

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТРАЕКТОРНОЙ СКОРОСТИ МАЛОГАБАРИТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ХРОНОГРАФАМИ ОПТИЧЕСКОГО ТИПА

П.Д. Богомолова

bpd94@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Особое внимание уделено конструкции хронографов оптического типа. Выявлены особенности их функционирования при различных условиях окружающей среды. Хронографы использованы для измерения траекторной скорости малогабаритных летательных аппаратов при условии, что рассматривается горизонтальный участок траектории или близкий к нему. Используются хронографы для работы с образцами малогабаритных летательных аппаратов на баллистической трассе. Хронографы оттарированы путем проведения нескольких экспериментов. Представлены расчеты коэффициента лобового сопротивления летного образца.

Ключевые слова

Хронограф оптического типа, измерение скорости, коэффициент лобового сопротивления, траекторная скорость, баллистическая трасса

Поступила в редакцию 12.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Точное измерение скорости движения пуль и снарядов на траектории представляет собой одну из важнейших задач экспериментальной баллистики, поскольку это позволяет опытным путем изучать силу сопротивления воздуха и устанавливать зависимость, которая позволяет учесть сопротивление воздуха при проведении расчетов. Начальное значение скорости V_0 является критерием правильности решения задачи внутренней баллистики артиллерийской системы. При этом начальная скорость V_0 определяет траекторию снаряда и является одной из отправных величин для расчета. Поэтому вопросу определения скорости движения снарядов и пуль всегда уделялось большое внимание в ходе развития экспериментальной баллистики. Для экспериментального определения скорости движения малогабаритных летательных аппаратов (ЛА) необходимо создать ряд условий, что можно сделать при помощи баллистической трассы [1].

Баллистической трассой называют специально оборудованную стрелковую трассу, позволяющая в полигонных или лабораторных условиях производить стрельбы специальными моделями, пулями, снарядами для исследования процесса свободного полета летательного аппарата и экспериментального определения:

- 1) скорости ЛА в одной или нескольких точках траектории;
- 2) аэродинамических характеристик натуральных образцов и моделей;
- 3) параметров поступательного и вращательного движения ЛА;
- 4) характеристик устойчивости и динамического качества натуральных образцов и моделей;

- 5) характеристик рассеивания точек попадания;
- б) параметров деривации при проведении стрельб из нарезного оружия.

Баллистическая установка обычно состоит из:

- пусковой установки, запускающей натуральный образец или модель;
- баллистической трассы, оборудованной измерительной аппаратурой для фиксирования параметров траектории и ориентации ЛА;
- специального уловителя ЛА.

Стрельбы в лабораторных условиях могут проводиться как из специальных установок, так и из различных видов стрелкового и артиллерийского оружия.

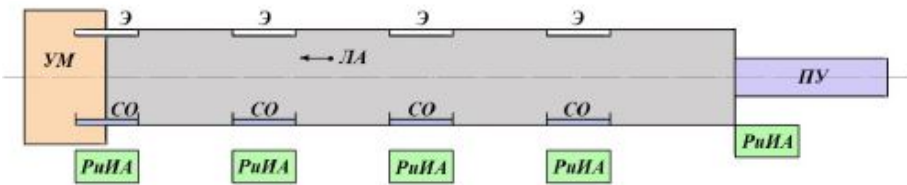


Рис. 1. Принципиальная схема баллистической трассы закрытого типа:

ПУ — пусковая установка; РиИА — регистрирующая и измерительная аппаратура;
СО — смотровые окна; УМ — уловитель моделей; Э — экраны

Тело, ускоренное с помощью пусковой установки, может быть использовано для проведения баллистических экспериментов, аэро- и газодинамических исследований, а также для изучения процессов соударения [2]. Какие бы не проводились эксперименты с ЛА на баллистических установках всегда требуется знать скорость тела, его форму и ориентацию в пространстве.

Для определения этих и ряда других характеристик трасса оснащена разнообразной регистрационной и измерительной аппаратурой, построенной с широким использованием цифровой вычислительной техники, оптики, рентгенографии, инфракрасных, лазерных и ультразвуковых технологий.

Основной аппаратурой, применяемой в экспериментах установках, являются:

- датчики, фиксирующие моменты пролета моделью определенных сечений трассы;
- специальные рамы-мишени, фиксирующие положение ЛА при пролете через определенные сечения трассы;
- высокоскоростные видео- и фотокамеры;
- осветительная аппаратура;
- компьютеры, с которых осуществляется управление камерами и обработка полученных результатов;
- волоконная оптика;
- устройства синхронизации, обеспечивающие съемку в заданный момент;
- программное обеспечение по обработке результатов эксперимента.

Основным преимуществом баллистических установок является экспериментально проводимый реальный полет ЛА. Происходит исследование полноценного процесса движения и определяются суммарные характеристики, что

невозможно при цифровом моделировании. Также к преимуществам можно отнести тот факт, что при определении коэффициента лобового сопротивления C_{xa} по измеренным значениям скорости не вносятся искажений в характер движения тела в процессе полета [3]. Таким образом, учитывается влияние возможного поворота ЛА относительно продольной оси, возможных поперечных колебаний и другие факторы, которые трудно смоделировать при испытаниях в аэродинамической трубе.

Недостатками баллистических установок являются однократное использование ЛА так как после каждого выстрела модель обычно разрушается, а также небольшие размеры снарядов и изменение углов атаки модели в ограниченных пределах [4].

Баллистическая трасса кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана имеет длину 33,8 м и диаметр сечения 0,8 м. В настоящее время трасса находится в состоянии доработки, производится ее дополнительное оснащение оборудованием. При этом осуществляется проведение различных опытных стрельб.

Известны два основных метода определения скорости движения снарядов и пуль [5]:

- 1) метод непрерывного определения скорости движения ЛА на траектории;
- 2) метод определения средней скорости на заданном участке траектории.

Первый из указанных методов основан на применении эффекта Доплера, который заключается в том, что электромагнитные колебания, отражаясь от подвижного экрана, изменяют свою частоту в зависимости от скорости движения экрана. Следовательно, если вслед за ЛА посылать кратковременно электромагнитные импульсы постоянной частоты f , то они, отражаясь от движущегося снаряда со скоростью V , попадут в приемное устройство уже с другой частотой f_1 . Зная соотношение между f и f_1 и разность частот для данного момента времени, можно для того же момента времени определить поступательную скорость ЛА.

Второй метод определения скорости движения ЛА заключается в том, что с помощью специальных приборов (хронографов), измеряется время движения снаряда или пули на известном отрезке траектории. Если длина отрезка траектории l и соответствующее полетное время ЛА составляет t , то искомую среднюю скорость ЛА рассчитаем по формуле:

$$v_{cp} = \frac{l}{t}.$$

Найденную таким образом среднюю скорость принято считать равной действительной скорости движения снаряда в точке траектории, соответствующей середине измерительного участка. Следовательно, данному методу присуща принципиальная погрешность, однако она невелика, так как длину измерительного участка можно выбрать достаточно малой [6].

Средства измерения средней скорости, представляют собой комплекс хронографов различных видов. Хронограф — это устройство, позволяющее точно

измерять сравнительно малые величины времени. Существуют следующие виды хронографов:

- электромагнитные;
- искровые;
- электронные;
- оптические.

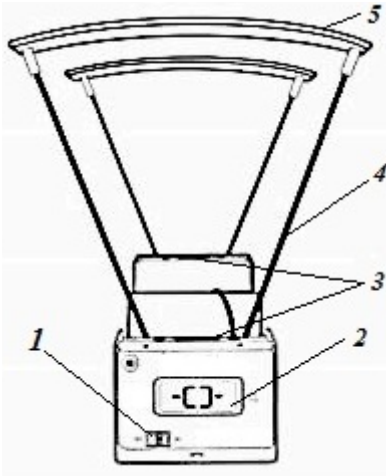


Рис. 2. Устройство оптического хронографа:

1 — переключатель; 2 — дисплей;
3 — фотодатчики; 4 — направляющие стальные стержни; 5 — пластиковые диффузоры

Устройство используемых хронографов представлено на рис. 2.

Хронографы обладают треугольной рабочей зоной стрельбы, которая образуется направляющими стальными стержнями и пластиковыми диффузорами. Длинные стержни устанавливаются в отверстия на передней и задней панелях прибора. При ясной, солнечной погоде, устанавливаются белые пластиковые диффузоры на стальные стержни (для имитации облаков). Фотодатчики направляют на диффузоры, создающие белый фон, для корректных результатов измерений необходим хороший контраст между пулей и фоном (диффузорами или облаками).

По данным производителя, для корректной работы хронографа в условиях искусственного освещения следует использовать пластиковые диффузоры-рассеиватели и лампы накаливания в качестве источника света, расположенные над каждым фотодатчиком (рис. 3).

На баллистической трассе кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана при стрельбах используются хронографы оптического типа ShootingChrony серий M-1 и Alpha. В данной работе проведено исследование функционирования таких хронографов и выявлены их основные особенности.

Работа таких хронографов основана на использовании специальных фотодатчиков. Фотодатчики определяют прохождение объекта над ними, исходя из изменения интенсивности света в рабочей зоне в момент пролета объекта. Когда объект пролетает над первым датчиком, срабатывает таймер, который выключается в тот момент, при пересечении второй рабочей зоны над вторым датчиком. Затем блок обработки переводит эту информацию в значение скорости V .

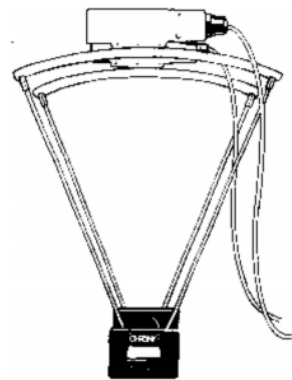


Рис. 3. Хронограф с установленными лампами

В данной работе стрельбы проводились пулями 4,5 калибра с затупленной головной частью в замкнутом слабоосвещенном помещении. Длина трассы составляет 33,8 м.

Для снятия эталонных значений скорости пули, дополнительно был установлен хронограф ИБХ-АСС-0014 «Стрелок», поскольку его точность совпадает с точностью, заявленной производителем. Первые выстрелы проводились с использованием именно этого прибора, который определил скорость пули $V = 83,6$ м/с.

Первые выстрелы с использованием хронографов ShootingChrony серий M-1 и Alpha оказались неуспешными, так как происходил сбой в срабатывании второго фотодатчика. Это означало, что таймер хронографа был запущен при фиксации первым датчиком пули, в то время как второй датчик пролета пули не зафиксировал.

Для устранения данной неполадки была выполнена переустановка ламп накаливания, после которой оба датчика работали исправно (40 % выстрелов). При этом значения скоростей пули расходились с эталонными приблизительно в 0,1 м/с.

В качестве эксперимента лампы накаливания были закреплены на другой стороне диффузоров, непосредственно над фотодатчиками. Однако такое изменение не улучшило работу хронографов, а даже наоборот.

Изменялись также и условия проведения стрельб, а именно исключалось любое освещение за исключением ламп накаливания, установленных непосредственно на приборах. Такие меры привели к более корректному срабатыванию приборов, что обусловлено исключением люминесцентных ламп, а следовательно снятием с фотодатчиков нагрузки в виде «мерцания».

Стоит отметить, что рабочая зона хронографов, заявленная производителем, в ходе проведения эксперимента была сокращена. Проведение стрельб показало, что хронографы срабатывают корректно в том случае, когда пуля пролетает внутри прямоугольной зоны, которая ограничена приблизительно размерами фотодатчиков (рис. 4). При пролете пули в верхних углах рабочей зоны, заявленной производителем, хронограф функционировал некорректно.

Примечательно, что наиболее близкие к эталонным значения получаются тогда, когда пуля пролетает приблизительно в середине рабочей зоны.

После первичного анализа работы хронографов, принято решение о проведении эксперимента с полным изменением условий освещения: были демонтированы лампы накаливания, установленные непосредственно на приборах.

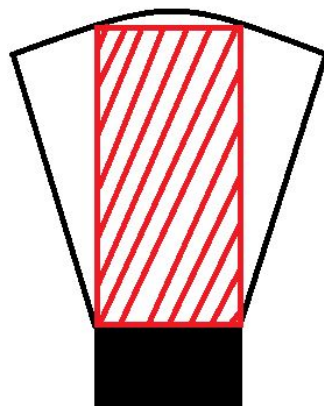


Рис. 4. Рабочая зона (заштрихована) хронографа, полученная в результате эксперимента

В качестве освещения использовали светодиодные прожекторы общей мощностью 40 Вт, которые были расположены в области смотрового окна баллистической трассы непосредственно над прибором. При этом смотровое окно устилагось матовой полупрозрачной белой бумагой, что позволяло имитировать облачную погоду, не прибегая к установке специальных диффузоров на хронографы. Такой способ освещения оказался наиболее подходящим для корректной работы хронографов. Прибор работал исправно приблизительно в 90 % выстрелов.

На основании полученных данных рассчитаны некоторые аналитические зависимости. Во-первых, стало возможным тарировать прибор, то есть найти коэффициент тарировки, который помогает определять истинное значение скорости пули в данной точке с использованием указанных хронографов. Для нахождения данного коэффициента использован хронограф модификации «М-1». Прибор установлен на расстоянии 1,23 метра от крайнего сечения баллистической трассы. На таком же расстоянии был установлен хронограф ИБХ-АСС-0014 «Стрелок», значения которого были приняты эталонными. Произведя выстрел с использованием обоих приборов, были получены следующие значения скоростей: $V_1 = 73,6$ м/с (значения снятые с хронографа ИБХ-АСС-0014 «Стрелок») и $V_2 = 76,3$ м/с (значения снятые с хронографа ShootingChrony серии «М-1»). На основании полученных данных значение коэффициента тарировки определяется как:

$$K_T = \frac{V_1}{V_2} = \frac{73,6}{76,3} = 0,96.$$

Во-вторых, по измеренным значениям скоростей в первом сечении и на некотором расстоянии был определен коэффициент силы лобового сопротивления. Он был посчитан при помощи алгоритма, основанного на оценке изменения кинетической энергии. Данный метод широко известен и подробно описан [7]. Расчетная зависимость, используемая при обработке экспериментальных данных, получается на основании закона изменения «живых» сил.

Если известен вектор состояния $[x_n, y_n, l, V]$ в точках 1 и 2 (рис. 5), то на основании указанного закона можно записать:

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \int_{l_1}^{l_2} -Xdl + \int_{y_{n1}}^{y_{n2}} -mgdy_n,$$

где m — масса тела; g — ускорение свободного падения; X — сила лобового сопротивления, $X = C_{Xa} qS$.

Силу лобового сопротивления вынесем из-под знака интеграла (среднее значение):

$$X_{cp} = \frac{m}{2} \frac{v_1^2 - v_2^2 - 2g(y_{n2} - y_{n1})}{l_2 - l_1}.$$

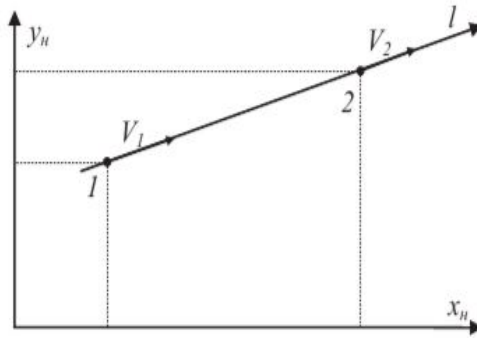


Рис. 5. Участок траектории с известными векторами состояния в точках 1 и 2

В случае стрельбы на баллистической трассе принимаем:

$$y_{H2} = y_{H1}; \quad l_1 = x_{H1}; \quad l_2 = x_{H2}.$$

Расстояние между сечениями с известными скоростями $L = x_{H2} - x_{H1} = 1,23$ м.

В данных сечениях $v_1 = 83,6$ м/с; $v_2 = 76,3$ м/с.

Таким образом, запишем

$$X_{cp} = \frac{m}{2} \frac{v_1^2 - v_2^2}{L}.$$

Полученное по данным эксперимента среднее значение силы лобового сопротивления должно быть отнесено к определенному значению скорости изделия, за которую примем среднюю скорость на длине измерения:

$$v_{cp} = \frac{v_1 + v_2}{2} = 78,6.$$

При сопоставлении выражений для среднего значения силы лобового сопротивления запишем:

$$\frac{m}{2} \frac{v_1^2 - v_2^2}{L} = C_{Xa} \frac{\rho v_{cp}^2}{2} S.$$

Отсюда получим:

$$C_{Xa} = \frac{4m}{SL\rho} \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} = 3,73.$$

В заключение отметим, что проведен анализ работы хронографов для МЛА в условиях стрельбы на баллистической трассе, который показал, что данные хронографы требуют строгого соблюдения конкретных условий проведения стрельбы. А именно, фотодатчики очень чувствительны к внешнему освещению. Также удалось установить, что рабочая зона таких хронографов много меньше заявленной, и представляет собой достаточно узкую область. Таким образом, хронографы данного типа неудобны в использовании, для измерения

скоростей ЛА на больших расстояниях. Добившись необходимых условий для корректной работы хронографов, удалось найти коэффициент тарировки и рассчитать коэффициент лобового сопротивления для пули калибра 4,5 мм, имеющей затупленную головную часть.

Литература

- [1] Кольцов Ю.Ф. *Краткие сведения о методах измерения скорости движения снарядов и пуль на траектории*. Москва, 1959. 25 с.
- [2] Емельянова Н.С. Программное обеспечение экспериментальных исследований на баллистической трассе. *Молодёжный научно-технический вестник*, 2014, № 6. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/723443.html>.
- [3] Илюхин С.Н. Методики нахождения коэффициента лобового сопротивления при проведении экспериментальных исследований на баллистической трассе. *Молодёжный научно-технический вестник*, 2014, № 1. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/704437.html>.
- [4] Илюхин С.Н., Москаленко В.О., Хлупнов А.И. Экспериментальные исследования влияния формы головной части пули на характеристики рассеивания при дозвуковых скоростях полета. *Аэрокосмический научный журнал*, 2015, № 5, с. 38–48. URL: <http://aerospjournal.ru/doc/819074.html>.
- [5] Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н. *Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях*. Москва, Наука, 1974. 344 с.
- [6] Кольцов Ю.Ф. *Определение коэффициента лобового сопротивления стрельбой на баллистической трассе*. Москва, Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1964. 28 с.
- [7] Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. *Внешняя баллистика*. Москва, Машиностроение, 2005. 608 с.

Богомолова Полина Дмитриевна — студентка кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — С.Н. Илюхин, ассистент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

SPECIFICS OF MEASURING TRAJECTORY VELOCITY OF SMALL AIRCRAFT BY MEANS OF OPTICAL CHRONOGRAPHS

P.D. Bogomolova

bpd94@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study focuses on optical chronograph design. We pinpoint the specifics of their functioning under various environmental conditions. We used chronographs to measure trajectory velocity of small aircraft, provided that the trajectory segment under consideration is horizontal or close to horizontal. We employed chronographs to work with small aircraft samples on a ballistic track. We calibrated the chronographs over the course of conducting several experiments. We computed the drag coefficient of the aircraft sample.

Keywords

Optical chronograph, velocity measurement, drag coefficient, trajectory velocity, ballistic track

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Kol'tsov Yu.F. Kratkie svedeniya o metodakh izmereniya skorosti dvizheniya snaryadov i pul' na traektorii [Summary on measurement techniques for bullet speed and movement on its trajectory]. Moscow, 1959. 25 p.
- [2] Emel'yanova N.S. Software for experimental research on ballistic track. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskij vestnik*, 2014, no. 6. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/723443.html>.
- [3] Ilyukhin S.N. Drag coefficient evaluation technique in process of experimental research on a ballistic track. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskij vestnik*, 2014, no.1. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/704437.html>.
- [4] Ilyukhin S.N., Moskalenko V.O., Khlupnov A.I. Experimentally studied influence of the bullet head shape on dispersion characteristics at subsonic airspeeds, *Aerokosmicheskij nauchnyy zhurnal* [Aerospace scientific journal], 2015, no. 5, pp. 38–48. Available at: <http://aerospjournal.ru/doc/819074.html>.
- [5] Zlatin N.A., Krasil'shchikov A.P., Mishin G.I., Popov N.N. Ballisticheskie ustanovki i ikh primeneniye v eksperimental'nykh issledovaniyakh [Ballistic installation and its use in experimental research]. Moscow, Nauka publ., 1974. 344 p.
- [6] Kol'tsov Yu.F. Opredeleniye koeffitsienta lobovogo soprotivleniya strel'boy na ballisticheskoy trasse [Drag coefficient evaluation by means of shooting at the ballistic track]. Moscow, Bauman Press, 1964. 28 p.
- [7] Dmitrievskiy A.A., Lysenko L.N. Vneshnyaya ballistika [Exterior ballistic]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005. 608 p.

Bogomolova P.D. — student, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — S.N. Ilyukhin, Assistant Lecturer, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.