

УДК 681.5

Исследование характеристик градового выстрела и решение траекторной задачи неуправляемого полета твердого тела произвольной формы, для натурных испытаний авиадвигателей на стойкость

Мустафаев Т.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Комсомольский проспект, 29, Пермь, 614990, Россия

e-mail: mustafaev.t@yandex.ru

Статья поступила 25.11.2019

Аннотация

Наряду с развитием расчетных методов для исследования прочностных характеристик элементов конструкций самолетов [1], широко используется натурный эксперимент, воспроизводящий реальное воздействие птицы на конструкции самолета при столкновении в полете. Данная статья посвящена исследованию характеристик градового выстрела и решению траекторной задачи неуправляемого полета твердого тела произвольной формы, для натурных испытаний опытных и серийных авиадвигателей на стойкость при помощи стендов имитирующих попадание птиц или града.

Ключевые слова: натурные испытания, градовый выстрел, траекторная задача, птицестойкость, градостойкость.

Введение

Исследования в области птицестойкости элементов конструкций авиационной техники проводятся во всем мире [2-5]. Натурные испытания на птицестойкость, как правило, проводятся с использованием тушек птиц (утка, курица, скворец и др.) массой от 60 г до 4 кг. В некоторых случаях, для упрощения методики эксперимента, используются имитаторы птиц [6-8]. Важность этого направления подтверждается наличием соответствующих требований в документации, регламентирующей нормы летной годности, которая не допускает использование роботизированных стендов для определения жесткостных характеристик [8-10].

Натурные испытания по попаданию крупной птицы в авиадвигатель, которые, согласно действующим нормативным документам [11], проводятся на работающем двигателе, либо на вращающихся рабочих колесах вентиляторов или компрессоров на стендах являются крайне дорогостоящими. Поэтому перед проведением натурных испытаний целесообразно выполнять расчётный анализ стойкости рабочих лопаток к ударному взаимодействию с крупной птицей и градом.

Стендовые установки для проведения испытаний по оценке стойкости лопаток к ударному взаимодействию крупной птицы и градин должны максимально отражать условия реального взаимодействия вращающихся лопаток натурального рабочего колеса с птицей и градом, а так же удовлетворять целому ряду трудно совместимых требований, например математической модели расчета внутренней и внешней баллистики испытательного стенда или решение траекторной задачи неуправляемого полета твердого тела, которую мы и постараемся решить в данной статье.

Исследование характеристик градového выстрела

Под градovým выстрелом будем понимать выстрел, выполненный градом из “разгонной пушки” по мишени, которая расположена на заданной дальности.

За прототип модели градовой стрельбы возьмем модель дробового выстрела из гладкоствольного оружия.

Исследованиями результатов стрельбы из дробового оружия с применением математического аппарата занимались многие ученые. Одним из первых был французский генерал Журнэ (Journée), затем - А.А. Зернов, Б.А. Крейцер [12-14] и др. Проведенные ими исследования показали, что всякая дробовая осыпь, полученная в результате выстрела из гладкоствольного ружья, подчиняется «единому закону распределения дроби на площади заданного круга, независимо от дистанции стрельбы, номера дроби и т. д.» [15].

На основе опытных данных А.А. Зернов и Б.А. Крейцер получили эмпирическую зависимость процента пробоин P , попадающих в заданный круг, от значения радиуса этого круга z , которая имеет следующий вид:

$$P = 1 - \frac{1}{2^{k^2}} \quad (1)$$

где $k = r/R_{50}$;

r - радиус круга, вмещающего определенный процент пробоин;

R_{50} - радиус круга, содержащий 50 % пробоин.

Соотношение (1) устанавливает связь между P и k при известном R_{50} , но не позволяет определить связи между другими параметрами дробового выстрела и видом его распределения.

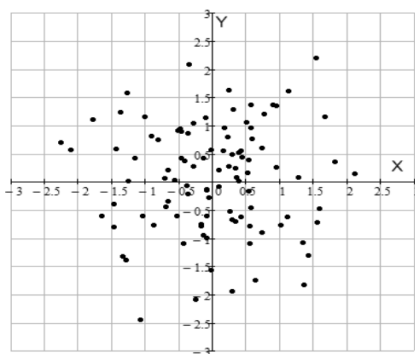
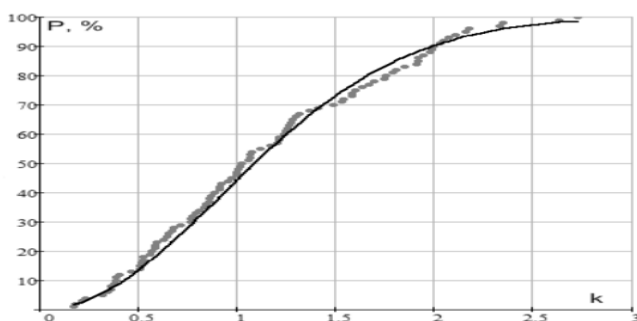
Для нахождения указанных зависимостей проведено статистическое моделирование результатов дробового выстрела в предположении, что распределение координат пробоин по осям X и Y подчиняется нормальному закону:

$$P_x = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2}, P_y = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ – среднеквадратическое отклонение распределения дробовой осыпи по осям X и Y , математическое ожидание распределения дробовой осыпи предполагается совпадающим с точкой прицеливания т.е. $\mu_x = \mu_y = \mu$.

Пример дробового выстрела для числа дробинок $N = 100$, $\alpha = 1$ показан на рисунке 1.1, а результаты статистического моделирования P от k на рисунке 1.2 (точки). Сплошной линией показана зависимость, полученная из соотношения (1).

Из рисунка 1.2 следует, что соотношение (1) и предложенная статистическая модель дробового выстрела совпадают с достаточной степенью точности. Этот вывод подтвержден путем проверки полученного распределения по критерию Колмогорова - Смирнова. Для различных объемов $N = 100 \dots 1\,000$ в серии из 20 экспериментов среднее значение критерия составило 0,622, когда критическое значение критерия для уровней значимости $\alpha = 0,05$ равно 1,358, а для $\alpha = 0,01$ равно 1,628.

Рисунок 1.1 - Распределение пробоев при $N=100$ для одного выстрелаРисунок 1.2 - Зависимость процента попаданий P от k для одного выстрела

Из того, что распределение координат пробоев по осям X и Y подчиняется нормальному закону, следует, что относительно средней точки попадания это распределение подчиняется закону Рэля [16]:

$$P = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет найти связь между произвольным радиусом дробовой осыпи и вероятностью попадания в круг этого радиуса.

$$r = \sigma \sqrt{2 \ln \left(\frac{1}{1-P} \right)} \quad (4)$$

В частности, для R_{50} и k имеем:

$$R_{50} = \sigma \sqrt{2 \ln 2} \approx 1,1774\sigma \quad (5)$$

$$k = \frac{r}{R_{50}} = \frac{\sigma \sqrt{-2 \ln(1-P)}}{\sigma \sqrt{-2 \ln(1-0.5)}} = \sqrt{\log_2 \left(\frac{1}{1-P} \right)}$$

(6)

Формулы (4) и (5) позволяют найти связь между СКО выстрела σ и радиусом r , R_{50} и, наоборот, по радиусу R_{50} оценить значение σ . Соотношения (6) и (1) тождественно соответствуют друг другу. При этом соотношение (1) получено из опытных данных, а соотношение (6) из предложенной статистической модели дробового выстрела, что еще раз подтверждает справедливость предложенной модели.

Варианты решения траекторной задачи неуправляемого полета твердого тела произвольной формы

Для перехода от скорости V_x , отвечающей точке на расстоянии X от дульного среза к скорости V_∂ , отвечающей точке вылета в артиллерийской полигонной практике пользуются зависимостью

$$V_\partial = V_x + \frac{10 C X}{\Delta D(V_x)},$$

где C – баллистический коэффициент «снаряда»;

$\Delta D(V_x)$ – приращение функции Сиаччи по закону сопротивления воздуха 1943 г., отвечающее изменению скорости «снаряда» на 10 м/с на участке, в пределах которого измеряется скорость «снаряда» (определяется по таблицам приложения к ОСТ В84–1980).

Баллистические коэффициенты птиц подбирались по опытным данным, полученных при выстреливании птиц на установке компании «Дэвис» и представленных в таблице 2.1.

$$C = \frac{(V_d - V_5)\Delta D(V_5)}{10^5}$$

Таблица 2.1 – Характеристики установки по выстрелам птиц компании «Дэвис»

q_a , кг	d , in	P_b , МПа	V_d , м/с	V_5 , м/с	C
2,0	6"	0,97	182	175	105,3
		1,38	210	200	131,5
	7"	1,38	220	210	124,0
1,85	6"	0,97	185	178	103,4
		1,38	215	178	127,0
	7"	1,38	223	212	135,0
0,70	6"	0,97	215	205	127,0
		1,38	245	205	127,0
	7"	1,38	260	240	214,0

Баллистический коэффициент для птицы массой 1,15 кг получен интерполяцией по данным для птиц массой 0,70 кг и 1,85 кг. Результаты расчетов дульной скорости для птиц представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчетов дульной скорости

q_a , кг	V_5 , м/с	V_∂ , м/с
1,85	103^{+5}	$(107 - 108)^{+5}$
1,15	118^{+5}	$(123 - 126)^{+5}$
0,70	118^{+5}	$(124 - 128)^{+5}$

Расчет дульной скорости градин диаметром 50 и 25 мм выполнялся аналогично по формуле

$$V_\partial = V_x + \frac{10 C X}{\Delta D(V_x)}$$

где $\Delta D(V_x) = 673,5$;

$X = 5$ м;

$V_x = 195$ м/с.

Величина баллистического коэффициента определяется по формуле

$$C = \frac{i \cdot d^2}{q} 10^3,$$

где i – коэффициент формы снаряда;

d – калибр, м;

q – масса снаряда, кг.

В диапазоне чисел Маха от 0,55 до 0,65 коэффициент силы лобового сопротивления C_x сферических ядер равен от 0,39 до 0,47, что при значении эталонной функции закона 1943 г. $C_x(V)_{эм} = 0,157$ для $M < 0,73$ означает $i = 2,5 \dots 3$.

Таким образом, для градины диаметром 25 мм коэффициент C равен от 2,75 до 3,3, для градины диаметром 50 мм коэффициент C равен от 1,38 до 1,65. Величина падения скорости ΔV_0 составляет от 0,1 м/с до 0,24 м/с.

Градины на участке 5 м от дульного среза скорость практически не теряют.

Определение дальности бросания курицы выполнено для следующих условий [17-20]:

- высота линии бросания 1,827 м;
- угол вертикального наведения (угол бросания) $0^\circ, 3^\circ$.

В общем виде уравнение траектории движения центра масс имеет вид $y = f(x)$, где x – абсцисса траектории; y – ее ордината.

Представляя функцию y в виде ряда Маклорена, ограничиваясь первыми четырьмя членами разложения

$$y = y_0 + \left(y'_x\right)_0 x + \left(y''_x\right)_0 \frac{x^2}{2} + \left(y'''_x\right)_0 \frac{x^3}{6}.$$

Индекс «0» указывает на то, что значения функции y и ее производных должны быть взяты для точки вылета.

Подставив значения производных в уравнения, получим

$$y(x) = y_0 + x \cdot \operatorname{tg} \theta_0 - \frac{g \cdot x^2}{2v_0^2 \operatorname{Cos}^2 \theta_0} - \frac{g \cdot x^3 c \cdot G(v_0)}{3v_0^2 \operatorname{Cos}^3 \theta_0},$$

где y_0 – начальная высота траектории, м;

θ_0 – угол бросания, градусы;

c – баллистический коэффициент «снаряда»;

v_{∂} – дульная скорость «снаряда», м/с;

$G(v_{\partial})$ – функция сопротивления воздуха.

По закону сопротивления 1943 г. для $v < 250$ м/с

$$G(v) = 19,2558 \cdot 10^{-4} v.$$

Результаты расчетов траектории движения для углов бросания $\theta_0 = 0^\circ$ и $\theta_0 = 3^\circ$

приведены на таблице 2.3 и рисунках 2.1-2.4.

Таблица 2.3 – Максимальная дальность полета «снаряда»

Параметры стрельбы	Дальность полета, м
$q_a = 1,85$ кг, $c = 4,0$, $v_{\partial} = 107^{+5}$ м/с, $\theta_0 = 0^\circ$	59,8
$q_a = 1,85$ кг, $c = 4,0$, $v_{\partial} = 107^{+5}$ м/с, $\theta_0 = 3^\circ$	111,5
$q_a = 0,7$ кг, $c = 5,0$, $v_{\partial} = 124^{+5}$ м/с, $\theta_0 = 0^\circ$	65,9
$q_a = 0,7$ кг, $c = 5,0$, $v_{\partial} = 124^{+5}$ м/с, $\theta_0 = 3^\circ$	125,5

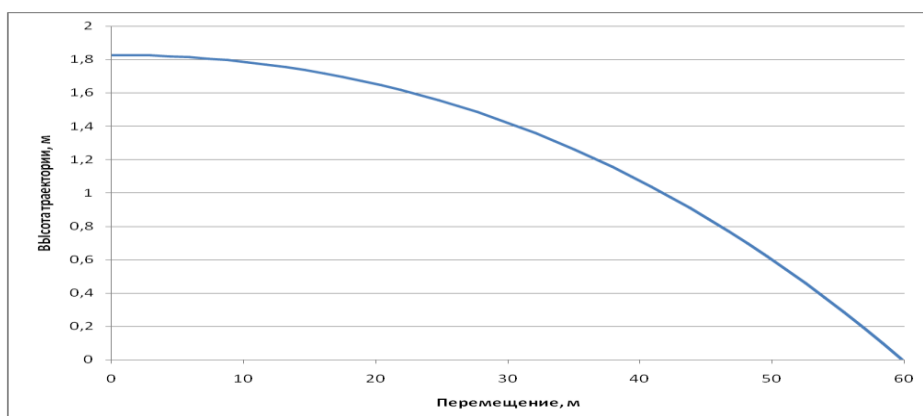


Рисунок 2.1 – Высота траектории «снаряда» при $q_a = 1,85$ кг, $c = 4,0$, $v_{\partial} = 107^{+5}$ м/с, $\theta_0 = 0^\circ$

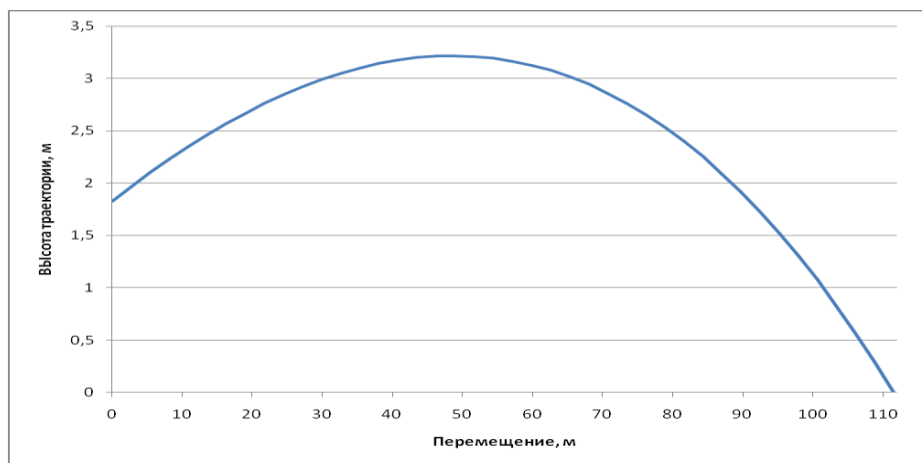


Рисунок 2.2 – Высота траектории «снаряда» при $q_a = 1,85$ кг, $c = 4,0$,
 $v_d = 107^{+5}$ м/с, $\theta_0 = 3^\circ$

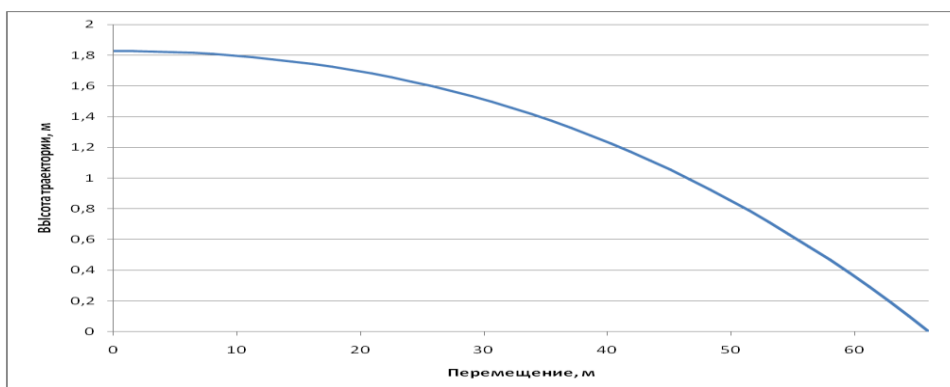


Рисунок 2.3 – Высота траектории «снаряда» при $q_a = 0,7$ кг, $c = 5,0$,
 $v_d = 124^{+5}$ м/с, $\theta_0 = 0^\circ$

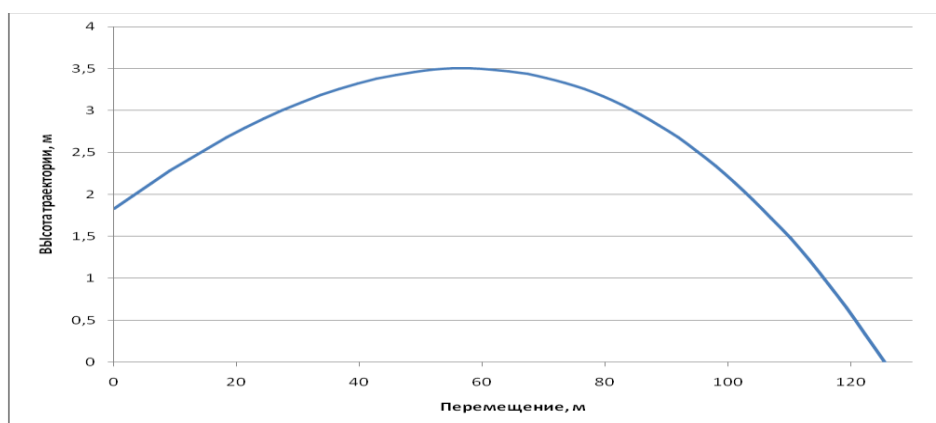


Рисунок 2.4 – Высота траектории «снаряда» при $q_a = 0,7$ кг, $c = 5,0$,
 $v_d = 124^{+5}$ м/с, $\theta_0 = 3^\circ$

Заключение

Таким образом, предложенная модель позволит установить связь между такими величинами, как P , k , σ , R_{50} , произвольным радиусом r , что дает возможность рассчитывать результаты дробового выстрела по мишени при различных исходных данных. Так же наглядно удалось продемонстрировать примеры моделирования расчетов траектории движения для различных углов бросания твердого тела произвольной формы при испытаниях авиадвигателей на стойкость.

Библиографический список

1. Вербицкий А.Б., Сидоренко А.С. Динамическое деформирование конструкции авиационного изделия при аварийном соударении с преградой // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53502>
2. Уилбек Дж.С., Дж. Л. Ренд. Разработка модели птицы для ударных испытаний авиационных двигателей // Энергетические машины. 1981. Т. 103. № 4. С. 126 - 133.
3. Wang Xinjun, Feng Zhenzhou, Wang Fusheng, Yue Zhufeng. Dynamic response analysis of bird strike on aircraft windshield based on damage-modified nonlinear viscoelastic constitutive relation // Chinese Journal of Aeronautics, 2007, vol. 20, no. 6, pp. 511 - 517.
4. Budgey R. The development of a substitute artificial bird by the International Birdstrike Research Group for use in aircraft component testing // Conference of International Bird Strike Committee 25/WP-IE3, Amsterdam, 2000, pp. 543 - 550.

5. Долгополова Н.В., Онгирский Г.Г., Сметанкина Н.В. и др. Имитатор птицы для испытаний конструкции самолета на птицестойкость. Сер. Труды Центрального аэрогидродинамического института им. Н.Е. Жуковского. Вып. 2675. – М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2007. С. 46 - 50.
6. Онгирский Г.Г., Шупиков А.Н., Угримов С.В. Влияние кинематических факторов на реакцию деформируемой преграды при столкновении с птицей // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2008. № 5(56), С. 54 - 62.
7. Анамова Р.Р. Автоматизация подготовки аддитивного производства изделий авиационной техники // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58823>
8. Рогачев А.И. Лебедев А.М. Орнитологическое обеспечение полетов. - М.: Транспорт, 1984. – 126 с.
9. Тамм А.Ю. Развитие подходов цифрового проектирования и моделирования в авиастроении (Мероприятие: создание виртуального испытательного полигона «Крыло»), 2019: URL: https://nticenter.spbstu.ru/nti_projects/10
10. Нормы летной годности гражданских самолетов СССР. – М.: Межведомственная комиссия по нормам летной годности гражданских самолетов и вертолетов СССР, 1984. - 464 с.
11. Амирьянц Г.А., Малютин В.А. Об экспериментальном определении жесткостных характеристик авиационных конструкций // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100600>

12. Федеральные авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности, транспортные категории самолетов. - Амстердам: FAA, 1991. - 177 С.
13. ASTM. Стандартный метод испытания стекол кабины самолета на удар тушками птиц, международный стандарт F 330-89, повторно утвержден 2004. С. 2, 4, 5.
14. Павлов Ю.И., Шайн Ю.А., Абрамов Б.И. Проектирование испытательных стендов для авиационных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. - 152 с.
15. Лаврик В.С., Рубцов И.Ф., Шерер Э.А. Летчик, внимание – птицы! - М.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1970. - 104 с.
16. Лебединский В.И., Ляховенко И.А., Меркурьев А.В., Музыченко В.П. Силы и давления при соударении птицы с плоской поверхностью. Сер. Труды Центрального аэрогидродинамического института им. Н.Е. Жуковского. Вып. 2639. - М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2000. – 83 с.
17. Крейцер Б.А., Степанов И.П. Дробовой выстрел. - М.: Физкультура и спорт, 1959. – 72 с.
18. Арбузов И.А. Математический анализ дробового выстрела. - М.: Компания Спутник+, 2006. – 31 с.
19. Гинесин Л.Ю. Сравнение расчетных моделей анализа ударного взаимодействия лопатки ГТД с птицей // Четвертая Российская конференция пользователей программных продуктов фирмы. MSC "MSC Форум 2001". (Москва, 25 Октября 2001): Сборник докладов. - М.: ЦИАМ, 2001. URL:
URL: <http://www.mssoftware.ru/publishes>

20. Кондрашин М.А., Арсенов О.Ю., Козлов И.В. Применение технологии виртуализации и облачных вычислений при построении сложных распределенных моделирующих систем // Труды МАИ. 2016. № 89. URL <http://trudymai.ru/published.php?ID=73411>