \{1, \omega, S, \bar{w}, \varepsilon^0\}$ – обобщенные потоковые вектор-матрицы;

$$\bar{\Phi} = \sum_{k=1}^3 \bar{i}_k \bar{\Phi}_k \text{ – вектор-матрица конвективных и волновых процессов;}$$

$$\bar{\Phi}_k = \bar{F} w_k + p(0, 0, 0, \delta_{1,k}, \delta_{2,k}, \delta_{3,k}, w_k) \text{ –}$$

проекция вектор-матрицы конвективных и волновых процессов на оси координат;

$$\bar{\Delta}_{(n)} = \left\{ 0, \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho S)}{\partial t}, f, \frac{\partial(\rho\varepsilon^0)}{\partial t} \right\}_{(n)} \text{ – вектор-матрица «свободных» источников-стоков (ИС);}$$

$$\bar{w} = \{w_1, w_2, w_3\} \text{ – вектор скорости;}$$

$$\bar{f} = \{f_1, f_2, f_3\} \text{ – вектор напряженности поля}$$

массовых сил;

$$f_1, f_2, f_3 \text{ – проекции вектора напряженности;}$$

$$\rho \text{ – плотность;}$$

$$\varepsilon^0 \text{ – внутренняя энергия по полным параметрам;}$$

M_M – общее число групп ИС, обусловленных субстанциональным переносом;

$$M_C \text{ – общее число групп «свободных» ИС;}$$

$$\bar{i}_k \text{ – орты прямоугольной системы координат;}$$

$$k \text{ – индекс направления в пространстве;}$$

$$(\dots)_n \text{ – индексы групп особенностей.}$$

Решение эволюционной задачи получено конечно-разностным методом С. К. Годунова, реализованным на регулярной временной сетке в декартовой пространственной сетке. Для отображения различных физических факторов модели используется механизм ИС массы импульса и энергии. Для определения параметров невозмущенного автономного течения используется решение задачи о распаде произвольного разрыва. На непроницаемых стенках применяется решение задачи о взаимодействии однородного потока газа с преградой. В качестве модели турбулентности используется метод нормирования аппроксимационной вязкости.

Граничными условиями для газодинамической модели служит механическая подмодель трансмиссии, которая записана на основании уравнения Лагранжа II рода. Несмотря на количество секций, рассматриваемая динамическая система обладает одной степенью свободы, т. к. имеется одно независимо перемещаемое звено с дискретно изменяющейся (возрастающей или убывающей) массой G_{II} . Уравнение, описывающее динамику перемещения под-

вижних секцій трансмісії відносно обобщенної координати δs незалежно від порядку розкладання примет вид:

$$a(G_{\Pi}) \ddot{s} = b(G_{\Pi}), \quad (2)$$

где $a(G_{\Pi})$, $b(G_{\Pi})$ – функції геометричних, інерційних і динамічних характеристик подвижних звеньев катапульти;

$$G_{\Pi} = \begin{cases} G_{C1}, \delta s < l_C \\ G_{C1} + G_{C2}, l_C \leq \delta s < 2l_C \\ G_{C1} + G_{C2} + G_{C3}, 2l_C \leq \delta s < 3l_C \\ G_{C1} + G_{C2} + G_{C3} + G_{C4}, 3l_C \leq \delta s < 4l_C \end{cases} -$$

порядок дискретного змінення маси телескопа при послідовальному підключенні секцій; G_{Ci} – маси секцій ($i = 1...4$).

Таким образом, для согласования параметров трансмісії і привода телескопического НПУ, отвечающих наилучшим динамическим характеристикам, будем искать допустимое значение управляющего параметра \bar{S}_i^* , при котором достигается максимальное значение $A(\bar{S}_i^*)$ целевой функции $A(\bar{S}_i)$. При этом, множество допустимых решений $\bar{S}_i^* \in D$ ($D \neq \emptyset$) задается системой ограничений типа неравенств по стартовой перегрузке $n_X(x)$ и скорости ввода в полет БЛА $V_0(L)$:

$$\begin{cases} A(\bar{S}_i^*) = \max_{S_i \in D} A(\bar{S}_i); \\ n_X(x) \text{ не более } n_{X \text{ ПД}}; \\ V_0(L) \text{ не менее } V_{0 \text{ min}}. \end{cases} \quad (3)$$

Вид наилучшей конфигурации НПУ заранее известен и соответствует работе, максимально приближенной к прямоугольнику \bar{A} в пространстве функций $F = f(x)$. Действительная же площадь циклограммы тяги, которая отвечает регрессивному закону перегрузки, будет отличаться в меньшую сторону A_- .

Тогда критерием, на основании которого оценивается степень соответствия катапульти наилучшим параметрам, является коэффициент полноты совершенной работы.

$$\kappa_{\Pi} = \frac{A_-}{A}. \quad (4)$$

Расчет проводился на примере пневматического НПУ с четырехзвенной телескопической трансмісией. Емкость баллона превышает объем расши-

рительной машины в четыре раза. НПУ используется для ввода в полет БЛА с начальной скоростью 30 м/с и предельно допустимой стартовой перегрузкой 4 g.

Результаты расчета

Исходным вариантом устройства является НПУ с порядком разложения телескопических секций 4...1 без механизмов согласования. Подбор площадей секций будем проводить путем решения прямой задачи проектирования НПУ при обратном порядке разложения – 1...4. Поиск рабочих площадей вовлекаемых в движение звеньев рационально представить в виде множителя, показывающего увеличение исходной площади на некоторую величину (табл. 1).

Расчетный инструментарий, выполненный в виде программного продукта на языке Visual Fortran, позволяет представить полную картину течения во внутренних и внешних объемах привода с синхронно изменяемыми динамическими характеристиками трансмісії. Один из фазовых срезов расчетной области в конце рабочего цикла НПУ представлен на рис. 3.

Особенностью работы телескопической катапульти является значительный объем проточной части, который вызывает достаточно протяженную зону торможения потока (рис. 3, см. поля температур). Повышение температуры газа в третьей секции усиливает нестационарный фон и снижает работу расширения. Кроме того, третья секция имеет минимальный диаметр и поэтому способствует сохранению фронта отходящих волн, а значит и устойчивости их конфигурации на значительном удалении от рабочей поверхности.

Результатом согласования характеристик привода и трансмісії является ступенчатый характер изменения стартовой перегрузки (рис. 4, а, поз. 4), отвечающий максимально возможной работе расширения в условиях дискретного изменения рабочей площади телескопа. Наибольшее снижение перегрузки от предельно допустимого значения не превышает 0,4 g и составляет 8 %, что не представляется критичным.

Принудительное изменение порядка выдвижения секций уже в штатной конфигурации (при тех же рабочих площадях) позволяет получить значительный выигрыш в скорости (рис. 4, б, поз. 1). Кусочно-линейный закон перегрузки оказывает незначительное влияние на характер набора скорости БЛА (рис. 4, б, поз. 4). Наблюдаются незначительные перегибы кривой скорости без сколь угодно вредных нарушений динамики разгона, несмотря на резкие всплески перегрузки. Кривые скорости наглядно демонстрируют процесс регулярной сходимости метода.

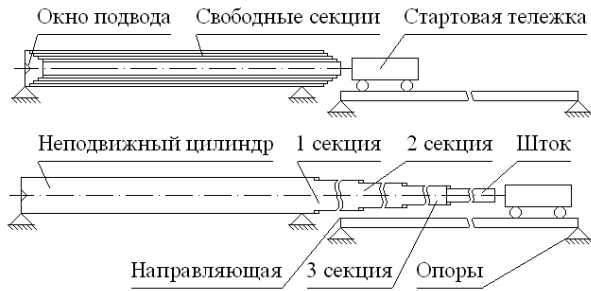


Рис. 1. Схема пневматической катапульты с телескопической трансмиссией в исходном состоянии и после полного разложения секций

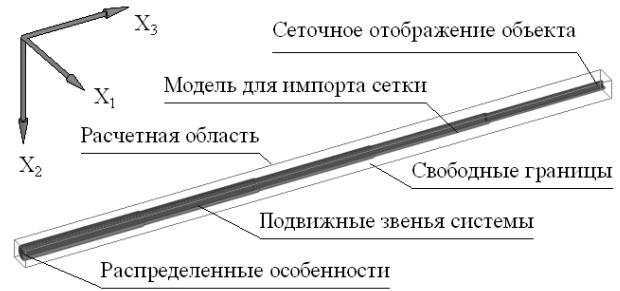


Рис. 2. Модель телескопического НПУ в контрольном объеме и его сеточное отображение с разрешением 24×24×760 ячеек

Таблица 1

Интегральные показатели НПУ при различном увеличении рабочей площади секций и порядке их разложения

Параметр	Площади секций, мм ² (прямой порядок)	№ секции телескопа			
		1	2	3	4
Коэффициент увеличения рабочей площади секций (№ 1-4 – обратный)	1335; 1178; 1021; 2827	1,00	0,97	0,94	0,91
Средняя перегрузка, g	2,60	3,40	3,57	3,74	3,86
Скорость схода БЛА, м/с	24,6	28,0	28,7	29,4	29,8
Коэффициент полноты работы (4)	0,64	0,83	0,88	0,92	0,95

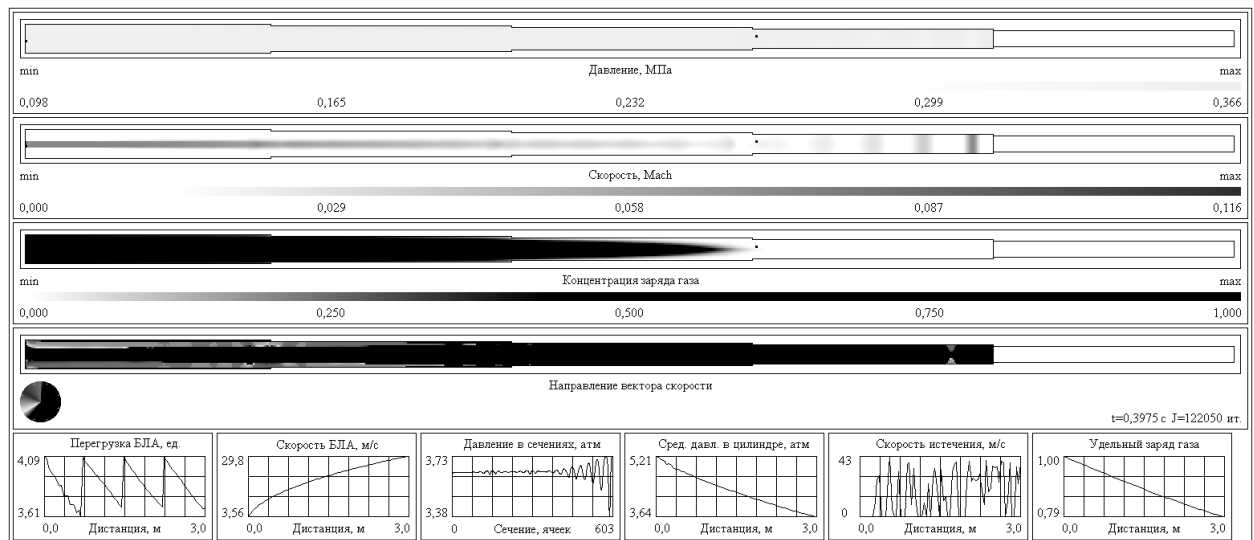


Рис. 3. Фазовый срез расчетной области НПУ с телескопической трансмиссией в момент времени 0,3975 с

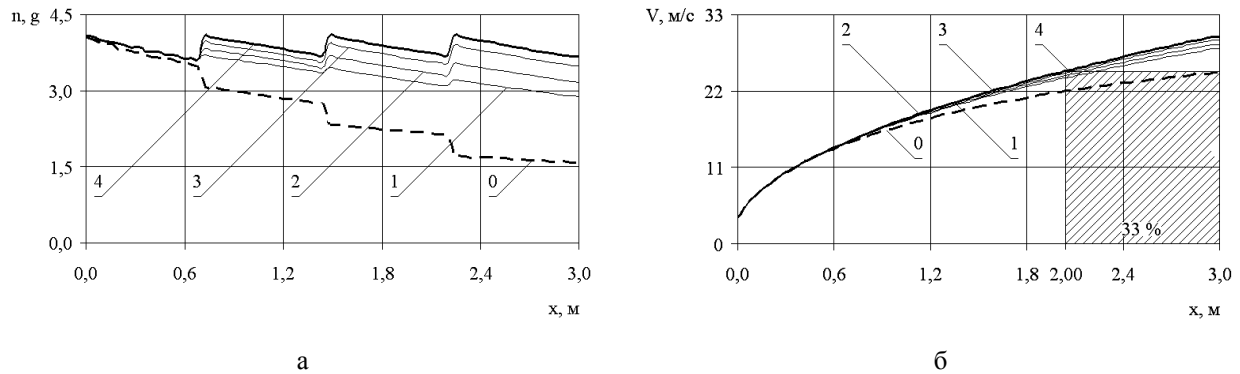


Рис. 4. Изменение динамических характеристик НПУ вдоль направляющей: а – стартовая перегрузка; б – скорость разгона БЛА
 Номер итерации: 0 – при прямом порядке разложения секций; 1-4 – при обратном порядке разложения с коэффициентом увеличения рабочей площади секций согласно табл. 1

Последовательное подключение секций (в отличие от разложения) позволяет достичь заданной скорости БЛА на участке 2 м, что на 33 % меньше исходной длины направляющей. При этом полнота совершенной работы составляет 95 % (табл. 1).

Выводы

Катапульта с жесткой телескопической трансмиссией, обладающая передаточным числом равным единице, является альтернативой высокоэнергетических (пиротехнических) НПУ [6], в рамках устранения демаскирующих признаков процесса ввода в полет БЛА и исключения необходимости принятия специальных мер безопасности, затрудняющих эксплуатацию и применение авиационного комплекса.

Расчет динамических характеристик НПУ показал, что в значительной степени на закон распределения тягового усилия влияет порядок разложения секций телескопа. При работе катапульти в штатной конфигурации происходит ступенчатое сокращение рабочей площади привода, которое в условиях регрессивного изменения давления расширения снижает полноту совершенной работы на 36 % (табл. 1).

Оптимальное соотношение между рабочим давлением в расширительной машине катапульти и площадью раскладываемых секций позволяет добиться постоянной среднеинтегральной стартовой перегрузки на протяжении всего времени работы устройства, вследствие чего придать БЛА максимальную стартовую скорость на минимальном разгонном пути.

Схема привода и метод нахождения рабочих площадей не претерпевает качественных изменений при использовании в качестве рабочего тела химического топлива в любом агрегатном состоянии

(жидком, твердом или газообразном) с идентичной регрессивной циклограммой тягового усилия.

Список литературы

1. *Handbook Operation and Maintenance Instruction. Catapult Type H, Mark 8 [Text] / Bureau of Aeronautics, 1956. – 109 p.*
2. *Xuanzhe Hu, Cold-launch device and method using the same [Text] / Xuanzhe Hu, Zhenhua Hu, Aiwu Hu // United States Patent. Patent Number: US 2011/0147516 A1. Date of Patent: Jun. 23, 2011.*
3. *Амброжевич А. В. Комплексно-сопряженная модель катапульти с телескопическим приводом [Текст] / А. В. Амброжевич, К. В. Мигалин, В. А. Серета // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» – Х., 2012. – Вып. 1 (69). – С. 61-69.*
4. *Способ регулирования тягового усилия привода катапульти. Патент на полезную модель № 65105 Украина: МКП В64F 1/00 / Серета В. А., Амброжевич А. В. – U 2011 05796; Заявл. 10.05.2011; Опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22. – 3 с.: креол.*
5. *Серета В. А. Оптимизация динамических характеристик катапульти с телескопическим приводом [Текст] / В. А. Серета // 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.*
6. *Серета В. А. Оптимизация динамических характеристик системы пиротехнического старта [Текст] / В. А. Серета // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» – Х.: НАКУ, 2015. – Вып. 3 (88). – С. 7-15.*

Поступила в редколлегию 6.01.2016

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

УЗГОДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧНОГО ПРИВОДА І ТЕЛЕСКОПІЧНОЇ ТРАНСМІСІЇ НАЗЕМНОЇ КАТАПУЛЬТИ

В.О. Серета

Викладено проблематику введення в політ безпілотних літальних апаратів за допомогою катапульти з приводами прямої реакції. Вказані особливості роботи наземних катапульти з телескопічною трансмісією. Запропоновано схему організації робочого процесу, що реалізує мінімальну регресію тягового зусилля. Наведено методику розрахунку характеристик пневмоприводу, що заснована на нормуванні роботи розширення. Описано комплексно-сполучену фізико-математичну модель пневматичної катапульти. Представлені результати розрахунку наземного пускового пристрою у вигляді кольорових карт фізичних полів і основних інтегральних характеристик.

Ключові слова: наземна катапульта, динамічні характеристики, телескопічна трансмісія, норма роботи.

MATCHING CHARACTERISTICS OF A PNEUMATIC DRIVE AND A TELESCOPIC TRANSMISSION THE GROUND CATAPULT

V.A. Sereda

I set out the problems in the flight of unmanned aircraft vehicles using catapults to drive forward reaction. These features work ground catapults telescopic transmission. The scheme workflow that implements a minimal regression traction. The methodology of calculating the characteristics of an actuator based on the standardization of the work expand. We describe the complex conjugate physical and mathematical model of pneumatic catapult. The results of calculation of ground launching device in the form of color maps of physical fields and the main integral characteristics.

Keywords: ground catapult, dynamic characteristics, telescopic transmission, work rate.