

Компактное посадочное устройство беспилотного летательного аппарата

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Межотраслевой НИИ проблем физического моделирования режимов полета
самолетов*

Обоснована необходимость разработки конструкции компактного посадочного устройства беспилотного летательного аппарата. Приведены алгоритмы и результаты расчета параметров процесса торможения летательного аппарата посадочным устройством в двух вариантах его работы. Описаны конструкция и работа элементов посадочной мачты для беспилотного летательного аппарата массой до 1,5 кг и некоторые требования к навигационным особенностям летательного аппарата. Даны рекомендации по монтажу посадочной мачты в полевых условиях и требования к конструкции отдельных элементов посадочного устройства. Представлены результаты выполненного пробного торможения и сделанные по нему выводы и рекомендации.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, скорость, кинетическая энергия, торможение, разгон, упругая балка, нить, захват, груз

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) могут выполнять управляемую посадку на взлетно-посадочную полосу как обычные самолеты. Обеспечивается самолетный способ посадки БЛА наличием на нем шасси. Вес шасси у самолетов составляет 4-7 % взлетного. Удельный вес шасси БЛА обычно выше самолетного и может достигать 10-12 %.

Для БЛА в настоящее время широко применяется парашютный способ прекращения полета. После выполнения БЛА программы полета вводится в действие бортовая парашютная система посадки, обеспечивающая приземление аппарата без неустранимых повреждений, возникающих в процессе взаимодействия грунта с конструкцией приземляющегося БЛА. Применение парашютных систем посадки предполагает размещение на борту БЛА парашюта, посадочных демпферов. Удельный вес агрегатов парашютной системы посадки БЛА может достигать 12-15%. Парашютная посадка усложняет предполетную подготовку, диктует специальные требования к условиям в месте приземления аппарата и ставит полеты в жесткую зависимость от погодных условий.

Успешно применяется посадка в сеть. При посадке в сеть БЛА использует имеющиеся бортовые средства выполнения полета и небольшие механические устройства для захвата сети. Удельный вес бортового оборудования для обеспечения посадки в сеть не превышает 1 %. Современные бортовые и наземные навигационные средства с использованием GPS позволяют надежно выводить БЛА на нужный посадочный курс с достаточной точностью и существенно уменьшить размеры посадочных сетей, которые пока что представляют собой достаточно громоздкие сооружения.

Настоящая статья посвящена разработке малогабаритного посадочного устройства, обладающего всеми достоинствами посадочной сети, и обеспечивает посадку БЛА на ограниченную неподготовленную площадку, а также и на борт судна.

1. Принципы построения посадочного устройства

Нитяное посадочное устройство использует принципы посадки в сеть, только сеть превращается в нем в вертикально расположенную нить. БЛА при помощи бортового и наземного навигационного оборудования налетает на нить посадочного устройства и захватывает ее специальными захватами, расположенными на концевых нервюрах крыла. Нить гасит горизонтальную скорость аппарата и затем удерживает его на себе, не давая опуститься на поверхность грунта или воды.

На таких принципах построены посадочные системы БЛА Insitu Sky Hook, размещаемых как на поверхности земли, так и на борту судна.

В отличие от названных нитяных систем Insitu Sky Hook, разработанное посадочное устройство имеет две, а не одну улавливающих нити, что повышает его надежность и снижает требования к точности вывода БЛА на посадочную нить.

Для выполнения захода на посадку БЛА использует бортовой комплект навигационного оборудования, а также специальные приемо-передатчик и антенну командно-телеметрического канала, установленные между нитями на посадочном устройстве.

Торможение аппарата осуществляется поднятием в специальных направляющих системы грузов, закрепленных на концах нити. Высота подъема грузов обеспечивает полное гашение скорости аппарата. Чтобы исключить возврат энергии от поднятых грузов заторможенному аппарату через натянутую нить, грузы в верхних положениях удерживаются стопорами.

Посадочное устройство предназначено для многократного использования.

Конструкция посадочного устройства - сборная и позволяет транспортировку легковым автомобильным транспортом.

Посадочное устройство монтируется на относительно ровном участке неподготовленного грунта бригадой из двух человек с использованием стандартного монтажного инструмента.

Посадочное устройство может также устанавливаться на борт судна и обеспечивать эксплуатацию БЛА с поверхности открытых водоемов.

2. Расчет движения БЛА и элементов посадочного устройства в процессе торможения

Для обоснованного выбора геометрических и массовых характеристик элементов посадочного устройства необходимо составить систему уравнений, описывающих процесс торможения летательного аппарата, захваченного тормозной нитью.

Параметры движения БЛА как материальной точки и положения подвижных грузов можно определить численным интегрированием исходя из известных начальных условий и физических зависимостей, связывающих эти величины.

2.1. Параметры движения, участвующие в расчете процесса торможения

Параметрами движения БЛА в процессе торможения являются его скорость и пройденный путь или расстояние от точки встречи с нитью посадочной мачты до точки, в которой БЛА находится в момент рассмотрения. Параметрами движения

посадочной мачты в процессе торможения БЛА служат перемещения грузов.

Определенные решением уравнений движения параметры процесса торможения позволят сделать обоснованный выбор геометрических и массовых характеристик посадочного устройства в зависимости от веса и скорости улавливаемого БЛА.

В описании движения участвуют кинематические и массовые характеристики элементов посадочной установки и летательного аппарата, приведенные ниже:

G_a – вес летательного аппарата, кгс;

S – путь, пройденный аппаратом после захвата нити посадочного устройства, м;

V – скорость полета аппарата, м/с;

V_{cp} – средняя скорость аппарата на элементарном участке пути, м/с;

ΔV – изменение скорости аппарата за время одного шага интегрирования, м/с;

Δt – элементарный отрезок времени, шаг интегрирования, с;

a – ускорение аппарата, м/с²;

g – ускорение свободного падения, равняется 9,81 м/с²;

F – сила, действующая на аппарат со стороны нити посадочной мачты, н;

L_v – длина верхней ветви нити, расстояние от БЛА до ролика верхней балки мачты, м;

L_n – длина нижней ветви нити, расстояние от БЛА до ролика нижней балки мачты, м;

G_v – вес, приложенный к верхнему звену нити, н;

G_n – вес, приложенный в нижнему звену нити, н;

S_v – увеличение длины верхнего звена нити за счет движения БЛА (ход груза) м;

S_n – увеличение длины нижнего звена нити за счет движения БЛА (ход груза) м;

φ_v – угол между вертикалью и верхней ветвью нити, град;

φ_n – угол между вертикалью и нижней ветвью нити, град;

H_v – расстояние от точки касания БЛА и нити до верхнего ролика, м; Для разных нитей это расстояние разное. Для ближней нити $H_v=3,750$ м, для дальней нити $H_v=5,189$ м;

H_n – расстояние от точки касания БЛА и нити до нижнего ролика, $H_n = 4,000$ м.

2.2. Упрощающие допущения

Силовая колонна считается абсолютно жестким телом. Прогибы упругих балок рассмотрены на этапе выбора их поперечных сечений и в процессе торможения не учитываются.

Скольжение БЛА относительно нити посадочной мачты до остановки груза в кожухе отсутствует. После остановки груза в кожухе все перемещение БЛА происходит за счет движения груза в колонне, и появляется скольжение БЛА по нити. Сила сопротивления скольжению в расчете не учитывается.

Высота полета БЛА в процессе торможения не меняется.

Нить нерастяжима.

2.3. Порядок расчета параметров движения

Выбрав шаг интегрирования Δt определяют по известной скорости полета V путь, который пройдет БЛА за этот промежуток времени:

$$\Delta S = V \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

Пройдя этот путь, БЛА отклонит нижнее и верхнее звенья нити на углы φ_n и φ_v соответственно.

Из прямоугольных треугольников, образованных вертикалью, соединяющей нижний и верхний ролики балок посадочной мачты, определяют углы наклона нижнего и верхнего звеньев нити к вертикали, а также перемещения грузов, прикрепленных к концам нити.

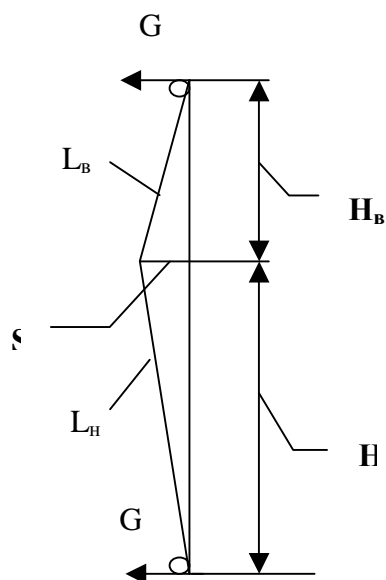


Рис. 1. Принятое расположение сил, участвующих в процессе торможения БЛА:
 G_v, G_n – силы натяжения верхней и нижней нитей; L_v, L_n – длины верхней и нижней нитей; H_v, H_n – расстояния от БЛА до роликов верхней и нижней нитей;
 S – тормозной путь БЛА

Для ближней к колонне и для дальней от колонны нитей, значения углов наклона верхнего звена будут разными, т.к. длина верхнего звена нити у дальней нити больше, чем у ближней.

Угол наклона нижнего звена нити

$$\varphi_n = \arctg \frac{V \cdot \Delta t}{4000} \quad (2.2)$$

Угол наклона верхнего звена нити для ближней нити

$$\varphi_v = \arctg \frac{V \cdot \Delta t}{3750} \quad (2.3)$$

Угол наклона верхнего звена нити для дальней нити

$$\varphi_v = \arctg \frac{V \cdot \Delta t}{5189} \quad (2.4)$$

Ход верхнего груза

$$S_B = L_B - H_B = \frac{H_B}{\cos \varphi_B} - H_B = H_B \left(\frac{1 - \cos \varphi_B}{\cos \varphi_B} \right). \quad (2.5)$$

Ход нижнего груза

$$S_H = L_H - H_H = \frac{H_H}{\cos \varphi_H} - H_H = H_H \left(\frac{1 - \cos \varphi_H}{\cos \varphi_H} \right). \quad (2.6)$$

При известных углах наклона звеньев нити и величинах присоединенных к нитям грузов можно найти силу сопротивления, действующую на БЛА

$$F = G_B \cdot \sin \varphi_B + G_H \cdot \sin \varphi_H. \quad (2.7)$$

Эта сила будет разной для ближней и дальней от колонны нитей. По силе определяют ускорение, которое будет действовать на БЛА в конце первого отрезка времени:

$$a = \frac{F \cdot g}{G_a}. \quad (2.8)$$

Начиная со второго отрезка времени БЛА будет тормозиться и терять скорость. Изменение скорости будет равно произведению среднего на рассматриваемом отрезке времени ускорения на длительность отрезка:

$$\Delta V = a_{cp} \cdot \Delta t. \quad (2.9)$$

здесь среднее ускорение на рассматриваемом отрезке времени

$$a_{cp} = 0,5(a_{i+1} + a_i). \quad (2.10)$$

где a_{i+1} и a_i – ускорения в конце и начале рассматриваемого отрезка времени
Скорость БЛА в конце интервала времени

$$V_{i+1} = V_i + \Delta V. \quad (2.11)$$

Этими последовательными вычислениями определены условия для выполнения следующего шага интегрирования.

Отличие последующих шагов расчета заключается в том, что для определения углов наклона нити к вертикали берется весь путь, пройденный БЛА от момента касания с нитью.

$$S_{i+1} = S_i + \Delta S \quad (2.12)$$

Для конструктивного анализа работы посадочного устройства расчет необходимо вести для обеих нитей.

3. Экспериментальная проверка работоспособности посадочного устройства

Для проверки работоспособности и эффективности указанной конструкции было спроектировано и изготовлено экспериментальное посадочное устройство с приводимыми ниже техническими характеристиками.

3.1. Конструктивные характеристики улавливаемого БЛА

3.1.1. Посадочный вес аппарата, кгс	13
3.1.2. Посадочная скорость аппарата, м/с, (км/ч)	13, 9 (50)
3.1.3. Размах крыла аппарата, мм	2000
3.1.4. Длина фюзеляжа, мм	1677
3.1.5. Положение центра масс на $b_{САХ}$, ед	0,3
3.1.6. Расстояние от носка фюзеляжа до Ц.М., мм	800
3.1.7. Расстояние между захватами для нитей на крыле, мм	2000
3.1.8. Высота полета БЛА на посадочном режиме, мм	4000 ±500

3.2. Функции, выполняемые посадочной мачтой

- 3.2.1. Размещение антенны GPS вблизи верхней точки крепления посадочного троса.
- 3.2.2. Размещение приемника GPS вблизи верхней точки крепления посадочного троса.
- 3.2.3. Размещение командной антенны на стойке посадочной мачты.
- 3.4.4. Размещение навигационного передатчика на стойке посадочной мачты.
- 3.2.5. Захват, торможение и удержание БЛА на посадочном тросе должно происходить без контактов с поверхностями посадочной мачты и поверхностью грунта.

3.3. Конструктивные характеристики посадочного устройства

- 3.3.1. Расстояние от точки касания БЛА и нити до верхнего ролика H_B , м
 - для внутренней, (ближней к колонне)нити 3,750
 - для внешней, (дальней от колонны) нити 5,189
- 3.3.2. Расстояние от точки касания БЛА и нити до нижнего ролика, м 4,000
- 3.3.3. Веса подвижных грузов, расположенных в:

- кожухе:

$$G_1 = 11,020 \text{ кгс};$$

$$G_2 = 5,710 \text{ кгс};$$

$$G_3 = 7,600 \text{ кгс};$$

- в колонне:

$$G_1 = 5,052 \text{ кгс};$$

$$G_2 = 5,710 \text{ кгс};$$

$$G_3 = 13,550 \text{ кгс}.$$

3.3.4. Варианты загрузки концов нити в зависимости от хода грузов:

- грузы внутри колонны:

Ход груза, мм	0 ÷ 200	201 ÷ 600	601 ÷ 5820
Величина груза, кгс	5,052	10,762	24,312

- грузы внутри кожуха:

Ход груза, мм	÷ 307	08÷40 ³	403 ÷ 1680
Величина груза, кгс	1,020 ¹	2,076 ²	24,330

3.4. Устройство и работа посадочной мачты

Беспилотный летательный аппарат на посадочном курсе попадает крылом в одну из нитей посадочного устройства.

Скорость БЛА в этот момент составляет около 50 км/ч или 13,9 м/с. Вес БЛА – 13 кгс, Высота полета – 4 метра.

Посадочное устройство или посадочная мачта представляет собой стальную сборную трубчатую колонну и прикрепленный к ней трубчатый кожух. К колонне прикреплены также две сборные телескопические трубчатые стальные балки, несущие на себе по два опорных ролика и направляющие кольца для нитей. Нижняя балка располагается горизонтально на основании колонны (грунте). Верхняя балка наклонена под углом 38 градусов к горизонту. Из-за наклона верхней балки длины улавливающих нитей различны. Внутри колонны и кожуха размещены две системы подвижных грузов, одновременно связанные друг с другом двумя нитями, лежащими на роликах и проходящими сквозь направляющие кольца.

Для более плавного торможения БЛА грузы в колонне и кожухе состоят из нескольких частей. Грузы закреплены в исходном состоянии на разных высотах, что обеспечивает ступенчатое увеличение силы сопротивления движению в зависимости от пройденного пути.

После подъема грузы G_2 , G_3 внутри кожуха удерживаются захватами. Опускается в исходное состояние только груз G_1 .

Внутри колонны грузы G_5 и G_6 после подъема последовательно опускаются до хода 850 мм и удерживаются захватами. Для груза G_5 это почти возврат в исходное состояние.

Летающий БЛА натывается одним из крыльев на натянутую грузами нить, начинает поворачиваться вокруг нити, продолжая поступательное движение со скоростью полета и скользя передней кромкой крыла по нити, натягивая ее. На концах крыла БЛА размещены захваты нити, в которые она и попадает, удерживая тем самым летающий БЛА.

Летающий БЛА натягивает одну из нитей посадочной мачты, поднимая прикрепленные к ее концам подвижные грузы. Кинетическая энергия летящего БЛА переходит в потенциальную энергию поднятых грузов. Часть поднятых аппаратом грузов удерживаются захватами кожуха и колонны в поднятом положении. Таким образом, БЛА тормозится и зависает на нити посадочной мачты. Грузы внутри колонны и первый груз внутри кожуха, опускаясь под действием собственных весов, переходят в положения, близкие к исходным, натягивая нить. БЛА останавливается, зависая на натянутой нити.

Устройство сделано разборным и удобным для перевозки. Максимальный размер наибольшей детали в длину – 2 000 мм. Из транспортировочного состояния в рабочее посадочное устройство монтируется силами двух человек за 40 минут. Устанавливается посадочное устройство на примерно горизонтальной неподготовленной площадке открытого грунта размерами 7,5x7,8 метра.

При изменении за время полета направления полета на посадочном курсе посадочное устройство позволяет изменить ориентацию улавливающих нитей на необходимую. Для этого снимаются расчалки мачты, мачта поворачивается на металлическом основании и устанавливается в нужном положении, после чего снова фиксируется расчалками к забитым в нужных местах колышкам.

Посадочное устройство может устанавливаться на борту судна при базировании беспилотного комплекса на воде.

На рис. 2 представлена фотография посадочной мачты, установленной на горизонтальной грунтовой площадке.



Рис. 2. Общий вид посадочного устройства

3.5. Порядок расчета параметров движения

Для обоснованного выбора конструктивных параметров посадочного устройства описанный выше порядок расчета позволяет вести расчет параметров движения численным интегрированием и достаточно просто реализуется в широко применяемой программе Microsoft Excel.

Выбрав шаг интегрирования Δt определяется путь, который пройдет БЛА за этот промежуток времени имея известную скорость полета V :

$$\Delta S = V \cdot \Delta t . \quad (3.1)$$

Пройдя этот путь БЛА отклонит нижнее и верхнее звенья нити на углы φ_n и φ_v соответственно. Из прямоугольных треугольников, образованных вертикалью, соединяющей нижний и верхний ролики балок посадочной мачты, как одним катетом, и отрезком пути, который прошел аппарат за отрезок времени, как другим катетом, определяются углы наклона нижнего и верхнего звеньев нити к вертикали a , также, перемещения грузов, прикрепленных к концам нити .

Для ближней к колонне и для дальней от колонны нитей значения углов наклона верхнего звена будут разными, т.к. длина верхнего звена нити у дальней нити больше, чем у ближней:

Угол наклона нижнего звена нити:

$$\varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{V \cdot \Delta t}{4000}. \quad (3.2)$$

Угол наклона верхнего звена нити для ближней нити

$$\varphi_б = \operatorname{arctg} \frac{V \cdot \Delta t}{3750}. \quad (3.3)$$

Угол наклона верхнего звена нити для дальней нити

$$\varphi_д = \operatorname{arctg} \frac{V \cdot \Delta t}{5189}. \quad (3.4)$$

Ход верхнего груза

$$S_б = L_б - H_б = \frac{H_б}{\cos \varphi_б} - H_б = H_б \left(\frac{1 - \cos \varphi_б}{\cos \varphi_б} \right). \quad (3.5)$$

Ход нижнего груза

$$S_н = L_н - H_н = \frac{H_н}{\cos \varphi_н} - H_н = H_н \left(\frac{1 - \cos \varphi_н}{\cos \varphi_н} \right). \quad (3.6)$$

При известных углах наклона звеньев нити и величинах присоединенных к нитям грузов можно найти силу сопротивления, действующую на БЛА:

$$F = G_б \cdot \sin \varphi_б + G_н \cdot \sin \varphi_н. \quad (3.7)$$

Эта сила будет разной для ближней и дальней нитей. По силе определяют ускорение, которое будет действовать на БЛА в конце первого отрезка времени:

$$a = \frac{F \cdot g}{G_a}. \quad (3.8)$$

Начиная со второго отрезка времени БЛА будет тормозиться и терять скорость. Изменение скорости будет равно произведению среднего на рассматриваемом отрезке времени ускорения на длительность отрезка:

$$\Delta V = a_{\text{ср}} \cdot \Delta t. \quad (3.9)$$

здесь среднее ускорение на рассматриваемом отрезке времени

$$a_{\text{ср}} = 0,5(a_{i+1} + a_i). \quad (3.10)$$

где a_{i+1} и a_i – ускорения в конце и начале рассматриваемого отрезка времени

Скорость БЛА в конце интервала времени

$$V_{i+1} = V_i + \Delta V. \quad (3.11)$$

Этими последовательными вычислениями определены условия для выполнения следующего шага интегрирования.

Отличие последующих шагов расчета заключается в том, что для определения углов наклона нити к вертикали берется весь путь, пройденный БЛА от момента касания с нитью.

$$S_{i+1} = S_i + \Delta S \quad (3.12)$$

Для анализа работы посадочной мачты и ее элементов расчет необходимо вести для обеих нитей.

3.6. Расчет параметров торможения БЛА посадочным устройством

Для выполнения расчетов в программе Microsoft Excel был набран описанный механизм вычислений и проведен расчет процесса торможения БЛА ближней и дальней нитями посадочного устройства.

В расчете учитывались изменения величин грузов в зависимости от их перемещений.

Длительность процесса расчета во времени определялась наличием горизонтальной скорости БЛА. Расчет прекращался в момент, когда скорость полета БЛА становилась равной или меньше 0.

В табл.1 приведены определенные на основании расчетов различных вариантов конструктивные параметры посадочного устройства,

Таблица 1. Значения параметров посадочного устройства

По 3 груза в кожухе и в колонне, ближняя нить	
Вес аппарата	13,00 кГс
Скорость посадочная	13,90 м/с
Вес 1-го груза в кожухе	11,20 кГс
Вес 2-го груза в кожухе	5,71 кГс
Вес 3-го груза в кожухе	7,60 кГс
Ход захвата 2-го груза в кожухе	0,307 м
Ход захвата 3-го груза в кожухе	0,402 м
Полный ход груза в кожухе	1,675 м
Вес 1-го груза в колонне	5,05 кГс
Вес 2-го груза в колонне	5,71 кГс
Вес 3-го груза в колонне	13,55 кГс
Ход захвата 2-го груза в колонне	200,00 мм
Ход захвата 3-го груза в колонне	0,600 м
Полный ход груза в колонне	5,947 мм
Высота верхнего звена ближней нити	13,750 м
Высота верхнего звена дальней нити	5,189 м

На основании выполненных расчетов было спроектировано и изготовлено экспериментальное двухнитяное посадочное устройство. Устройство опиралось на металлическое основание, крепящееся к грунту четырьмя штырями, и удерживалась в вертикальном положении тремя тросовыми расчалками регулируемой длины. Пробная посадка БЛА подтвердила работоспособность посадочного устройства и выявила необходимость тщательного и достаточно мощного закрепления мачты от проворота вокруг вертикальной оси при улавливании БЛА.

4. Заключение

Выполненный комплекс работ подтверждает возможность применения двухнитяного посадочного устройства для прекращения полета беспилотных летательных аппаратов.

Апробированная методика расчета параметров процесса торможения позволяет обоснованно выбирать оптимальные основные конструктивные характеристики

посадочного устройства в зависимости от веса и скорости улавливаемого беспилотного летательного аппарата.

Список литературы

1. Тарг С.М., Краткий курс теоретической механики. С. М. Тарг. –М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1970 г., 478 стр.
2. Шульженко М.Н., Конструкция самолетов. Шульженко М.Н., Изд. 3-е, перераб. и доп. -М., «Машиностроение», 1971 г., 416 стр.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры 103 В.И. Рябков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 17.01.12

Компактний посадковий пристрій безпілотного літального апарата

Обґрунтовано необхідність розроблення конструкції компактного посадкового пристрою безпілотного літального апарата. Наведені алгоритми й результати розрахунків параметрів процесу гальмування літального апарата посадковим пристроєм у двох варіантах його роботи. Виконано опис конструкції й роботу елементів посадкової щогли для безпілотного літального апарата вагою до 1,5 кг і деякі вимоги до навігаційних особливостей літального апарата. Дано рекомендації щодо монтажу щогли на ґрунті й вимоги до конструкції окремих елементів пристрою. Подано результати успішно виконаного пробного гальмування й зроблено щодо нього висновки й рекомендації.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, швидкість, кінетична енергія, гальмування, розгін, пружна балка, нитка, захват, вантаж.

Thready landing gear unmanned aerial vehicle

Necessity of working out of an original design of the landing device of the unmanned flying machine is proved. Algorithms and results of calculations of parameters of process of braking of the flying machine by the landing device in two variants of its work are resulted. The description of a design and work of elements of a landing mast for the pilotless flying machine is resulted is powerful 1,5 kg and some requirements to navigating features of the flying machine. Recommendations about mast installation on a ground and requirements to a design of separate elements of the device are made. Results of successfully executed trial braking and the conclusions drawn on it and recommendations are described

Keywords: the unmanned flying machine, speed, kinetic energy, braking, dispersal, an elastic beam, a thread, capture, cargo