НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408
электронный научно-технический журнал

Аппроксимация закона сопротивления воздуха 1943 г.

10, октябрь 2013
DOI: 10.7463/1013.0609269

Ефремов А. К.

УДК 623.456

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская федерация
efrak@mail.ru

Введение

Разработка законов (функций) сопротивления воздуха имеет длительную историю. Этим занимались выдающиеся ученые и артиллеристы, и в результате проведения многочисленных полигонных стрельб были получены зависимости коэффициента лобового сопротивления от числа Маха, которые в сильной степени зависят от особенностей обтекания снаряда встречным потоком воздуха, т.е. главным образом от конфигурации головной части. Однако даже при наличии этой зависимости вычисление параметров траектории артиллерийского снаряда всегда представляла собой чрезвычайно сложную задачу, особенно если учитывать такие факторы, как кривизна поверхности и вращение Земли.

Для расчета траектории снаряда необходимо численно интегрировать систему дифференциальных уравнений внешней баллистики с помощью чрезвычайно трудоемкого метода конечных разностей, а в начале прошлого века в распоряжении вычислителей были только арифмометры и счеты. Для нового типа орудия требовались свои таблицы, составлять их приходилось годами, предварительно проведя полигонные стрельбы для определения параметров принятого закона сопротивления воздуха (главным образом, коэффициента формы снаряда). Известно, что первые внешнебаллистические расчеты немцы проводили, считая плотность воздуха постоянной и равной среднему значению в пределах высоты траектории.

Именно для быстрого составления баллистических таблиц по заказу армии США в Лаборатории баллистических исследований. в 1946 г. была создана первая вычислительная машина «Эниак» (*ENIAC – Electronic Number Integrator And Computer –*

Электронный цифровой интегратор и вычислитель). Вычисления на «Эниаке» велись в десятичной системе, а для изменения программы требовалось установить в определенное положение тысячи переключателей и соединить сотни кабелей, и поэтому в среднем на подготовку машины к вычислению одной таблицы уходило два дня кропотливой ручной работы [1].

Таким образом, ускорение процесса вычисления параметров траектории всегда было актуальной задачей в ствольной, а затем и ракетной артиллерии. Для получения адекватных результатов необходимо соответствующее математическое описание закона сопротивления. Наиболее популярным в этом смысле длительное время являлся закон (функция) Сиаччи в виде эмпирической формулы, важным достоинством которой является непрерывная зависимость от скорости снаряда. Однако формула выведена применительно к устаревшим тупоголовым снарядам, использованным в качестве эталонных. После появления современных снарядов дальнобойной конфигурации были созданы новые законы сопротивления воздуха. Однако, в отличие от формулы Сиаччи, они заданы в дискретной (чаще всего в табличной) форме.

Наиболее распространенным в России (ранее – в СССР) законом сопротивления воздуха, используемым при расчете траекторий артиллерийских снарядов, является закон 1943 г. Однако до сих пор отсутствует представление этого закона в виде непрерывной зависимости от скорости снаряда, что затрудняет проведение расчетов на ЭВМ. В данной работе предлагается способ приведения закона Сиаччи к закону 1943 г. с помощью соответствующего коэффициента согласования в виде функции, непрерывно зависящей от скорости снаряда. Показано, что расхождение результатов расчета по предлагаемой аппроксимации с табличными данными не превышает допустимого с практической точки зрения.

Применение методики проиллюстрировано на конкретном примере.

1 Общая формула для силы сопротивления воздуха

На рисунке 1 показана схема сил, приложенных к снаряду на траектории: $q\bar{g}$ – сила тяжести; $\bar{R}$ – равнодействующая аэродинамических сил, т.е. сила сопротивления воздуха. Она приложена в центре давления C, не совпадающем с центром массы O. Расстояние между этими точками определяется по формуле Гобара [2]. На рисунке δ – угол атаки, т.е. угол между осью снаряда и касательной к траектории в данной точке (на касательной лежит вектор скорости снаряда $\bar{V}$); θ – угол между вектором скорости и горизонтом. Если силу $\overline{R}$ перенести в центр масс O и одновременно приложить к этой точке уравновешивающую силу ($-\overline{R}$), то возникает пара сил, создающая опрокидывающий момент (его учитывают при исследовании движения снаряда как твердого тела). Силу $\overline{R}$, приложенную в центре масс, раскладывают на две составляющие: $\overline{R}_x$ – сила лобового сопротивления (она лежит на касательной к траектории и направлена в сторону, обратную по отношению к вектору скорости) и $\overline{R}_y$ – подъемная сила. В дальнейшем рассматриваем упрощенную схему приложения указанных сил, полагая $\delta = 0$ и считая, что сила $\overline{R}$ направлена по оси снаряда; в этом случае $\overline{R}_x = \overline{R}$ и $\overline{R}_y = 0$.

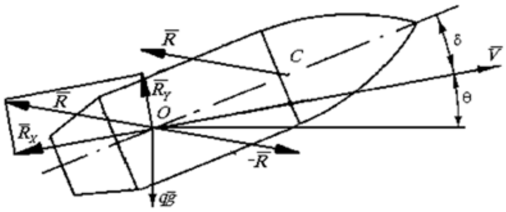

Рисунок 1 – Силы, приложенные к снаряду на траектории

Структуру фундаментального выражения для силы сопротивления воздуха получают с помощью теории подобия и размерностей, лежащей в основе методов физического моделирования:

$$R = \frac{\rho V^2}{2} \cdot s \cdot C_x(M), \tag{1}$$

где ρ – плотность воздуха; $s = \pi d^2/4$ – площадь миделевого сечения снаряда (d – калибр); $\rho V^2/2$ – скоростной напор; $C_x(M)$ – коэффициент лобового сопротивления; $M = V/a$ – число Маха; a – скорость звука в данной точке траектории; $Re = \nu d/V$ – число Рейнольдса; ν – кинематический коэффициент вязкости.

Зависимость $C_x(M)_{эт}$ определяют опытным путем для снарядов типовой («эталонной») формы. Подобие процессов обтекания снарядов воздушным потоком чаще всего не обеспечивается из-за различия конфигурации головной части, и, для того чтобы иметь возможность использовать имеющиеся опытные данные, вводят коэффициент формы снаряда

$$i = \frac{C_x(M)}{C_x(M)_{эт}},$$

учитывающий неполноту условий подобия. Данный коэффициент сравнительно слабо зависит от скорости снаряда, и его удобно использовать в качестве коэффициента согласования расчета по определению дальности стрельбы с опытом. В этом случае учитываются как форма снаряда, так и другие физические факторы, влияющие на движение снаряда.

Преобразуя формулу (1), получают выражение для «ускорения сопротивления воздуха»

$$J = \frac{R}{q}, \tag{2}$$

где q – масса снаряда. Далее вводят функцию

$$H(y) = \frac{\rho}{\rho_0},$$

где y – высота; ρ_0 – плотность воздуха на поверхности Земли в точке выстрела. Кроме того, для получения более удобных для практических расчетов значений соответствующих величин, вводят множитель

$$\frac{\rho_{0н} \cdot 10^3}{\rho_{0н} \cdot 10^3},$$

где $\rho_{0н} = 1{,}206$ кг/м^3 – плотность воздуха для нормальных артиллерийских условий. Тогда (2), с учетом (1), будет иметь вид

$$J = \frac{id^2 \cdot 10^3}{q} \frac{\rho_0}{\rho_{0н}} H(Y) \frac{\pi}{8} \rho_{0н} V^2 \cdot 10^{-3} C_x(\mathrm{M})_{\text{эт}} = cH(Y)F(V). \tag{3}$$

В этом выражении фигурирует баллистический коэффициент

$$c = \frac{id^2 \cdot 10^3}{q} \frac{\rho_0}{\rho_{0н}}..$$

Обычно принимают, что $\rho_0 \approx \rho_{0н}$, т.е.

$$c \approx \frac{id^2 \cdot 10^3}{q} = \frac{i}{C_q d}.$$

Здесь введен коэффициент относительной массы («поперечная нагрузка») $C_q = q/d^3$, где d – в дециметрах. Видно, что баллистический коэффициент (а, следовательно, и сила сопротивления воздуха) изменяется обратно пропорционально калибру.

Функция

$$F(V)=\frac{\pi}{8}\rho_{0н}\cdot 10^{-3}\cdot V^2C_x(M)_{эт}=4{,}74\cdot 10^{-4}V^2C_x(M)_{эт} \qquad (4)$$

носит название закона сопротивления воздуха, так часто называют и зависимость $C_x(\mathrm{M})$. Опуская постоянный множитель в (4), можно записать пропорциональное соотношение

$$F(V)\sim V^2C_x\left(\frac{V}{a}\right).$$

Как известно [2], скорость звука

$$a=\sqrt{kgR\tau},$$

где k – показатель адиабаты для воздуха, обычно принимаемый равным 1,4; R – универсальная газовая постоянная; $\tau=T/[1-3e/(8h)]$ – «виртуальная» температура, учитывающая влажность воздуха; T – абсолютная температура; e – давление водяного пара; h – давление влажного воздуха/

Эталонные законы сопротивления воздуха приведены к скорости звука в нормальных условиях $a_0=\sqrt{\gamma gR\tau_0}=341$ м/с, поэтому аргумент C_x преобразуют:

$$M=\frac{V}{a}=\frac{V}{a_0}\cdot\frac{a_0}{a}=\frac{V_\tau}{a_0}.$$

Здесь

$$V_\tau=V\frac{a_0}{a}=\frac{V}{\sqrt{\tau/\tau_0}}\ -$$

так называемая виртуальная скорость. Таким образом,

$$F(V)\sim\frac{\tau}{\tau_0}\cdot V_\tau^2\cdot C_x\left(\frac{V_\tau}{a_0}\right)=\frac{\tau}{\tau_0}F(V_\pi)$$

Соответственно,

$$J=cH_\tau(y)F(V_\tau) \qquad (5)$$

где

$$H_\tau(y)=H(y)\cdot\frac{\tau}{\tau_0}.$$

Зависимость τ/τ_0 обычно задают по [3]:

$$\frac{\tau}{\tau_0} \approx \frac{\tau}{\tau_{0н}} = \begin{cases} 1-2{,}19\cdot10^{-5}y,\ \ y \le 9300\ \text{м} \\ 0{,}796-2{,}19\cdot10^{-5}\cdot\left(y-9{,}3\cdot10^3\right)\left[1-1{,}85\cdot10^{-4}\left(y-9{,}3\cdot10^3\right)\right],\ 9300\ \text{м} \le y \le 12000\ \text{м} \\ 0{,}767=\text{const},\ \ y \ge 12000\,\text{м} \end{cases}$$

Проведя довольно громоздкие вычисления, связанные с интегрированием соответствующих выражений, получим

$$H(y)=\begin{cases} \left(1-0{,}0219\cdot10^{-3}y\right)^{4,4},\ y \le y_1 = 9300\,\text{м} \\ \dfrac{0{,}367}{1-0{,}0275\cdot10^{-3}\cdot\left(y-9{,}3\cdot10^3\right)\left[1-0{,}185\cdot10^{-3}\left(y-9{,}3\cdot10^3\right)\right]}\times \\ \times\exp\left[-2{,}12\left(0{,}194-arctg\dfrac{12\cdot10^3-y}{1{,}375\cdot10^4}\right)\right],\ y_1 \le y \le y_2 = 12\cdot10^3\,\text{м} \\ 0{,}253\cdot\exp\left[-1{,}542\cdot10^{-4}\cdot\left(y-12\cdot10^3\right)\right],\ y \ge y_2 \end{cases} \tag{6}$$

2 Законы сопротивления воздуха

Л. Эйлер при решении задачи о полете снаряда пользовался функцией $F(V)=BV^2$, установленной Ньютоном и применяемой в основном для дозвуковых скоростей. Одной из первой была степенная функция Маиевского-Забудского [3]

$$F(V)=B_n\cdot V^n$$

При составлении этой формулы в качестве эталонного был принят снаряд старой формы, имеющий короткую головную, длинные цилиндрическую и запоясную части. Коэффициенты B_n выбирались так, чтобы на границах областей значения сопротивления были одинаковы, но при этом на графике $F(V)$ появляются угловые точки, вследствие чего производные сопротивления по скорости терпят в этих точках конечные разрывы. Кроме того, при расчете траектории ее неудобно делить на ряд участков по скорости. В настоящее время на практике этот закон не используется.

Базируясь на работах Маиевского-Забудского и опытах конца XIX века, итальянский баллистик Франческо Сиаччи предложил новую функцию сопротивления воздуха $F(V)$, носящую его имя (1888 г.). Сиаччи также принял за эталонный снаряд старой формы, но сгладил угловые точки на графике $F(V)$. Большой заслугой Сиаччи является эмпирическая аппроксимация закона сопротивления воздуха в предложенной им форме (5) [3]:

$$F(V)=0.2002V-48.05+\sqrt{\left(0.1648V-47.95\right)^2+9.6}+\frac{0.0442V\left(V-300\right)}{371+\left(V/200\right)^{10}} \tag{7}$$

Этот закон многократно апробирован на практике и находит широкое применение при расчете траекторий, при соответствующем значении коэффициента формы. При малых скоростях закон Сиаччи близок к квадратичному, а при больших – к линейному.

С развитием артиллерии основным становится современный снаряд дальнобойной формы, имеющий удлиненную головную часть и сравнительно короткую хвостовую часть. Опыты по созданию новой функции $F(V)$ проводились после Первой мировой войны в ряде стран, например, в 1921–1923 гг. во Франции (законы Гарнье и Дюпуи).

В нашей стране был создан закон сопротивления воздуха 1930 г. На его основе составлены таблицы внешней баллистики АНИИ, однако выяснилось, что данный закон дает неточные результаты при расчете траектории с большими начальными скоростями; кроме того, коэффициент формы современных снарядов по отношению к функции 1930 г. заметно колеблется при различных скоростях.

3 Закон 1943 г.

Перед Великой Отечественной войной в СССР были начаты работы по установлению новой функции сопротивления воздуха на основе обработки результатов стрельб современными снарядами дальнобойной формы. Эти работы были закончены в 1943 г., новая функция $F(V)$ получила название закон Артиллерийской академии им. Ф.Э. Дзержинского, или просто закон 1943 г. При этом. была обнаружена ошибка функции Сиаччи, проявляющаяся при скорости снаряда более 1410 м/с. Закон 1943 г. принят в нашей стране в качестве основного. Применительно к этой функции проводятся все баллистические расчеты, хотя ввиду наличия таблиц находят применение также функции 1930 г. и Сиаччи.

Полная таблица закона 1943 г. содержится в книге [4]; в сокращенном виде она приведена в [5], наряду с законами Сиаччи и 1930 г. В [2] функция 1943 г. задана в пределах ограниченного диапазона ($M \le 2{,}0$), разбитого на участки:

$$C_x = \begin{cases} 0{,}158, \ 0{,}1 \le M \le 0{,}8 \\ 0{,}137M^2 + 0{,}865M + 8.98 \cdot 10^{-4}, 0{,}8 \le M \le 0{,}9 \\ 1{,}35M - 1{,}025, \ 0{,}9 \le M \le 1{,}0 \\ -0{,}925M^2 + 2{,}335M - 1{,}085, \ 1{,}0 \le M \le 1{,}4 \\ -0{,}0917M + 0{,}4993, \ 1{,}4 \le M \le 2{,}0 \end{cases}$$

В [6] имеется следующее описание закона 1943 г.:

$$F(V) = 0{,}7454 \cdot 10^{-4} \cdot V^2,\ V < 256 \text{ м/с } (M < 0{,}75)$$

$$F(V) = 1{,}2315 \cdot 10^{-4} \cdot V^2,\ V > 1410 \text{ м/с } (M > 4{,}14)$$

Внутри этого диапазона рекомендуется производить пересчет с закона Сиаччи, значения коэффициента согласования (переходного множителя)приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Переходный множитель [6]

Скорость, м/с	*M*	Переходный множитель
0…150	0…0,44	0,61
150…250	0,44…0,733	0,58
250…300	0.733…0,880	0,48
300…341	0,880…1,0	0.60
341…400	1,0…1,173	0,57
400…500	1,173…1,466	0,50
500…700	1,466…2,053	0,45
700…1000	2,053…2,932	0,48

Видно, что переходный множитель заметно зависит от скорости, так что усреднение его в пределах того или иного диапазона скоростей может привести к ошибкам расчета в другом диапазоне.

Коэффициенты формы для современных снарядов (ОФ) по отношению к закону 1943 г. изменяются в пределах $0{,}9...1{,}1$, а по отношению к функции Сиаччи $i = 0{,}5...0{,}6$.

Таким образом, известные способы описания закона 1943 г. задают его дискретно (по точкам или по поддиапазонам), эмпирического описания в виде единой непрерывной функции скорости в пределах всего диапазона изменения числа Маха, подобного закону Сиаччи, закон не имеет. Дискретность описания закона 1943 г. неудобна при вычислении траекторий на ЭВМ, в связи с чем его пытаются выражать через закон Сиаччи, вводя корректирующий переходный множитель, однако и этот множитель задан дискретно. Поэтому на практике часто предпочитают использовать именно закон Сиаччи, но при некотором коэффициенте формы *i*, определяемом по известным условиям стрельбы.

4 Аппроксимация закона 1943 г.

Можно предложить такой способ коррекции закона Сиаччи и приведения его к закону 1943 г. [7]. Определив по табличным данным (дискретную) зависимость коэффициента формы от скорости, затем аппроксимировать ее как некую непрерывную функцию скорости $\zeta(V)$ и затем производить пересчет следующим образом:

$$F_{43}(V)=\zeta(V)\cdot F_{Siacci}(V).$$

Результаты реализации этой идеи в среде пакета MathCAD представлены на рисунке 2, где 1 – $(C_x)_{Siacci}$; 2 – табличный закон 1943 г, $(C_x)_{43}$; 3 – функция согласования $\zeta=(C_x)_{43}/(C_x)_{Siacci}$; 4– аппроксимация функции согласования $\zeta(M)$; 5 – $(C_x)_{Siacci}\cdot\zeta(M)$.

Функция согласования аппроксимируется полиномом 3-го порядка:

$$\zeta(M)=b_0+M\cdot[b_1+M\cdot(b_2+b_3\cdot M)],$$

коэффициенты b_i которого определены с помощью функции MathCAD *linfit*, относящейся к линейной комбинации аппроксимирующих формул:

$$b_0=0.652;\ b_1=-0.1133;\ b_2=-1\cdot10^{-3};\ b_3=6{,}3\cdot10^{-3}.$$

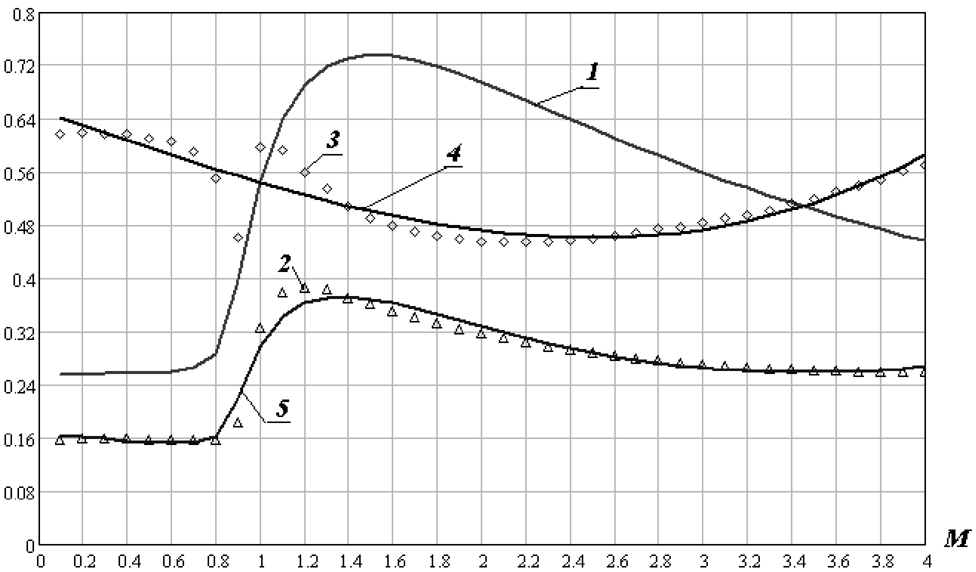

Рисунок 2 – Аппроксимация закона 1943 г.:

Из рисунка 2 видно, что аппроксимирующая кривая $(C_x)_{Siacci}\cdot\zeta(M)$ в целом достаточно близка к табличной зависимости, за исключением участка в районе максимума, однако это не должно привести к существенной ошибке, особенно при высоких скоростях снаряда ($M>1{,}5$).

Таким образом, принимаем следующее эмпирическое описание закона 1943 г.:

$$F_{43}(V)=\begin{cases}0.7454\cdot 10^{-4}\cdot V^2,\ M\le 0{,}75\\ \zeta(M)\cdot F_{Siacci}(V),\ 0{,}75\le M\le 4{,}14\\ 1{,}2315\cdot 10^{-4}\cdot V^2,\ M\ge 4{,}14\end{cases} \quad (8)$$

В таблице 2 дано сравнение данных, приведенных в работе [5], с получаемыми по предлагаемой аппроксимации: 1 – табличные значения $(C_x)_{Siacci}$; 2 – расчет по данной методике; 3 – отклонение, %.

Таблица 2 – Сравнение аппроксимирующих и табличных значений

M	1	2	3
0,2	0,158	0,1576	-0,25
0,4	0,158	0,1577	-0,19
0,6	0,157	0.1570	0
0,8	0,160	0.157	-1,88
1,0	0,335	0.3454	3,10
1,2	0,385	0.387	0,52
1,4	0,378	0.376	1,31
1,6	0,351	0.3556	1,31
1,8	0,332	0.3344	0,72
2,0	0,316	0.3161	0,03
2,5	0,287	0.2842	-0,98
3,0	0,270	0.2668	-1,18
3,5	0,261	0.2593	-0,65
4,0	0,260	0.2575	-0,96

Видно, что отличие результатов расчета по аппроксимации от табличных значений с практической точки зрения вполне допустимо.

5 Пример расчета

Применение предложенной аппроксимации проиллюстрируем на примере расчета параметров траектории снаряда линкора «Бисмарк», который был проведен автором при математическом моделировании обстрела английского линейного крейсера «Худ» 24 мая 1941 г. Подробное описание «дуэли» двух выдающихся кораблей приведено в [8].

В работе [9] читаем: «…коэффициент формы *i* следует рассматривать как параметр, позволяющий согласовывать результаты теоретических расчетов с опытными данными. Например, пусть на основании стрельб снарядами определенного типа при фиксированных значениях начальной скорости V_0 и угла бросания θ_0 найдена опытная дальность стрельбы *X*. …По величинам *X*, V_0 и θ_0 можно определить коэффициент формы снаряда *i*. Если расчет траектории проводить с использованием коэффициента

C_x, удовлетворяющего выражению $C_x(M) = iC_{xэт}(M)$ при тех же значениях V_0 и θ_0, то получим дальность стрельбы, совпадающую с опытной. Этот способ применяется для определения коэффициента формы при составлении таблиц стрельбы для конкретного орудия».

Соответствующие вычисления проводят, используя известную систему уравнений, описывающих движение снаряда как материальной точки [2]:

$$\frac{dV}{dt} = -J - g\,sin\,\theta;\ \frac{dx}{dt} = V\,cos\,\theta;\ \frac{dy}{dt} = V\,sin\,\theta;\ \frac{d\theta}{dt} = -\frac{g}{V}cos\,\theta \qquad (9)$$

где θ – угол наклона касательной к траектории (вектора скорости) относительно горизонта.

Именно так был определен коэффициент *i* для снарядов «Бисмарка», На линкоре были установлены восемь 380-мм орудий (по два в каждой из четырех башен) 38cm/52 SK C/34. Известно, что максимальная дальность 35 550 м достигается при массе снаряда *800* кг, дульной скорости 820 м/с и угле возвышения 30^0 [10]. Методом подбора, пользуясь соответствующей программой численного решения системы (9), было определено $i_{Siacci} = 0{,}43$ и $i_{1943} = 0{,}97$.

В работе [10] приведены параметры траектории при стрельбе с различными углами возвышения; в таблице 3 дается сравнение этих данных с результатами расчета, полученными с помощью закона Сиаччи при $i = 0{,}43$ (в знаменателе). Расхождение между этими данными составляет единицы и доли процента. Закон Сиаччи был использован, поскольку расчеты, проведенные немцами, могли быть получены только с помощью именно этого закона. Это подтверждается сведениями в статье [11], в которой представлены результаты расчетов внешней баллистики «Бисмарка», выполненные в 1939–1940 гг. во время достройки линкора на судоверфи «Блом и Фосс» [12]. Данные результаты также представлены и в графической форме на Интернет-сайте линейного крейсера «Худ» [13].

Таблица 3 – Сравнение данных [10] с результатами расчета по предлагаемой методике

Угол возвышения, град	Дальность стрельбы, м	Угол падения снаряда, град	Время в полете, с	Скорость падения снаряда, м/с
2,2	5000 / 4 860	-2,4 / - 2,38	6,5 / 6,29	727 / 729,4
4,9	10000 / 9 900	-5,8 / - 5,75	13,9 / 13.68	641 / 644,2
8,1	15000 / 14 880	-10,4 / - 10,27	22,3 / 22,03	568 / 572,7
12,1	20000 / 20 040	-16,4 / -16,37	32,0 /31,92	511 / 516,2
16,8	25000 / 25 090	-23,8 / - 23,62	43,0 / 42,92	473 / 481,3
22,4	30000 / 30 120	-31,9 / - 31,62	55,5 / 55,34	457 / 467,4
29,1	35000 / 35 080	-40,3 / - 39,77	69,9 / 69,4	462 / 472,7

Считая приемлемость принятой методики определения коэффициентов формы подтвержденной, можно провести расчет параметров траектории снаряда «Бисмарка» при обстреле «Худа», дальность составляла $X = 18000$ м [87]. В таблице 3 приведены значения скорости падения снаряда V_k, угла падения θ_k и времени полета t_n, рассчитанные по закону Сиаччи и предложенной аппроксимации закона 1943 г.

Таблица 3 – Параметры траектории снаряда линкора «Бисмарк»

Закон	i	V_k, м/с	θ_k, град	t_n, с
Сиаччи, $\theta_0 = 10{,}5^0$	0,43	535,2	-13,9	28,02
1943 г., $\theta_0 = 10.45^0$	0,97	527,7	-13,9	27,89
Данные [14]		532,0	-13,9	28,02

Расхождение между требуемыми значениями угла возвышения θ_0, а также конечными параметрами траектории невелико. Ближе всего к немецким данным результаты расчета по закону Сиаччи, что свидетельствует об использовании именно этого закона. Коэффициент формы для закона 1943 г. несколько меньше единицы, т.е. снаряды «Бисмарка» имели «более дальнобойную» форму по сравнению с эталонными снарядами, использованными при получении закона 1943 г.

Заключение

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1) Рассмотрена возможность приведения закона сопротивления воздуха 1943 г., принятого в России как основного при расчете траекторий артиллерийских снарядов, к закону Сиаччи. Достоинством последнего является непрерывная зависимость от скорости снаряда, однако данный закон получен для устаревших, тупоголовых

снарядов и не может быть непосредственно использован при расчете современных, т.е. дальнобойных, снарядов.

2) Корректирующий множитель предложен в виде аналитической аппроксимации последовательности дискретных коэффициентов согласования, представляющей собой непрерывную функцию числа Маха. Благодаря применению предлагаемой аппроксимации упрощается вычисление параметров траектории на ЭВМ.

3) Показано, что отличие результатов расчета по предложенной методике от табличных значений не превышает допустимое с практической точки зрения.

4) Приведен пример использования предложенной аппроксимации.

Список литературы

1. Ефремов А.К. Реконструкция проектирования сверхдальнобойного орудия – «Парижской пушки» // Известия РАРАН. 2010. Вып. 3(65). С. 105-116.

2. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. Внешняя баллистика: учеб. для вузов. 4-е изд. М.: Машиностроение, 2005. 608 с.

3. Вентцель Д.А., Окунев Б.Н., Шапиро Я.М. Внешняя баллистика. Ч. I. Л.: Арт. акад. им. Ф.Э. Дзержинского, 1933.

4. Шапиро Я.М. Внешняя баллистика. М.: Оборонгиз, 1946.

5. Гантмахер Ф.Р., Левин М.А. Теория полета неуправляемых ракет. М.: Физматгиз, 1959. 360 с.

6. Правдин В.М., Шанин А.П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999. 496 с.

7. Ефремов А.К. Автономные информационные и управляющие системы. В 4 т. Т. 4 / Под ред. А.Б. Борзова. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. 330 с.

8. Мюлленгейм-Рехберг Б.Б., фон. Линкор «Бисмарк» : пер. с англ. / под ред. А.К. Ефремова. М.: Эксмо, 2006.

9. Баллистика ствольных систем / РАРАН; под ред. Л.Н. Лысенко и А.М. Липанова. М.: Машиностроение, 2006.

10. Campbell J. Naval Weapons of World War Two. London: Conway Maritime Press, 2002.

11. Jurens W.J. The Loss of HMS Hood – a Re-Examination // Warship International. 1987. Vol. 24, no 2. P. 122-180.

12. Obercommando der Kriegsmarine, Unterlagen und Richtlinien zur Bestimmung der Hauptkampfentfernung und der Geschoswahl. Berlin. 1940.

13. H.M.S. Hood Association. Available at: www.hmshood.com , accessed 09.09.2013.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU
SCIENCE and EDUCATION
EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408
electronic scientific and technical journal

Approximation of the air resistance law of 1943

10, October 2013
DOI: 10.7463/1013.0609269

Efremov A.K.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation
efrak@mail.ru

The author proposes a method of fitting the Siacci air resistance law which was practically approved to the law of 1943. This law is widely used in the Russian Federation for computing parameters of trajectories of projectiles but doesn't have an analytic description up until today. In this work a corrective multiplier for the Siacci function was introduced; this factor represents analytical approximation of a sequence of discrete compensation factors in the form of a continuous dependence on the projectile speed (Mach number). As a result, computation of the trajectory parameters with the use of a PC is simplified. An example of using the approximation is also provided.

Publications with keywords: air resistance law, Siacci law, law of 1943, fitting function, law approximation
Publications with words: air resistance law, Siacci law, law of 1943, fitting function, law approximation

References

1. Efremov A.K. Rekonstruktsiya proektirovaniya sverkhdal'noboynogo orudiya – «Parizhskoy pushki» [Reconstruction of design of super-long-range gun - "Paris Gun"]. *Izvestiya RARAN*, 2010, no. 3(65), pp. 105-116.

2. Dmitrievskiy A.A., Lysenko L.N. *Vneshnyaya ballistika* [External ballistics]. Moscow, Mashinostroenie, 2005. 608 p.

3. Venttsel' D.A., Okunev B.N., Shapiro Ya.M. *Vneshnyaya ballistika. Ch. 1* [External ballistics. Part 1]. Leningrad, Dzerzhinsky Artillery Academy Publ., 1933.

4. Shapiro Ya.M. *Vneshnyaya ballistika* [External ballistics]. Moscow, Oborongiz, 1946.

5. Gantmakher F.R., Levin M.A. *Teoriya poleta neupravlyaemykh raket* [Flight theory of unguided rockets]. Moscow, Fizmatgiz, 1959. 360 p.

6. Pravdin V.M., Shanin A.P. *Ballistika neupravlyaemykh letatel'nykh apparatov* [Ballistics of unguided aerial vehicles]. Snezhinsk, RFYaTs-VNIITF Publ., 1999. 496 p.

7. Efremov A.K. *Avtonomnye informatsionnye i upravlyayushchie sistemy. V 4 t. T. 4* [Stand-alone information and control systems. In 4 vols. Vol. 4]. Moscow, Publication of OOO NITs «Inzhener», OOO «Oniko-M», 2011. 330 p.

8. Mullenheim-Rechberg B.B., von. *Battleship Bismarck. A Survivor's Story*. Naval Institute Press, 1990. 512 p. (Russ. ed.: Myullengeym-Rekhberg B.B., fon. *Linkor "Bismark"*. Moscow, Eksmo, 2006. 480 p.).

9. Lysenko L.N., Lipanov A.M. *Ballistika stvol'nykh sistem* [Ballistics of barrel systems]. Moscow, Mashinostroenie, 2005. 461 p.

10. Campbell J. *Naval Weapons of World War Two*. London, Conway Maritime Press, 2002.

11. Jurens W.J. The Loss of HMS Hood – a Re-Examination. *Warship International*, 1987, vol. 24, no. 2, pp. 122-180.

12. *Obercommando der Kriegsmarine, Unterlagen und Richtlinien zur Bestimmung der Hauptkampfentfernung und der Geschoswahl* [Basis and Guidance for the Determination of the Best Range and the Choice of Projectiles]. Berlin. 1940. (In German).

13. *H.M.S. Hood Association*. Available at: www.hmshood.com , accessed 09.09.2013.