

УДК 531.552

Программное обеспечение экспериментальных исследований на баллистической трассе

*Емельянова Н.С., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Динамика и управление полётом ракет и космических аппаратов»*

*Научный руководитель: Илюхин С.Н., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
kafsm3@sm.bmstu.ru*

Объектом изучения такой науки, как баллистика, является полёт, то есть рассмотрение движения некоторого тела и сил, действующих на него, при отсутствии механических связей. Однако главным инструментом современной баллистики представляется создание формализованной модели данного тела и его движения с учётом схематизированных воздействий на него. Поддержание адекватности таких моделей реальным условиям требует значительного объёма эмпирических исследований, образующих раздел экспериментальной баллистики. Относится это не только к этапу лётных или натурных испытаний изделия, но и стендовых экспериментов. В настоящее время широкое распространение получили лабораторные испытания на баллистических трассах открытого и закрытого типов.

Баллистическая трасса – это специально оборудованная стрелковая трасса, позволяющая в полигонных или лабораторных условиях производить стрельбу специальными моделями, пулями, снарядами для исследования процесса свободного полёта летательного аппарата (ЛА) и для экспериментального определения:

- скорости ЛА в одной или нескольких точках траектории;
- аэродинамических характеристик натурных образцов и моделей;
- параметров поступательного и вращательного движения ЛА;
- характеристик устойчивости и динамического качества натурных образцов и моделей;
- характеристик рассеивания точек попадания;
- параметров деривации при проведении стрельб из нарезного оружия.

Баллистическая установка обычно состоит из:

- 1) Пусковой установки, запускающей натурный образец или модель;
- 2) Баллистической трассы, оборудованной измерительной аппаратурой для фиксирования параметров траектории и ориентации ЛА;
- 3) Специального уловителя летательных аппаратов.

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

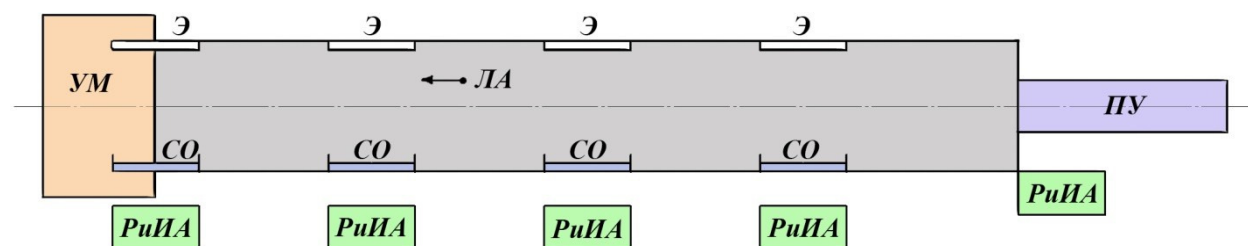


Рис. 1. Принципиальная схема баллистической трассы закрытого типа.

ПУ – пусковая установка, РиИА – регистрирующая и измерительная аппаратура,

СО – смотровые окна, УМ – уловитель моделей, Э – экраны

Изначально отстрел моделей производился посредством обычных артиллерийских орудий. В процессе развития баллистических установок стали применяться пневматические пушки. Вместо открытого тира эксперименты начали проводиться в герметичных камерах с возможностью регулирования параметров среды. Такие установки позволили моделировать полёт ракет и снарядов на различных высотах, при больших скоростях, а также высоких температурах торможения [1].

Долгое время проведение испытаний в баллистических установках сводилось к наблюдениям за моделью извне. На сегодняшний день, в связи со стремительным развитием приборостроения и постоянным совершенствованием датчиковой аппаратуры, появились широкие возможности для телеметрического измерения параметров полёта ЛА, и достижения большей точности в определении характеристик испытываемых моделей.

Следует отметить, что совершенствование пусковых установок продолжается. В их качестве часто применяются опытные оружейные системы, которые в таком случае являются объектом исследования. К примеру, всё большее развитие получают инновационные разработки в области электромагнитных ускорителей, в частности импульсный электродный ускоритель масс (рельсотрон), уже сегодня позволяющие достигать гиперзвуковых скоростей свыше 15 чисел Маха.

Тело, ускоренное с помощью пусковой установки, может быть использовано для проведения баллистических экспериментов, аэро- и газодинамических исследований, а также для изучения процессов соударения. Какие бы эксперименты не проводились с ЛА на баллистических установках, в любом из них требуется знание таких характеристик, как скорость тела, его форма и ориентация 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 на баллистических установках, является:

- датчики, фиксирующие моменты пролёта моделью определённых сечений трассы;
- специальные рамы-мишени, фиксирующие положение ЛА при пролёте через определенные сечения трассы;
- высокоскоростные видео- и фотокамеры;
- осветительная аппаратура;
- компьютеры, с которых осуществляется управление камерами и обработка полученных результатов;
- линии связи к удалённым камерам и устройствам (волоконная оптика);
- устройства синхронизации, обеспечивающие съёмку в заданный момент;
- программное обеспечение по обработке результатов эксперимента.

Основным преимуществом баллистических установок является экспериментально проводимый реальный полёт 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 $C_{\chi a}$ по измеренным значениям скорости не вносятся искажений в характер движения тела в процессе полёта. То есть, учитывается влияние возможного поворота ЛА относительно продольной оси, возможных поперечных колебаний и др. факторов, которые трудно смоделировать при испытаниях в аэродинамических трубах.

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.



Рис. 2. Большая баллистическая трасса кафедры СМ-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана

Современный уровень развития экспериментальных установок требует высоких вычислительных мощностей. Обилие высокотехнологичных регистрационных измерительных средств на баллистической трассе предполагает высокий уровень автоматизации обработки результатов эксперимента, создание локальных информационных сетей. Однако современные проблемы отечественной экспериментальной баллистики не всегда позволяют реализовывать процесс проведения эксперимента и обработки полученных данных в полном объёме или на должном уровне. В связи с этим представляется необходимым создание тривиального программного комплекса для первичной обработки данных экспериментов, произведённых на баллистических установках различного уровня.

Одним из таких программных комплексов является пакет «Математическая обработка баллистических испытаний 2D» (МОБИ 2D) разработанный автором на кафедре СМ-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Функциями данного комплекса является моделирование пассивного неуправляемого полёта статически устойчивого тела (модели, пули, снаряда) и определение характеристик рассеивания точек попадания в мишень. Программный пакет разработан в визуальной среде C++ Builder на языке C++.

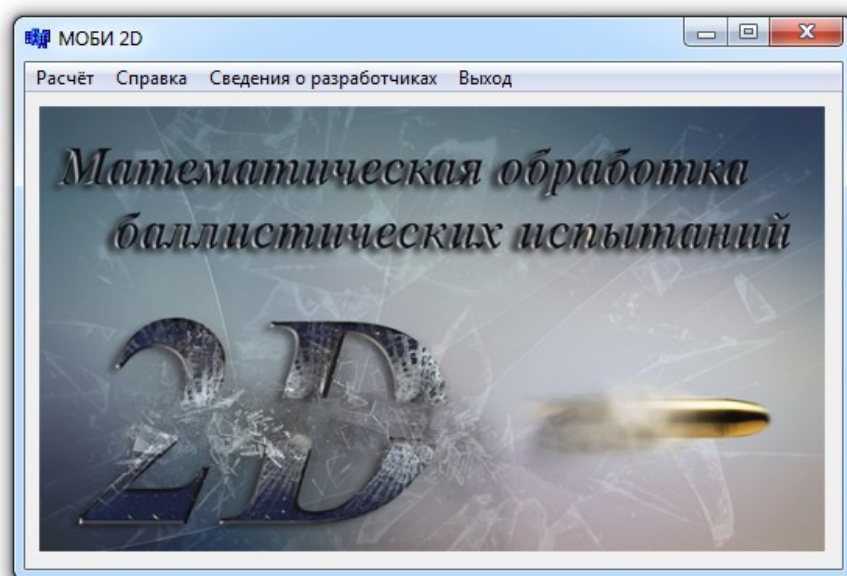


Рис. 3. Основное диалоговое окно программного комплекса МОБИ 2D

Для выполнения первой из обозначенных функций служит модуль «Расчёт траектории ЛА». Рассмотрим формализованную модель, использующуюся в нём.

В качестве базовой системы координат (СК) используется нормальная СК, начало отсчёта которой расположено в нижнем левом углу рассматриваемой трассы. Основным допущением является то, что полёт неуправляемого ЛА происходит в вертикальной плоскости. Гравитационное поле принимается плоскопараллельным. В этом случае математической моделью движения снаряда может служить следующая система уравнений, описывающая движение центра масс ЛА в пассивном полёте [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = V \cdot \cos \theta ; \\ \frac{dy}{dt} = V \cdot \sin \theta ; \\ m \cdot \frac{dV}{dt} = -X_a - mg \cdot \sin \theta ; \\ mV \cdot \frac{d\theta}{dt} = -mg \cdot \cos \theta . \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь:

$X_a = C_{Xa} \cdot q \cdot S_M$ – сила лобового сопротивления;

$$q = \frac{\rho(y) \cdot v^2(t)}{2} - \text{скоростной напор};$$

x и y – координаты ЛА;

V – скорость ЛА;

θ – угол наклона скорости к горизонту;

m – масса ЛА;

S_M – площадь Миделя ЛА;

ρ – плотность окружающей среды в момент проведения эксперимента.

Численное интегрирование системы уравнений (1) в данном пакете может быть реализовано тремя методами: методом Эйлера, методом Рунге-Кутты 4-го порядка или методом Адамса 4-го порядка. Каждый из этих методов обладает своими достоинствами и недостатками [3]. К слову, метод Эйлера в силу своей простоты обладает высокой скоростью, но малой точностью при интенсивном изменении моделируемых параметров. Метод Рунге-Кутты имеет большую точность, но в силу многократного вычисления правых частей дифференциальных уравнений на каждом шаге характеризуется низкой оперативностью. В свою очередь, метод Адамса, относящийся к многошаговым, использует для начала интегрирования значения функции в предыдущих точках, хотя оперативность метода Адамса значительно выше оперативности метода Рунге-Кутты того же порядка точности.

Работа с модулем начинается в отдельном диалоговом окне с ввода данных, необходимых для проведения расчёта. К таким данным относятся параметры трассы, параметры среды, параметры ЛА, параметры интегрирования, а также исходные данные, такие как начальные координаты ЛА, начальный угол бросания и значение начальной скорости.

К параметрам ЛА относятся его масса, диаметр миделя и коэффициент лобового сопротивления C_{xa} . Коэффициент C_{xa} пользователь может задать двумя способами, которые условно именуются априорным и эмпирическим.

Сутью «априорного» метода является вычисление коэффициента путём линейной интерполяции таблицы дискретных значений C_{xa} в зависимости от чисел Маха M , которая

заполняется пользователем.

Интерполяция проводится по следующей формуле:

$$C_{\alpha}(M) = C_{\alpha}^k + (C_{\alpha}^{k+1} - C_{\alpha}^k) \cdot \frac{M - M_k}{M_{k+1} - M_k}, \quad (2)$$

где M – текущее значение числа Маха.

«Эмпирический» метод использует расчётную зависимость для нахождения C_{α} , полученную на основании закона изменения «живых» сил [4]:

$$C_{\alpha}(M) = \frac{4m}{S_M \cdot l \cdot \rho} \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2}, \quad (3)$$

где:

V_1, V_2 – скорости, измеренные в двух точках прямолинейного горизонтального участка траектории полёта;

l – расстояние между соответствующими плоскостями измерения.

Данный метод предполагает проведение отдельного эксперимента на баллистической трассе с аналогичным изделием для измерения соответствующих скоростей.

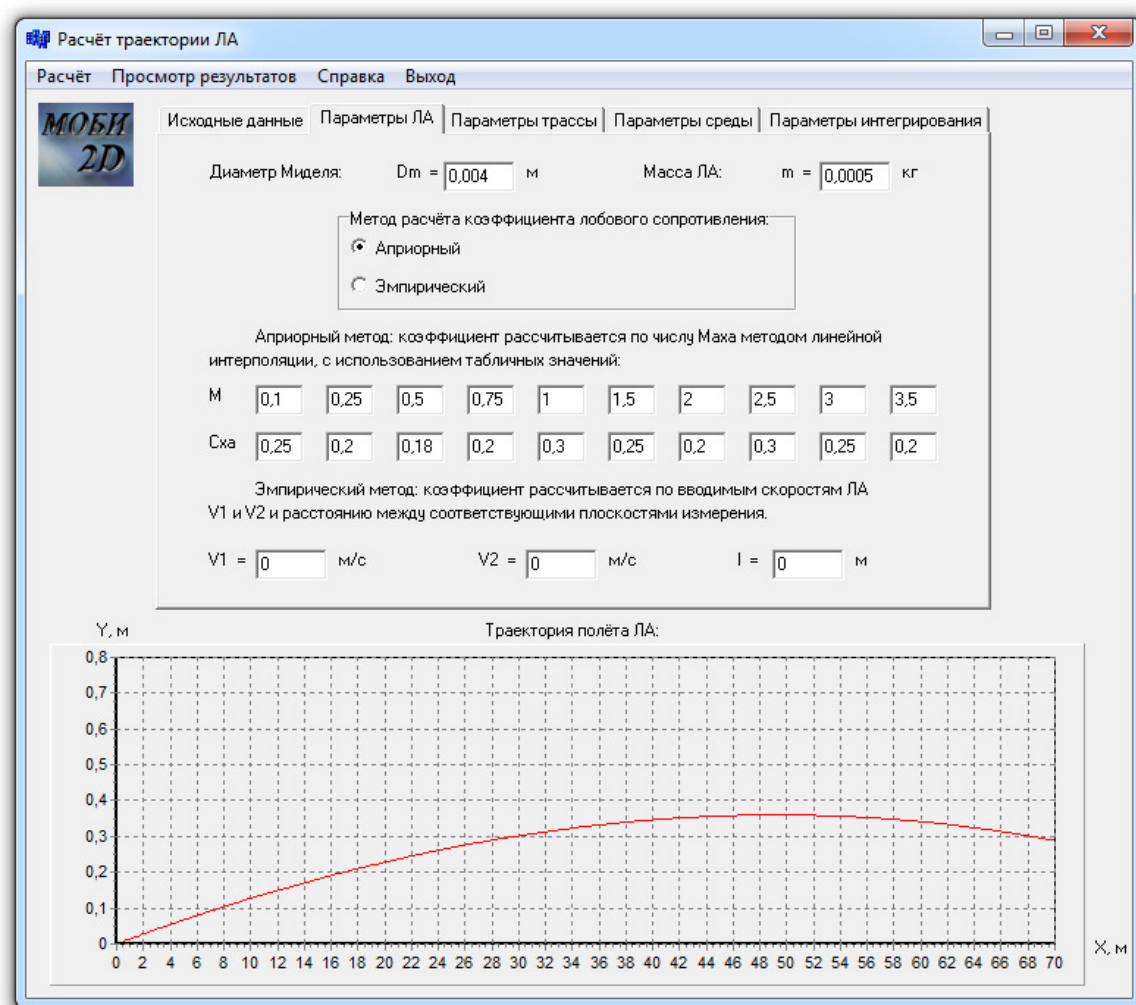


Рис. 4. Диалоговое окно программного модуля «Расчёт траектории ЛА»

При задании параметров среды в соответствующей вкладке можно выбрать стандартную модель атмосферы [5], ввести текущие параметры атмосферы (температуру воздуха и атмосферное давление), либо задать характеристики произвольной среды (плотность ρ и скорость звука a).

В качестве параметров трассы задаются: её длина, высота над уровнем моря, а также производится выбор типа баллистической установки. В случае закрытой баллистической трассы необходимо задать её диаметр.

Во вкладке «Параметры интегрирования» пользователь может выбрать метод численного интегрирования, задать шаг расчёта, а также шаг вывода результатов в файл.

Когда все параметры, необходимые для проведения расчёта заданы, можно приступить к вычислению параметров полёта ЛА. Параллельно с моделированием будет происходить построение графика траектории полёта в диалоговом окне. Непосредственно после расчёта можно посмотреть результаты.

Пользователь в любой момент может обратиться к справке, где подробно описан

алгоритм работы с программным комплексом.

Для выполнения второй функции пакета (определения характеристик рассеивания точек попадания в мишень) используется модуль «Обработка выборки попаданий». Здесь характеристики рассеивания определяются по ограниченному числу опытов, вычисляются среднестатистические значения или оценки, содержащие некоторый элемент случайности.

После введения значений координат 10-ти точек попадания в модуле идет построение единичного эллипса рассеивания, и рассчитываются следующие величины [6]:

1) Оценки математических ожиданий:

$$\bar{M}_y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; \quad \bar{M}_z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}. \quad (4)$$

2) Оценки дисперсий:

$$\bar{D}_y = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{M}_y)^2}{n - 1}; \quad \bar{D}_z = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{M}_z)^2}{n - 1}. \quad (5)$$

3) Оценки корреляционного момента:

$$\bar{K}_{yz} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{M}_y) \cdot (z_i - \bar{M}_z)}{n - 1}. \quad (6)$$

4) В случае неравенства нулю оценки корреляционного момента определяется направление главных осей рассеивания, для которых корреляционный момент случайных значений координат будет равен нулю.

Угол поворота главных осей рассеивания относительно выбранной системы координат yOz :

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\bar{K}_{yz}}{\bar{D}_z - \bar{D}_y}. \quad (7)$$

5) Оценки дисперсий по главным осям рассеивания:

$$\begin{aligned} \bar{D}_\xi &= \bar{D}_y \cdot \sin^2 \alpha + \bar{D}_z \cdot \cos^2 \alpha + \bar{K}_{yz} \cdot \sin 2\alpha; \\ \bar{D}_\eta &= \bar{D}_y \cdot \cos^2 \alpha + \bar{D}_z \cdot \sin^2 \alpha - \bar{K}_{yz} \cdot \sin 2\alpha. \end{aligned} \quad (8)$$

6) Оценки значений средних квадратичных отклонений:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \sqrt{\bar{D}_y}; \\ \sigma_z &= \sqrt{\bar{D}_z}; \\ \sigma_\xi &= \sqrt{\bar{D}_\xi}; \\ \sigma_\eta &= \sqrt{\bar{D}_\eta}.\end{aligned}\tag{9}$$

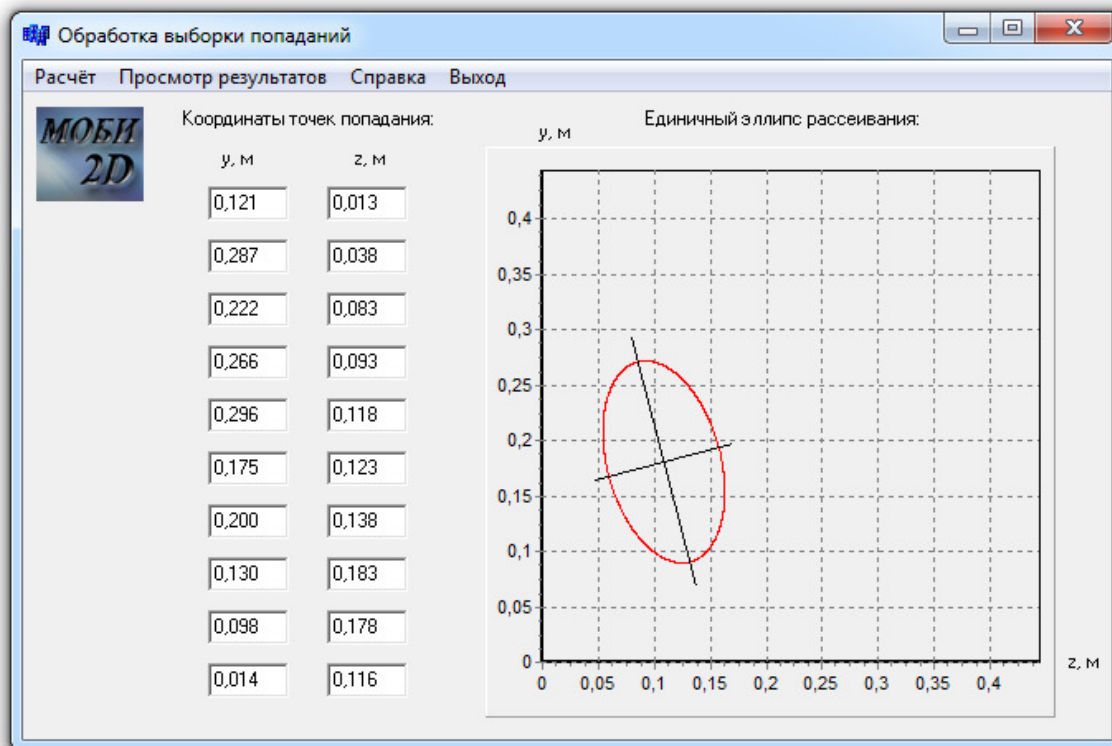


Рис. 5. Диалоговое окно программного модуля «Обработка выборки попаданий»

Проанализируем некоторые результаты расчётов, выполненных в «МОБИ 2D». Используя программный комплекс, в частности модуль «Расчёт траектории ЛА», получим зависимости:

- дальности полёта ЛА от дульной энергии пусковой установки;
- полной дальности от начального угла бросания;
- дальности полёта в трёх средах: в воздухе, в воде и в вакууме.

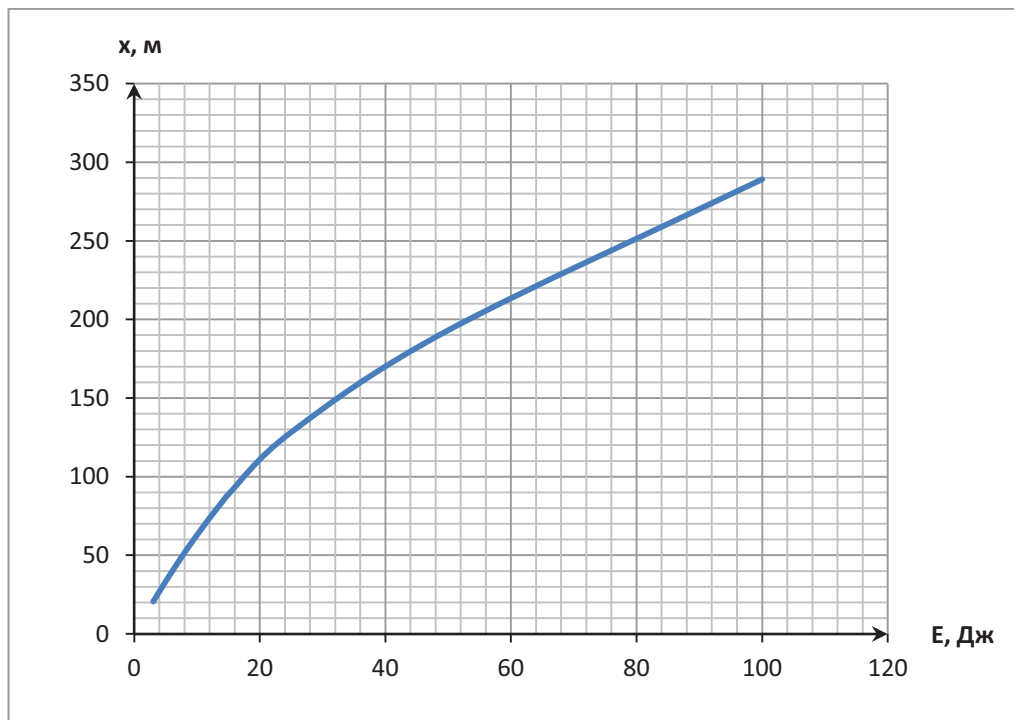


Рис. 6. Зависимость полной дальности от дульной энергии пусковой установки

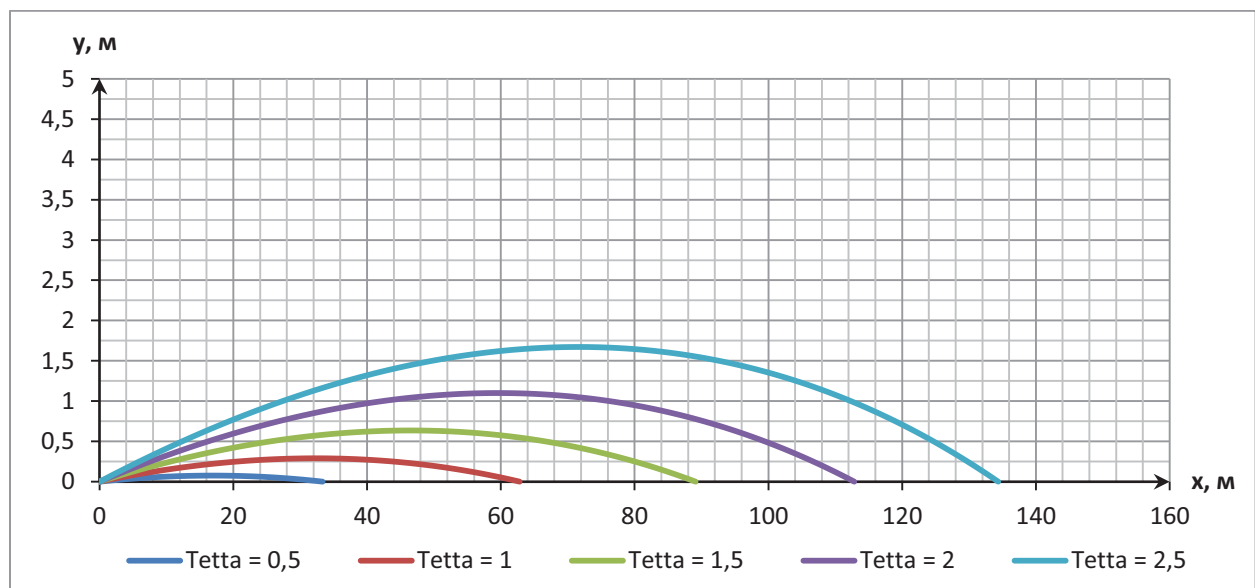


Рис. 7. Траектория полёта ЛА в зависимости от начального угла бросания

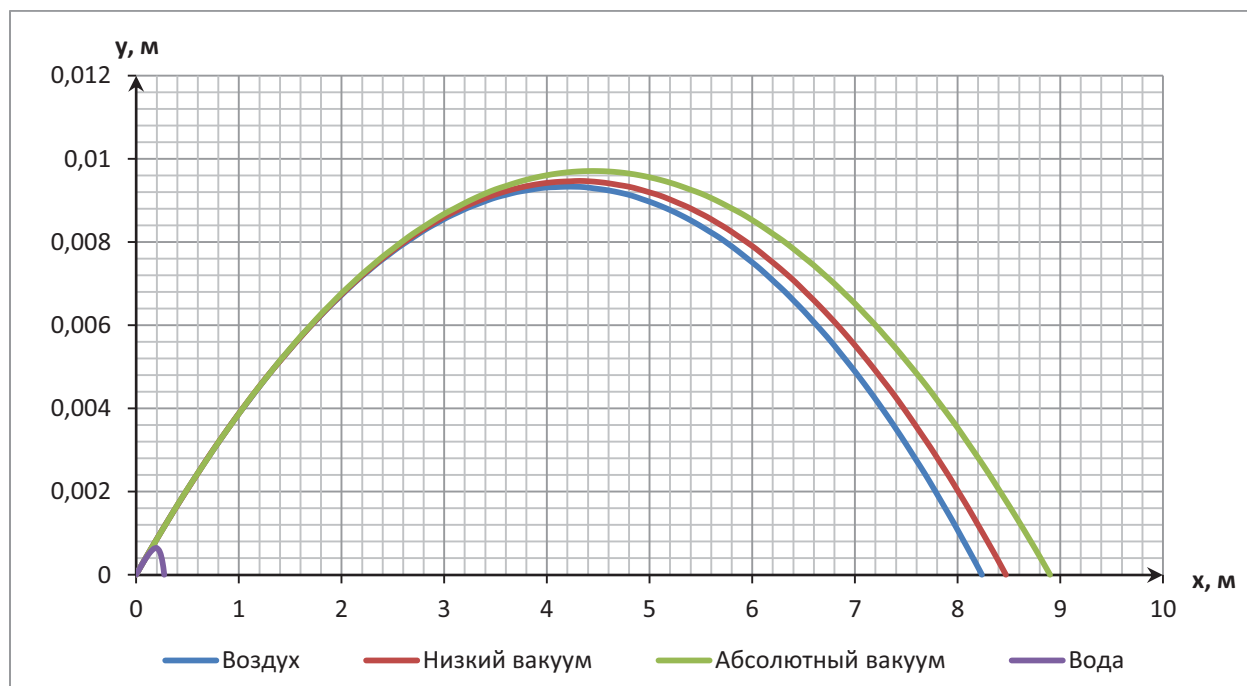


Рис. 8. Траектория полёта ЛА в зависимости от среды

Дульная энергия пусковой установки определяется по следующей формуле:

$$E = \frac{mV_0^2}{2}.$$

Фактически это и есть начальная кинетическая энергия ЛА в момент вылета из установки, от которой зависит начальная скорость. Скорость, в свою очередь, определяет полную дальность полёта. Поэтому с увеличением значения дульной энергии, возрастает полная дальность. Как показывает график (рис. 6), результаты расчёта полностью соответствуют физической картине.

Начальный угол наклона траектории к стартовому горизонту является вторым основным параметром, влияющим на величину дальности стрельбы. Существует так называемый оптимальный угол бросания, соответствующий наибольшей дальности стрельбы, который варьируется при различных начальных условиях. Увеличение или уменьшение начального угла наклона траектории может привести как к увеличению дальности, так и к её уменьшению. Обычно оптимальный угол бросания находится в пределах (40 °, 50 °), что намного больше начальных углов наклона траектории при стрельбе на баллистической трассе, поэтому при увеличении начального угла бросания увеличивается и полная дальность ЛА. Соответствующий график (рис. 7) демонстрирует данную зависимость.

График на рис.8 иллюстрирует, какое влияние могут оказывать параметры внешней

среды на траекторию ЛА. В частности, значительное увеличение плотности приводит к интенсивному торможению тела и скорой потере всей кинетической энергии.

Рассмотрим пример использования программного комплекса «МОБИ 2D» для обработки результатов экспериментальных стрельб, которые были проведены на большой баллистической трассе кафедры СМ-3 при следующих условиях:

Масса пули: $m=0,49$ гр.

Калибр пневматической пружинно-поршневой винтовки: 4,5 мм.

Начальная скорость ЛА: $V=123$ м/с

Начальный угол бросания: $\theta=1,16^\circ$.

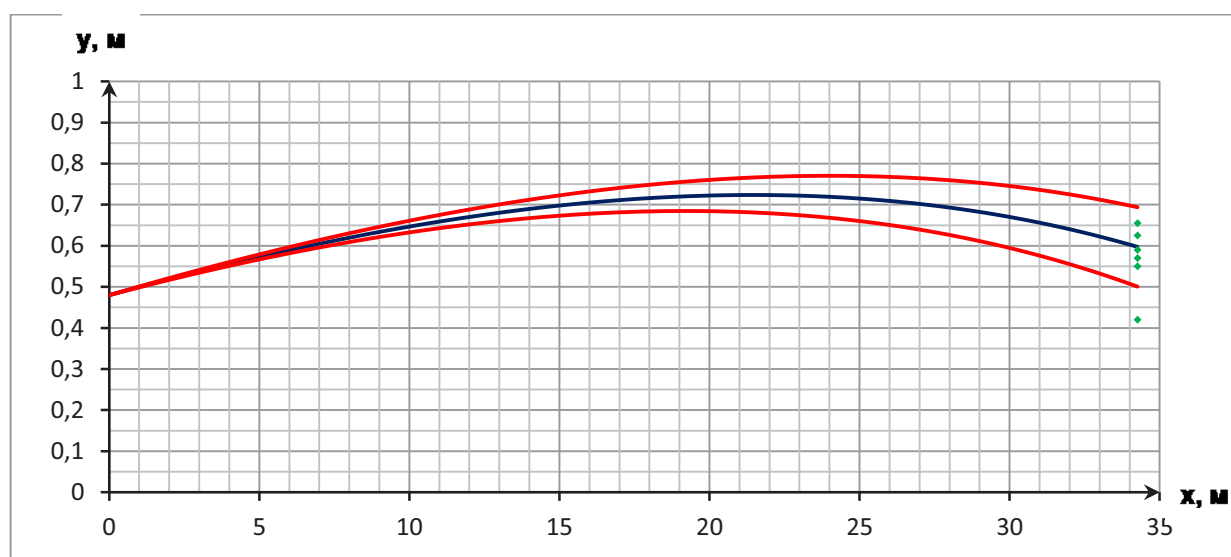


Рис. 9. Результаты экспериментальных стрельб и траектории полёта пули, рассчитанные в «МОБИ 2D»

На рис. 9 отображены: номинальная траектория, координаты точек которой были рассчитаны в программном комплексе, а также две граничные траектории, образующие некое сечение трубки траекторий с учётом отклонения ($\pm 5\%$) значений начальной скорости и начального угла бросания. Результаты экспериментальных стрельб обозначены зелёными ромбами.

Исходя из того, что все точки попадания в мишень, кроме одной, лежат внутри трубки траекторий, учитывающей возможные погрешности при проведении эксперимента, можно заключить, что результаты расчёта в программном модуле полностью соответствуют результатам эксперимента.

Следует подчеркнуть, что «МОБИ 2D» является тривиальным программным обеспечением экспериментов на баллистической трассе. Данный комплекс, служащий для первичных баллистических расчётов, позволяет скорректировать поддающиеся изменению параметры полёта ЛА оперативно, в лабораторных условиях.

Основополагающие закономерности, заложенные в программном пакете, делают его весьма гибким и удобным. При необходимости могут быть априорно оценены результаты замены пусковой установки, ведущие к повышению или понижению значения дульной энергии, а также к изменению начального угла бросания ЛА. Адекватная работа комплекса возможна на баллистических трассах различной конфигурации и степени оснащённости. Кроме того, программный пакет может выполнять итерации первого приближения в процессе баллистического проектирования [7] ЛА или ПУ. В случае герметичной баллистической установки контролируемые параметрами являются и характеристики среды внутри трассы. Ещё одно достоинство комплекса – автоматизация статистической обработки результатов стрельб.

Программный комплекс «МОБИ 2D» уже зарекомендовал себя при проведении экспериментов на большой баллистической трассе кафедры СМ-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Представляется, что в рамках описанных задач, он найдёт широкое применение.

Список литературы

1. Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Наука, 1974. 344 с., ил.
2. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. Внешняя баллистика: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 608 с., ил.
3. Хайрер Э., Нёрсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи: пер. с англ. М.: Мир, 1990. 512 с., ил.
4. Кольцов Ю.Ф. Определение коэффициента лобового сопротивления $C_{\text{ха}}(M)$ стрельбой на баллистической трассе: метод. указания. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1964. 28с., ил.
5. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М.: Издательство стандартов, 1982. 181 с.
6. Казаковцев В.П., Жилейкин В.Д. Обработка стрельб: метод. указания к лабораторным работам. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 27 с.: ил.
7. Илюхин С.Н. Метод импульса силы для оценки энергетики управления полётом // Молодёжный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. №8. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/606165.html> (дата обращения 09.03.2014).