

АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИЗМЕРЕНИЕМ СКОРОСТИ НА БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ТРАССЕ

П.Д. Богомолова

bpd94@mail.ru

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

Аннотация

Освещены вопросы, связанные с особенностями методики проведения экспериментальных исследований с измерением скорости на баллистической трассе. Исследованы существующие методы определения скоростей. Выполнен анализ основных допущений и обработка данных методов при различных начальных параметрах и при различных условиях полета. На основании проведенных исследований разработана совокупность рекомендаций по проведению экспериментов на баллистической трассе.

Ключевые слова

Методы определения скорости, баллистическая трасса, экспериментальное определение коэффициента лобового сопротивления

Поступила в редакцию 12.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Одна из важнейших задач экспериментальной баллистики — определение траекторной скорости летательного аппарата (ЛА). Решение этой задачи позволяет экспериментальным путем исследовать силу сопротивления воздуха и определить закон сопротивления. Начальная скорость v_0 определяет траекторию снаряда и служит критерием правильности решения задачи внутренней баллистики артиллерийской системы. Для пуль и монолитных снарядов начальная скорость определяет максимальную энергетику ЛА (дульную энергию).

Сведения о баллистической трассе. Для экспериментального определения скорости движения малогабаритных ЛА (МЛА) необходимо создать некоторую совокупность условий окружающей среды, т. е. баллистическую трассу [1].

С помощью баллистической трассы можно измерить:

- скорость ЛА в одной или нескольких точках траектории;
- аэродинамические характеристики натуральных образцов и моделей;
- параметры поступательного и вращательного движения ЛА;
- характеристики устойчивости и динамического качества натуральных образцов и моделей;
- характеристики рассеивания точек попадания;
- параметры деривации при проведении стрельб из нарезного оружия.

В состав баллистической установки обычно входят пусковая установка, которая запускает натуральный образец или модель; баллистическая трасса, оборудованная различной измерительной и регистрирующей аппаратурой для измерения параметров траектории и ориентации ЛА; специальный уловитель ЛА.

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

Тело, ускоренное с помощью пусковой установки, может быть использовано для проведения баллистических экспериментов, аэро- и газодинамических исследований, а также для изучения процессов соударения. При проведении различных экспериментов с ЛА на баллистических установках необходимо знание таких характеристик, как скорость тела, его форма и ориентация в пространстве.

Для определения этих характеристик баллистическая трасса оснащена разнообразной регистрирующей и измерительной аппаратурой, построенной с использованием цифровой вычислительной техники, оптики, рентгенографии, инфракрасных, лазерных и ультразвуковых технологий (рис. 1).

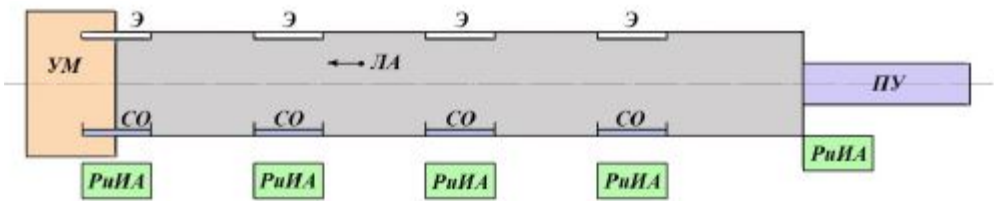


Рис. 1. Принципиальная схема баллистической трассы закрытого типа:

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

Основная аппаратура, применяемая в экспериментальных установках:

- 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;
- устройства синхронизации, обеспечивающие съемку в заданный момент,
- программное обеспечение по обработке результатов эксперимента.

Важнейшим преимуществом применения 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 отсутствие вносимых искажений в характере движения тела в процессе полета при определении коэффициента лобового сопротивления $C_{Ха}$ по измеренным значениям скорости. Таким образом, учитывается влияние возможного поворота ЛА относительно продольной оси, возможных поперечных колебаний и других факторов, которые трудно смоделировать при испытаниях в аэродинамических трубах.

К недостаткам баллистических установок относятся однократное использование ЛА, так как после каждого выстрела модель обычно разрушается, а также небольшие размеры снарядов и изменение углов атаки модели в ограниченных пределах [2].

Баллистическая трасса кафедры СМ-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана имеет длину 33,8 м и диаметр сечения 0,8 м. В настоящее время трасса находится в состоянии реконструкции, проводится ее дооснащение различным оборудованием, что не мешает проведению различных опытных стрельб.

Методы определения скорости. Существует две основные группы методов определения скорости движения летательных аппаратов:

- определение действительной скорости движения ЛА на траектории;
- определение средней скорости на заданном участке траектории.

Одним из примеров методов первой группы является метод, основанный на эффекте Доплера. Суть метода заключается в том, что электромагнитные колебания, отражаясь от подвижного экрана, изменяют свою частоту в зависимости от скорости его движения (рис. 2). Следовательно, если вслед за ЛА послать кратковременно электромагнитные импульсы постоянной частоты f (Гц), то они, отражаясь от снаряда, движущегося со скоростью v , попадут в приемное устройство уже с другой частотой f_1 .

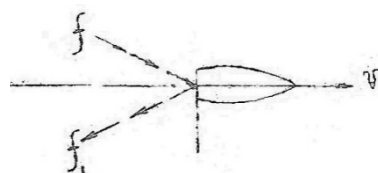


Рис. 2. Визуальное представление метода Доплера, попадание электромагнитных колебаний на подвижный объект и их отражение

Зная соотношение между f и f_1 , и измеряя для данного момента времени разность частот, можно для этого же момента времени определить поступательную скорость ЛА.

Методы второй группы исходят из определения понятия скорости:

$$v = \frac{dl}{dt}. \quad (1)$$

На основе данной формулы для небольших конечных промежутков времени получают формулу для вычисления средней скорости:

$$v_{\text{cp}} = \frac{\Delta l}{\Delta t}. \quad (2)$$

В экспериментах данный метод определения скорости v_{cp} может быть реализован двумя способами:

1) измерения пути Δl , проходимого телом за фиксированный промежуток времени $\Delta t = t_{\text{изм}}$;

2) измерение времени прохождения телом фиксированного участка пути $\Delta l = l$.

Первый способ реализуется в случае, когда определяется скорость движущегося объекта, находящегося на значительном удалении от измерительного пункта, второй — при сравнительно небольшом удалении тела [3].

Таким образом, одним из основных методов определения траекторной скорости ЛА является метод измерения средней скорости ЛА на заданном участке траектории. Согласно данному методу, для небольших, конечных промежутков времени средняя скорость ЛА:

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta l}{\Delta t}. \quad (3)$$

Данный метод можно реализовать, измеряя время прохождения ЛА фиксированного расстояния Δl с помощью специальных приборов — хронографов.

При проведении экспериментов на большой баллистической трассе кафедры СМ-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана для измерения скорости используются хронографы оптического типа (рис. 3).

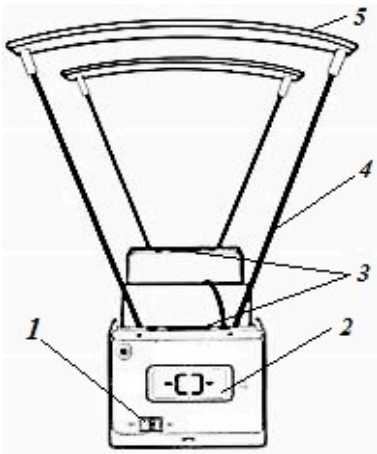


Рис. 3. Устройство оптического хронографа:

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

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, когда объект пересекает вторую рабочую зону над вторым датчиком. Затем блок обработки переводит эту информацию в значение скорости v (м/с).

Хронографы такого типа позволяют измерять скорость с точностью до 0,1 м/с.

Для выработки необходимых рекомендаций по использованию данного метода и его приборной реализации необходимо проанализировать основные допущения метода и отработать его для различных условий полета и конфигураций ЛА.

При расчете принимается допущение, что полученная скорость относится к середине участка траектории ЛА. Для того чтобы исследовать данное допущение и точностные особенности метода, необходимо провести либо большой объем натурных испытаний, либо создать программный комплекс, который мог бы смоделировать траекторию ЛА, и на характеристиках полученной траектории отработать данный метод.

Составим математическую модель (ММ) движения ЛА, приняв следующие допущения:

- движение ЛА происходит в вертикальной плоскости;
- гравитационное поле плоско-параллельное;
- расчет атмосферы проводится по эмпирическим зависимостям;
- на тело действуют лишь силы тяжести и лобового сопротивления.

Принятые допущения можно считать обоснованными, поскольку моделируется проведение стендового эксперимента с МЛА в фиксированной области пространства, ограниченной баллистической трассой. МЛА представляет собой осесимметричную статически и динамически устойчивую пулю, калибром 4,5 мм и массой 0,5 г.

Принимаемая ММ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= V \cos \theta; \\ \frac{dy}{dt} &= V \sin \theta; \\ m \frac{dV}{dt} &= -X_a - G \sin \theta; \\ mV \frac{d\theta}{dt} &= -G \cos \theta.\end{aligned}$$

Для решения данной системы дифференциальных уравнений на языке программирования С написан программный комплекс. Расчеты проводили при следующих значениях начальных параметров: $V_0 = 102,5252$ м/с; $\theta_0 = 0,3^\circ$; $x_0 = y_0 = 0$.

В результате работы программы были найдены характеристики траекторий, построенных для ЛА различной конфигурации, с коэффициентами лобового сопротивления 0,3, 0,5, 0,6 и 0,7. В коде реализован метод определения средней скорости ЛА путем имитации работы хронографа. Для получения закономерностей и отслеживания тенденций расстояние между плоскостями, фиксирующими начальный и конечный момент времени полета ЛА, варьировалось в промежутке 1...7 м.

Основной выходной величиной было значение средней скорости ЛА на заданном расстоянии, которое затем отнесли к той координате траектории, которой оно соответствовало согласно расчету. Обозначим данное расстояние l_{cp} . Затем расстояние l_{cp} было отнесено к общей длине измеряемого участка l для получения относительной величины. Последняя, согласно методу, должна быть серединой фиксированного отрезка, на котором происходит отработка метода:

$$\bar{l} = \frac{l_{cp}}{l}.$$

Проанализировав величину \bar{l} для нескольких траекторий, построили графическую зависимость (рис. 4).

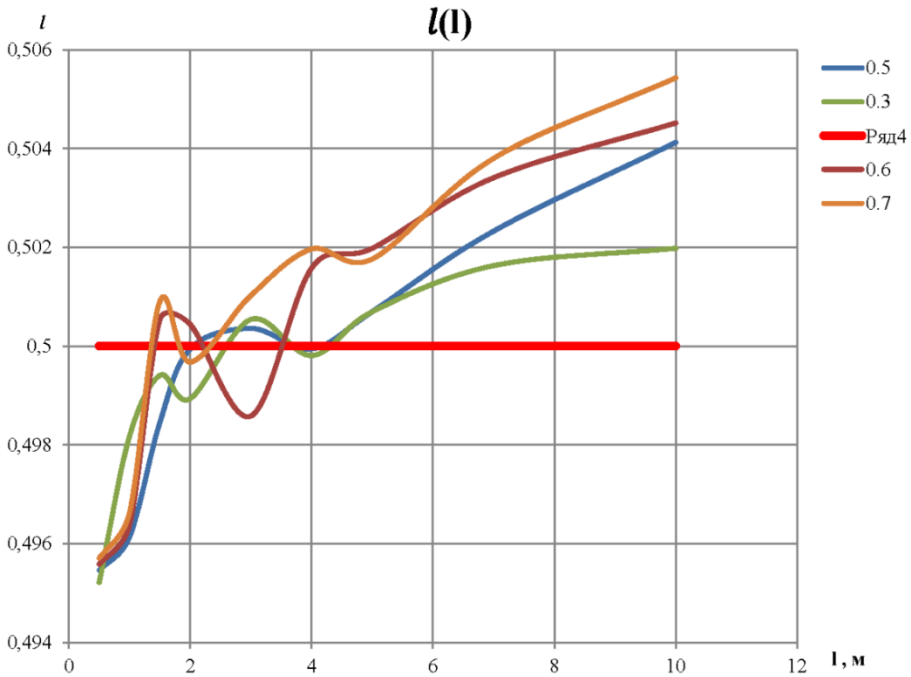


Рис. 4. Зависимость относительной координаты \bar{l} от длины измеряемого участка l при коэффициенте лобового сопротивления C_x , равном 0,3; 0,5; 0,6 и 0,7

На рис. 4 видно, что наилучшим образом \bar{l} соответствует середине участка траектории для малых C_x в том случае, когда фиксированное расстояние между измеряемыми плоскостями составляет 1,5...4,0 м. Для больших C_x это расстояние сокращается до 1,5...2,0 м. При очень малых расстояниях значение C_x не является величиной, определяющей \bar{l} , в то время как при больших расстояниях можно наблюдать существенные расхождения. Следует также отметить, что при расстояниях до 2 м, полученное значение \bar{l} находится до точки, соответствующей реальной середине траектории ЛА, а при увеличении фиксированного расстояния картина меняется, и относительная координата \bar{l} уже всегда будет находиться дальше середины траектории.

Необходимо проверить применимость хронографов для измерений скорости в различных баллистических условиях. Очевидно, что какие-либо погрешности определения средней скорости на участке ее измерения в первую очередь зависят от характера изменения скорости на этом интервале. Поэтому представляется целесообразным изучить влияние на точность измерения скорости данным методом основных постоянных величин, формирующих профиль скорости на участке измерения. Такими параметрами являются начальная скорость v_0 и коэффициент лобового сопротивления C_x . Следует отметить, что еще один параметр, определяющий профиль скорости, начальный угол бросания, не оказывает никакого влияния на точность, поскольку, измеряемым параметром является не полная скорость, а ее горизонтальная проекция.

Обозначим разность между действительной скоростью и скоростью, полученной методически, через Δv . С использованием программного обеспечения проведено исследование влияния начальной скорости v_0 на расхождение скоростей Δv .

При различных значениях начальной скорости v_0 (75, 100, 125, 150 и 200 м/с), и фиксированном значении $C_x = 0,3$ с помощью программы были смоделированы соответствующие траектории. Их анализ показал, что значение v_0 не влияет на точность измеренной скорости. При этом исследуемые погрешности на два порядка ниже, чем точность хронографов, используемых в лаборатории. Следовательно, начальная скорость v_0 не имеет принципиального значения при определении действительной скорости ЛА на траектории, что не накладывает ограничений на дульную энергию пусковой установки. Это обусловлено тем, что начальная скорость влияет лишь на количественную характеристику профиля скорости.

Далее проводили анализ влияния C_x на значение расхождения Δv , который показал, что C_x так же, как и значение v_0 , не влияет на точность измерения скорости. Однако следует отметить, что при увеличении C_x расхождение Δv также увеличивается в пределах допустимой погрешности, как видно из рис. 5.

Изменение коэффициента C_x уже качественно влияет на характер изменения скорости на интервале измерения, что следует из увеличения Δv . Однако, вследствие малости перепада скорости на этом интервале, обусловленной малым отрезком времени, данная погрешность также не превышает заявленной точности.

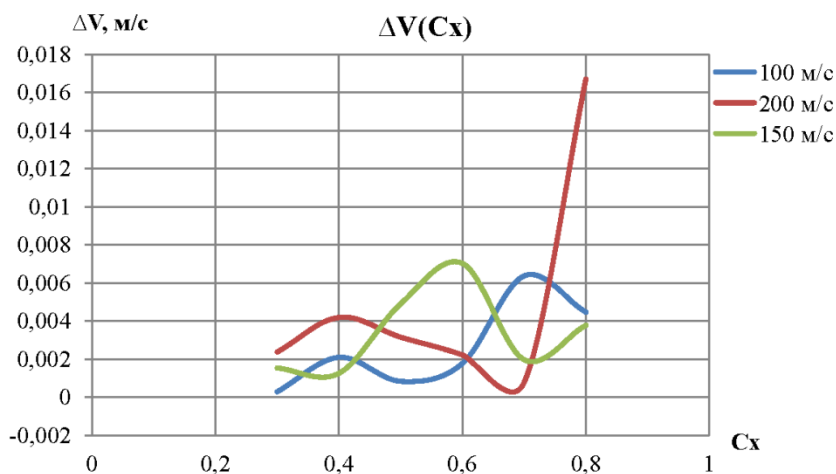


Рис. 5. Зависимость расхождения Δv от коэффициента C_x скорости МЛА, равной 100, 150 и 200 м/с

Определить коэффициент C_x по результатам измерений можно различными способами: аналитическими методами, эмпирическими зависимостями или цифровым моделированием. Очевидно, что при данных расчетах, помимо измерений скорости, необходимо иметь информацию о параметрах среды (атмосферы), в которой проводится стрельба.

В качестве аналитического метода можно представить алгоритм, основанный на оценке изменения кинетической энергии [3], широко известный и подробно описанный. Стрельбы для определения коэффициента лобового сопротивления должны быть организованы таким образом, чтобы измеряемый участок был горизонтальным для исключения влияния силы тяжести.

На основании закона изменения кинетической энергии можно записать

$$\frac{m}{2}(v_1^2 - v_2^2) = \int_{S_1}^{S_2} X_a dS, \quad (4)$$

где $S_2 - S_1 = L$ — длина мерного участка, на котором определяется среднее значение силы лобового сопротивления $X_{a\text{cp}}$.

Тогда

$$X_{a\text{cp}} = \frac{m}{2} \frac{v_1^2 - v_2^2}{L}. \quad (5)$$

Полученное по данным эксперимента значение $X_{a\text{cp}}$ должно быть отнесено к определенному значению скорости $v_{\text{cp}} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$.

Для перехода к аэродинамическому коэффициенту запишем

$$X_{a\text{cp}} = S \frac{\rho v_{\text{cp}}^2}{2} C_{X_a}. \quad (6)$$

Если приравнять уравнения (5) и (6), получим:

$$\frac{m}{2} \frac{v_1^2 - v_2^2}{L} = S \frac{\rho}{2} \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \right)^2 C_{X_a}. \quad (7)$$

Отсюда следует, что

$$C_{X_a} = \frac{4m}{SL\rho} \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2}, \quad (8)$$

где v_1, v_2 — значения скоростей, измеренные хронографом в измеряемых плоскостях.

Метод определения коэффициента лобового сопротивления реализуется при использовании значений скорости в двух разных сечениях при допущении, что исследуемый участок траектории является горизонтальным. Следовательно, целесообразно исследовать отношение v_x/v , для того чтобы установить, какая часть полной скорости принадлежит ее горизонтальной составляющей при различных значениях угла бросания $\theta_0 = \{0,3^\circ, 1^\circ, 2^\circ \text{ и } 5^\circ\}$.

Из полученных графических зависимостей (рис. 6) следует, что при наименьшем угле бросания $\theta_0 = 0,3^\circ$ горизонтальная составляющая скорости v_x наиболее

близка к значению полной скорости v на всем участке траектории. Для других углов бросания при сравнительно малых значениях θ_0 значение v_x очень близко к значению v , однако при $\theta_0 = 5^\circ$ наблюдается сравнительно большое расхождение.

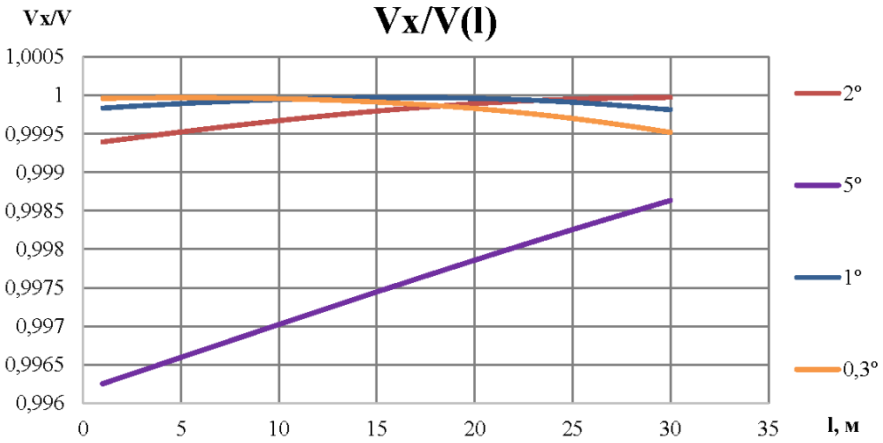


Рис. 6. Зависимость отношения v_x/v от расстояния между замеряемыми плоскостями при θ_0 , равном 0,3; 1; 2 и 5°

Таким образом, если рассчитывать коэффициент C_x , используя формулу (8), можно получить значения C_x , близкие к истинному значению коэффициента лобового сопротивления. При этом наиболее точные значения получают при углах бросания $\theta_0 = \{0,3^\circ, 1^\circ \text{ и } 2^\circ\}$, что объясняется близостью значения v_x к значению полной скорости v при расстоянии между замеряемыми пластинами $l = 10 \text{ м}$ (рис. 7).

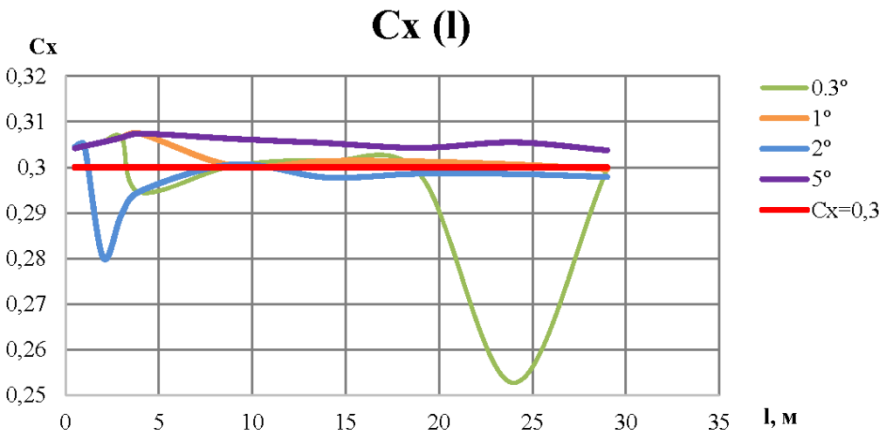


Рис. 7. Зависимость коэффициента лобового сопротивления C_x , рассчитанного методически, от расстояния между замеряемыми плоскостями, l при θ_0 , равном 0,3; 1; 2 и 5°

Также целесообразно провести исследование зависимости коэффициента C_x , полученного с использованием формулы (8), от точности измерения траекторной скорости.

Для этого необходимо использовать при расчете коэффициента C_x точное значение скорости, полученное путем моделирования движения ЛА, и значение скорости, округленное до 0,1 м/с (имитируя измерения хронографа), а также значение, округленное до 0,01 м/с, для получения более широкого диапазона зависимостей. Результаты таких расчетов, представленные на рис. 8, подтверждают вполне очевидное и справедливое суждение о том, что точное измерение скорости позволяет рассчитать значение C_x , наиболее близкое к истинному значению. Округление значения скорости до 0,1 м/с при данном диапазоне значений скоростей также вполне очевидно приводит к появлению наибольшего расхождения между истинным значением C_x и значением, рассчитанным по формуле (8). Однако, как можно видеть на рис. 8 достаточно точные значения C_x получаются при расстоянии между замеряемыми плоскостями, равном 10 м и более.

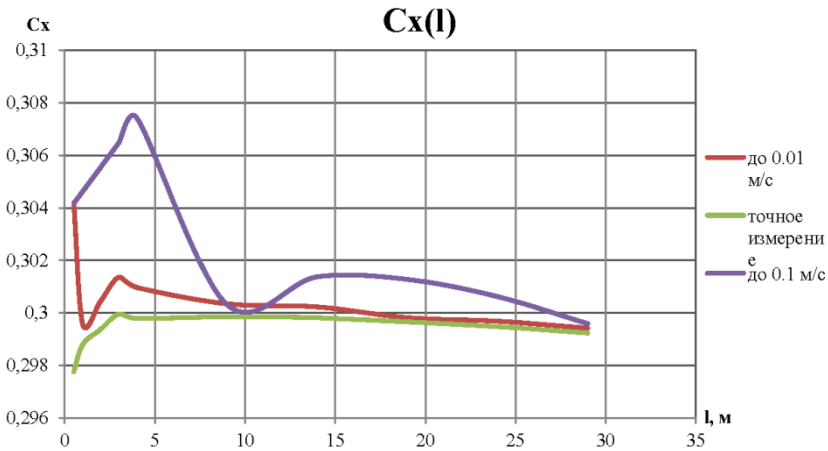


Рис. 8. Зависимость коэффициента лобового сопротивления C_x , рассчитанного методически, от расстояния между замеряемыми плоскостями, при различной точности измерения скорости

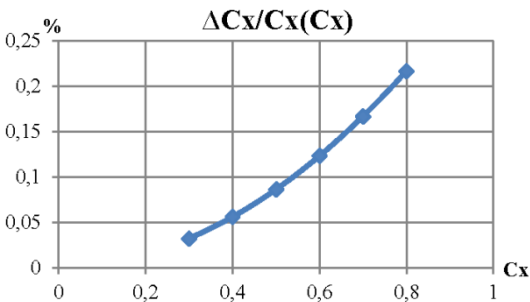


Рис. 9. Зависимость относительной погрешности расчета C_x от значения C_x

Если проводить моделирование, варьируя значения C_x в диапазоне 0,3...0,8, можно заметить, что относительная погрешность расчетного значения коэффициента C_x растет с увеличением непосредственно его истинного значения, как представлено на рис. 9. Это связано с тем, что при большем значении C_x МЛА быстрее теряет скорость, по дистанции траектория искривляется более интенсивно. Это означает, что основное допущение данного метода соблюдается хуже, а следовательно, и результат расчета получается более грубый.

После анализа основных допущений рассмотренного метода целесообразно провести его экспериментальную реализацию и оценить полученные результаты.

В лаборатории кафедры «Экспериментальная внешняя баллистика» на баллистической трассе были установлены рамочные хронографы оптического типа Shooting Chrony. Данные хронографы настроены в соответствии с приведенными выше рекомендациями. Дистанция между хронографами составила 10 м, именно такая дистанция, согласно исследованиям, должна удовлетворять получению наиболее точных результатов.

С использованием данных хронографов проводили измерение скоростей для МЛА с различными головными частями: конической в виде плоского торца.

По снятым значениям скоростей были рассчитаны коэффициенты лобового сопротивления: для плоского торца — 0,624; для конуса — 0,489.

Коэффициент лобового сопротивления можно вычислить итерационным путем, смоделировав траекторию ЛА со всеми известными начальными данными, считая известными «краевые условия», в частности координаты начальной и конечной точек траектории [3].

При моделировании движения МЛА с различными коэффициентами C_x при равных прочих условиях можно отметить, что конкретному значению коэффициента соответствует определенная траектория. Это обусловлено тем, что у МЛА разной формы скорость изменяется разнообразным образом, а значит, и кривизна траекторий таких МЛА будет совершенно различная. На рис. 10 и 11 видно, что чем больше значение коэффициента C_x , тем интенсивнее изменяется кривизна траектории, тем соответственно меньше дальность полета МЛА и больше «проседание» траектории.

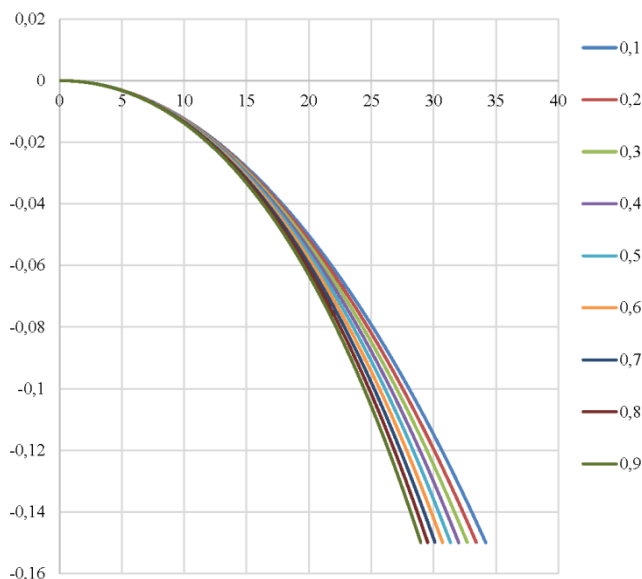


Рис. 10. Зависимость вида траектории МЛА от коэффициента C_x

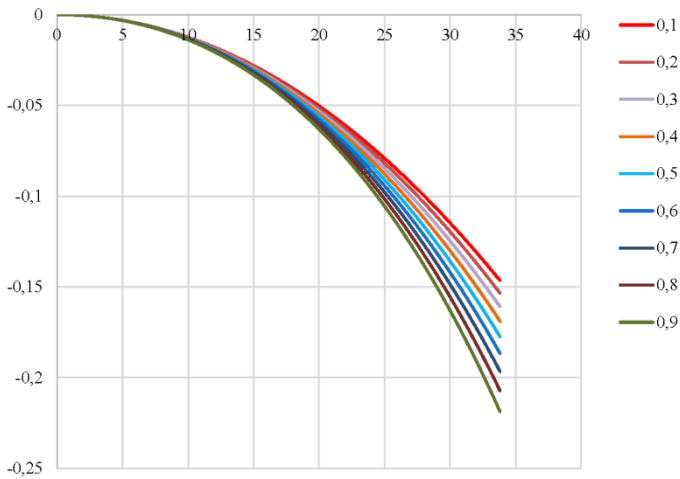


Рис. 11. Зависимость вида траектории МЛА от коэффициента C_x

Основная проблема данного метода состоит в том, что невозможно экспериментально получить траекторию, которая могла бы быть смоделирована, так как при моделировании не учитываются различные случайные возмущения.

Если провести анализ таких возмущений, можно прийти к выводу, что, например, небольшое отклонение начального угла бросания от номинального значения, которое может быть спровоцировано уводом ствола, приводит к достаточно сильному изменению траектории (рис. 12). Таким образом, для того чтобы получить «адекватные» координаты конечной точки, необходимо соблюдать номинальное значение угла бросания с точностью вплоть до $0,001^\circ$, что достаточно сложно реализовать.

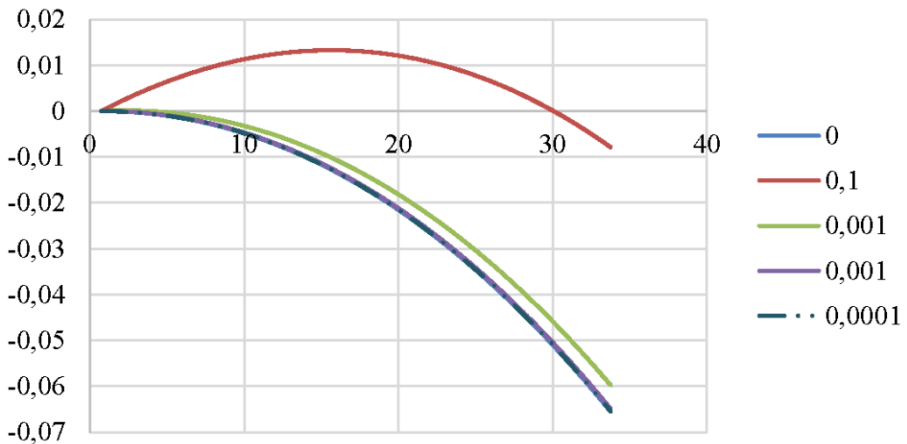


Рис. 12. Зависимость «проседания» траектории от угла бросания

Еще один параметр, который влияет на вид траектории — скорость бросания. Как видно на рис. 13, небольшое отклонение скорости незначительно влияет на изменение траектории. Наиболее близкая к номинальной (обозначена «0»

на рис. 14) траектория получается при отклонении начальной скорости на 0,1 м/с от номинального значения (отмечена индексом «0,1»). При этом, если начальная скорость будет отличаться от номинального значения даже на 1 м/с, такая траектория также незначительно отличается от номинальной (рис. 14).

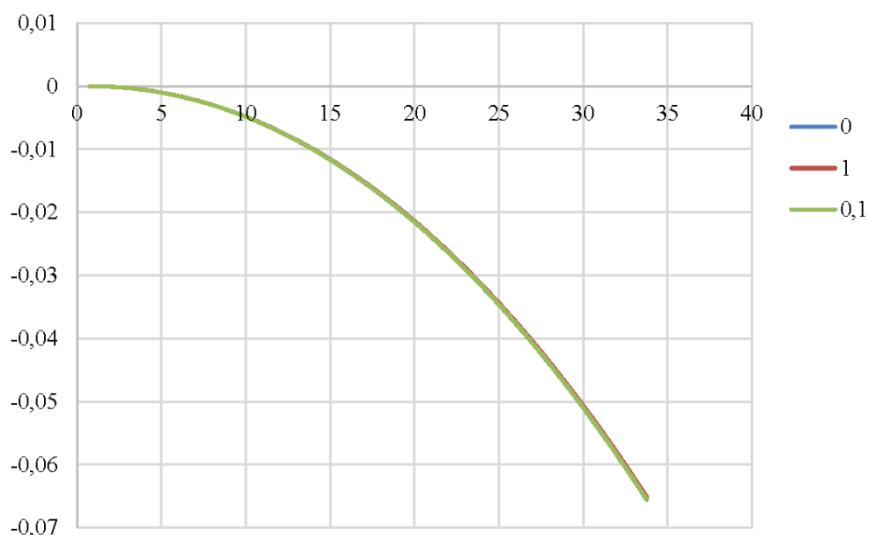


Рис. 13. Зависимость «проседания» траектории от отклонения значения начальной скорости от номинального

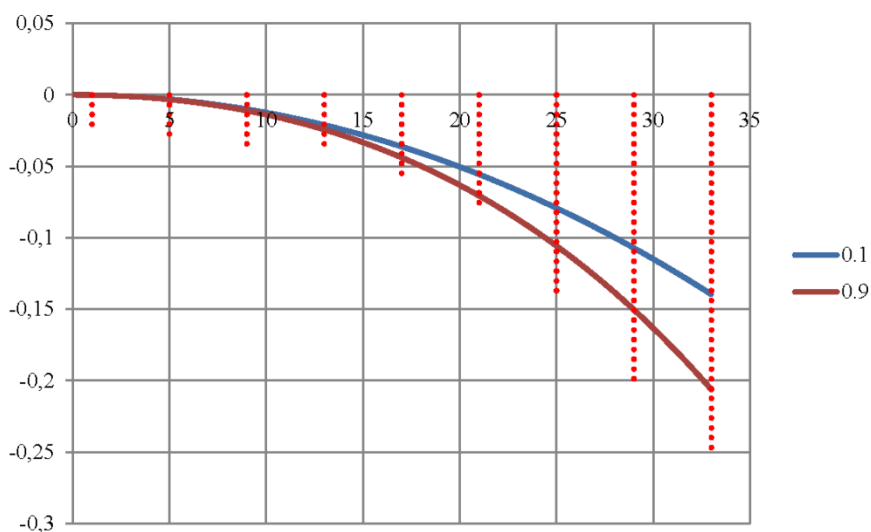


Рис. 14. Зависимость «проседания» траектории от значения начальной скорости

Для повышения эффективности предложенного метода следует проанализировать условия эксперимента и применяемую ММ. Проведение опытных стрельб на баллистической трассе определяет настильный характер траектории движения ЛА. В соответствии с этим угол наклона траектории на всем протяжении полета будет величиной малого порядка. Коэффициент лобового сопро-

тивления влияет на изменение скорости ЛА. Из условия, что $|\theta| \ll \frac{\pi}{4}$ следует неравенство частных производных:

$$\frac{\partial x_n}{\partial v} \gg \frac{\partial y_n}{\partial v}.$$

Отсюда следует обоснование выбора алгоритма итерационного подбора значения коэффициента C_x при фиксированном значении координаты y_k исходя из условия получения необходимого значения координаты x_k . Это связано с тем, что любые траектории, полученные в ходе эксперимента, будут отличны от номинальной, которую можно смоделировать, используя цифровую вычислительную технику. Это происходит вследствие неучтенных возмущений. В результате при проведении стрельб с аналогичными начальными условиями будет получена некоторая выборка значений одной координаты на плоскости, параллельной соответствующей оси. Поскольку объектом исследования является коэффициент лобового сопротивления, то рационально исследовать ту выборку, на которую оказывают наибольшее влияние его вариации. Таким образом, исследования полученной дальности позволяют определить C_x с большей точностью. В подтверждение данным доводам ниже представлены графики, иллюстрирующие что разброс координат по оси измерения дальности, гораздо шире, чем по оси измерения высоты.

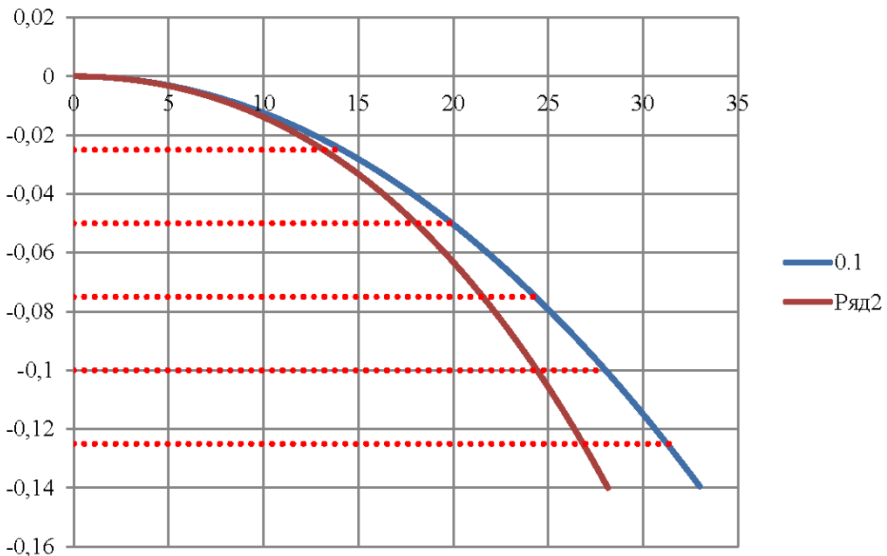


Рис. 15. Зависимость «проседания» траектории от значения начальной скорости

Выводы. На основании проведенных расчетов и результатов эксперимента можно представить рекомендации по использованию хронографов оптического типа и методов определения скорости ЛА и коэффициента лобового сопротивления.

1. Анализ работы хронографов открытого типа показал, что данные приборы требуют четкого соблюдения конкретных условий проведения стрельбы, поскольку фотодатчики очень чувствительны к внешнему освещению. Также выявлено, что рабочая зона таких хронографов намного меньше заявленной и представляет собой достаточно узкую область пространства. Таким образом, хронографы данного типа крайне неудобны в использовании для измерения скоростей МЛА на больших расстояниях. В отличие от таких хронографов хронографы закрытого типа не обладают данными недостатками, но их конструкция накладывает более жесткие требования к траектории выстрела.

2. Доказано, что основное допущение метода определения скорости, об отношении полученной скорости к точке траектории, соответствующей середине, более справедливо в том случае, когда длина измерительного участка составляет 1,5...4 м для МЛА с малым коэффициентом лобового сопротивления и 1,5...2 м, при его больших значениях.

3. Следует отметить, что вследствие разложения вектора скорости на две составляющие — горизонтальную и вертикальную — данный метод следует применять для траекторий с малыми значениями угла бросания в диапазоне $0,3...2^\circ$, для пневматического оружия.

4. Исследование метода определения коэффициента лобового сопротивления по известным значениям скоростей показало, что наиболее точные результаты достигаются в том случае, когда угол бросания мал и расстояние между замеряемыми плоскостями составляет около 10 м.

5. Анализ метода определения коэффициента лобового сопротивления по известным краевым условиям показал, что при проведении эксперимента по получению краевых условий необходимо очень точно соблюдать значение угла бросания, от которого зависит крутизна траектории. Вместе с этим, целесообразно осуществлять итерационный подбор коэффициента лобового сопротивления при фиксированном значении координаты y_k для получения терминального условия x_k .

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. *Молодежный 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. *Молодежный 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.
- [8] Коновалов А.А., Николаев Ю.В. *Внешняя баллистика*. Москва, ЦНИИ информации, 1979, 228 с.
- [9] Илюхин С.Н., Казаковцев В.П., Корянов В.В. Баллистический анализ возможности парирования ветровой нагрузки на начальном участке траектории перспективных летательных аппаратов. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 11, с. 193–203. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/825899.html> (дата обращения 15 мая 2017).
- [10] Казаковцев В.П., Жилейкин В.Д. *Обработка стрельб*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 24 с.
- [11] Грабин В.В., Илюхин С.Н., Клишин А.Н., Хлупнов А.И. *Проведение экспериментальных исследований на баллистической трассе*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 37 с.
- [12] Жилейкин В.Д. *Решение уравнений внешней баллистики на ЭВМ*. В 3 ч. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.

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.

ANALYSIS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATION TECHNIQUES FOR THE CASE OF VELOCITY MEASUREMENT ON A BALLISTIC TRACK

P.D. Bogomolova

bpd94@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study deals with the specifics of experimental investigation techniques for measuring velocities on a ballistic track. We studied existing methods of estimating velocities. We analysed the main assumptions and tested these methods at various initial parameters and for various flight conditions. The investigations conducted allowed us to develop a collection of recommendations for carrying out experiments on a ballistic track.

Keywords

Velocity estimation techniques, ballistic track, determining the drag coefficient experimentally

© 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 in methods of velocity measurement of missiles and bullets on their trajectory]. Moscow, 1959, 25 p.
- [2] Emel'yanova N.S. Software for experimental research on ballistic track. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy 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-tekhnicheskiiy 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. *Aerokosmicheskiiy nauchnyy zhurnal*, 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 primenenie v eksperimental'nykh issledovaniyakh [Ballistic installation and its use in experimental research]. Moscow, Nauka publ., 1974, 344 p.
- [6] Kol'tsov Yu.F. Opredelenie 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.
- [8] Kononov A.A., Nikolaev Yu.V. Vneshnyaya ballistika [Exterior ballistic]. Moscow, TsNII informatsii publ., 1979, 228 p.
- [9] Ilyukhin S.N., Kazakovtsev V.P., Koryanov V.V. Ballistic analysis of capability to parry the wind load at initial flight path of promising aircrafts. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. BMSTU]. 2015, no. 11, pp. 193–203. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/825899.html> (accessed 15 May 2017).
- [10] Kazakovtsev V.P., Zhileykin V.D. Obrabotka strel'b [Shooting processing]. Moscow, Bauman Press, 2009. 24 p.

- [11] Grabin V.V., Ilyukhin S.N., Klishin A.N., Khlupnov A.I. Provedenie eksperimental'nykh issledovaniy na ballisticheskoy trasse [Taking experimental research on ballistic track]. Moscow, Bauman Press, 2016, 37 p.
- [12] Zhileykin V.D. Reshenie uravneniy vneshney ballistiki na EVM. V 3 ch. [Computer solution of exterior ballistic equations. In 3 vol.]. Moscow, Bauman Press, 2003.

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, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.