

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ РАЗРЫВНЫХ ЗАРЯДОВ КУМУЛЯТИВНЫХ БОЕПРИПАСОВ

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МЫШЛЕНИЕ

ПРЕДЛАГАЕМ МЕТОД

~ КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

разрывной заряд,
взрывчатое вещество,
кумулятивные боеприпасы,
гидростатический метод,
пустые корпуса,
кумулятивные воронки,
экраны.

~ ВЫ УЗНАЕТЕ:

какие существуют методы определения средней плотности разрывного снаряда кумулятивных боеприпасов, изготавливаемых в снаряжательных производствах;

в чем преимущество статистического метода определения средней плотности разрывных зарядов кумулятивных боеприпасов по сравнению с гидростатическим методом.

~ АВТОР



Николай
Сергеевич
Херсонский

канд. техн. наук, старший научный сотрудник, генеральный директор ООО «СОЮЗСЕРТ», действительный член Академии проблем качества РФ, действительный член Международной гильдии профессионалов качества, член Правления ВОК



В снаряжательных производствах боеприпасов одним из важнейших параметров, определяющих эффективность и качество боеприпаса, является средняя плотность разрывного заряда (РЗ) из взрывчатых веществ (ВВ).

Существующие методы определения средней плотности РЗ боеприпасов трудоемки, неинформативны и не обладают требуемой точностью. В сущности, все методы сводятся к гидростатическому методу, основанному на среднемаксимальном объеме [1].

Основная трудность при вычислении средней плотности РЗ — измерение объема, занимаемого ВВ, из-за сложной конфигурации боеприпасов. Практически единственным методом определения объема боеприпаса можно назвать гидростатический метод, основанный на определении объема, занимаемого водой. Он имеет следующие недостатки:

- при измерении неизбежно внесение в результат субъективных ошибок контролера;
- большая трудоемкость, малая производительность;
- после измерения необходимы дополнительные операции — протирка и сушка или уничтожение боеприпаса.

При применении метода, основанного на среднемаксимальном объеме, занижается истинная средняя плотность РЗ и, следовательно, увеличивается число ложнобракованных боеприпасов при контроле. Главный недостаток этих методов — отсутствие выражения для определения точности метода.

Средняя плотность РЗ боеприпаса в производственных условиях зависит от технологии снаряжения, оборудования, свойств продукта, стабильности и устойчивости технологического процесса, т. е. является величиной случайной.

В применяемых в снаряжательных производствах методах определения средней плотности РЗ не учитывались связи между параметрами боеприпаса, технологией снаряжения и средней плотностью РЗ. Как показывают наблюдения, между объемом, занимаемым ВВ в РЗ, массами пустого и снаряженного боеприпасов, массой кумулятивной воронки, массой экрана, глубиной запрессовки ВВ и другими параметрами боеприпаса существует довольно сильная корреляционная связь, что способствует повышению точности определения средней плотности РЗ.

Наиболее мощным инструментом изучения случайных явлений, их взаимосвязи стали методы теории вероятностей и математической статистики [2–8].

Более 35 лет назад были разработаны статистические методы определения средней плотности РЗ для всех видов боеприпасов и методов их снаряжения [1, 9]. В свое время эти методы не имели аналогов в мире [9].

Работы проводились под руководством известного ученого в области качества и надежности боеприпасов, канд. техн. наук В.В. Прошина. Большой вклад в развитие этих методов внесли д-ра техн. наук Б.В. Мачеевич и В.А. Ликин.

В данной статье речь пойдет о кумулятивных боеприпасах (снаряды, мины, боевые части гранатометных выстрелов, боевые части ракет и др.), снаряжаемых методом запрессовки ВВ в корпус [10]. Будут рассмотрены методы определения средней плотности РЗ кумулятивных боеприпасов, изготавливаемых в снаряжательных производствах. В основе метода лежат уравнения линейной регрессии. Приведена оценка точности метода, которая во всех случаях оценивается по остаточной дисперсии, т. е. среднему квадрату разности между истинными и значениями средней плотности РЗ, определяемыми по уравнению регрессии.

За истинную среднюю плотность РЗ принималась средняя плотность РЗ, определяемая гидростатическим методом [1].

Представленный здесь метод основан на взвешивании боеприпаса (пустого и снаряженного) и его деталей (кумулятивной воронки и экрана).

Истинная средняя плотность РЗ кумулятивного боеприпаса определяется по формуле:

$$\rho_{И} = \frac{P_{Н} - P_{П} - B_1 - B_2}{V_3 - V_1 - V_2}, \quad (1)$$

где $P_{Н}$ и $P_{П}$ — масса снаряженного и пустого корпуса боеприпаса, соответственно, г;

B_1 и B_2 — масса кумулятивной воронки и экрана соответственно, г;

V_3 — объем заряда, см³;

V_1 и V_2 — объем, занимаемый кумулятивной воронкой и экраном, соответственно, см³.

Пусть ρ_1 — средняя плотность вещества кумулятивной воронки, а ρ_2 — средняя плотность вещества экрана, тогда можно записать:

$$\rho_1 V_1 = B_1 \quad \text{и} \quad \rho_2 V_2 = B_2.$$

Введя обозначения $1/\rho_1 = k_1$ и $1/\rho_2 = k_2$, получим $V_1 = k_1 B_1$ и $V_2 = k_2 B_2$.

С учетом этих обозначений формулу (1) можно записать в виде:

$$\rho_{И} = \frac{P_{Н} - P_{П} - B_1 - B_2}{V_3 - k_1 B_1 - k_2 B_2}. \quad (2)$$

Применение формулы (2) в дальнейших расчетах приводит к непреодолимым матема-

тическим трудностям, поэтому линеаризуем функцию средней плотности РЗ. Разложим функцию (2) в ряд Тейлора в окрестности точки $\rho_{\text{и}} = \bar{\rho}$, ограничиваясь членами первого порядка малости [6–8].

Имеем:

$$\rho_{\text{М}} = \bar{\rho} + \frac{1}{\bar{V}_3 - k_1 \bar{B}_1 - k_2 \bar{B}_2} [(P_{\text{Н}} - \bar{P}_{\text{Н}}) - (P_{\text{П}} - \bar{P}_{\text{П}})] +$$

$$+ \frac{k_1 (\bar{P}_{\text{Н}} - \bar{P}_{\text{П}} - \bar{B}_1 - \bar{B}_2) - (\bar{V}_3 - k_1 \bar{B}_1 - k_2 \bar{B}_2)}{(\bar{V}_3 - k_1 \bar{B}_1 - k_2 \bar{B}_2)^2} (B_1 - \bar{B}_1) +$$

$$+ \frac{k_2 (\bar{P}_{\text{Н}} - \bar{P}_{\text{П}} - \bar{B}_1 - \bar{B}_2) - (\bar{V}_3 - k_1 \bar{B}_1 - k_2 \bar{B}_2)}{(\bar{V}_3 - k_1 \bar{B}_1 - k_2 \bar{B}_2)^2} (B_2 - \bar{B}_2) -$$

$$- \frac{\bar{P}_{\text{Н}} - \bar{P}_{\text{П}} - \bar{B}_1 - \bar{B}_2}{\bar{V}_3 - k_1 \bar{B}_1 - k_2 \bar{B}_2} (V_3 - \bar{V}_3), \quad (3)$$

где $\rho_{\text{М}}$ — средняя плотность РЗ, определенная статистическим методом;

$\bar{\rho}$ — среднее арифметическое значение средней плотности РЗ,

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{P}_{\text{Н}} - \bar{P}_{\text{П}} - \bar{B}_1 - \bar{B}_2}{\bar{V}_3 - k_1 \bar{B}_1 - k_2 \bar{B}_2}, \quad (4)$$

где $\bar{P}_{\text{Н}}$, $\bar{P}_{\text{П}}$, \bar{B}_1 , \bar{B}_2 — средние арифметические значения параметров боеприпаса.

Приведа в формуле (3) подобные члены и используя соотношение (4), получим линеаризованную функцию средней плотности РЗ в окончательном виде:

$$\rho_{\text{М}} = \bar{\rho} + \frac{1}{\bar{V}} (P_{\text{Н}} - \bar{P}_{\text{Н}}) - \frac{1}{\bar{V}} (P_{\text{П}} - \bar{P}_{\text{П}}) +$$

$$+ \left(k_1 \frac{\bar{\rho}}{\bar{V}} - \frac{1}{\bar{V}} \right) (B_1 - \bar{B}_1) + \left(k_2 \frac{\bar{\rho}}{\bar{V}} - \frac{1}{\bar{V}} \right) (B_2 - \bar{B}_2) -$$

$$- \frac{\bar{\rho}}{\bar{V}} (V_3 - \bar{V}_3), \quad (5)$$

где \bar{V} — среднее арифметическое значение объема, занимаемого РЗ, определяемое по формуле:

$$\bar{V} = \bar{V}_3 - k_1 \bar{B}_1 - k_2 \bar{B}_2.$$

Будем искать среднюю плотность РЗ по формуле:

$$\rho_{\text{М}} = \bar{\rho} + a(P_{\text{Н}} - \bar{P}_{\text{Н}}) - b(P_{\text{П}} - \bar{P}_{\text{П}}) +$$

$$+ c(B_1 - \bar{B}_1) + d(B_2 - \bar{B}_2), \quad (6)$$

где a, b, c, d — определяемые коэффициенты.

Коэффициенты a, b, c, d , определенные методом наименьших квадратов с учетом статистической независимости величин $P_{\text{П}}$, B_1 , B_2 (пустые корпуса, кумулятивные воронки и экраны изготавливаются на разных предприятиях), определяются по формулам:

$$a = \frac{1}{\bar{V}} - \frac{\bar{\rho}}{\bar{V}} \frac{\sigma_{V_3}}{\sigma_{P_{\text{Н}}}} \frac{r_{P_{\text{Н}}V_3} - r_{P_{\text{П}}P_{\text{Н}}} r_{P_{\text{П}}V_3} - r_{P_{\text{Н}}B_1} r_{B_1V_3} - r_{P_{\text{Н}}B_2} r_{B_2V_3}}{1 - r_{P_{\text{Н}}P_{\text{П}}}^2 - r_{P_{\text{Н}}B_1}^2 - r_{P_{\text{Н}}B_2}^2},$$

$$b = \frac{-1}{\bar{V}} - \frac{\bar{\rho}}{\bar{V}} \frac{\sigma_{V_3}}{\sigma_{P_{\text{Н}}}} \times$$

$$\times \frac{r_{P_{\text{Н}}V_3} + r_{P_{\text{Н}}P_{\text{П}}}(r_{B_1V_3} r_{P_{\text{Н}}B_1} - r_{P_{\text{Н}}V_3} + r_{P_{\text{Н}}B_2} r_{B_2V_3}) - r_{P_{\text{Н}}V_3}(r_{P_{\text{Н}}B_2}^2 + r_{P_{\text{Н}}B_1}^2)}{1 - r_{P_{\text{Н}}P_{\text{П}}}^2 - r_{P_{\text{Н}}B_1}^2 - r_{P_{\text{Н}}B_2}^2},$$

$$c = \frac{1}{\bar{V}} - \left(\frac{\bar{\rho}}{\bar{V}_1} - 1 \right) - \frac{\bar{\rho}}{\bar{V}} \frac{\sigma_{V_3}}{\sigma_{P_{\text{Н}}}} \times \quad (7)$$

$$\times \frac{r_{B_1V_3} + r_{P_{\text{Н}}B_1}(r_{P_{\text{Н}}V_3} r_{P_{\text{Н}}P_{\text{П}}} - r_{P_{\text{Н}}V_3} + r_{P_{\text{Н}}B_2} r_{B_2V_3}) - r_{B_1V_3}(r_{P_{\text{Н}}P_{\text{П}}}^2 + r_{P_{\text{Н}}B_2}^2)}{1 - r_{P_{\text{Н}}P_{\text{П}}}^2 - r_{P_{\text{Н}}B_1}^2 - r_{P_{\text{Н}}B_2}^2},$$

$$d = \frac{1}{\bar{V}} - \left(\frac{\bar{\rho}}{\bar{V}_1} - 1 \right) - \frac{\bar{\rho}}{\bar{V}} \frac{\sigma_{V_3}}{\sigma_{B_2}} \times$$

$$\times \frac{r_{B_2V_3} + r_{P_{\text{Н}}B_2}(r_{P_{\text{Н}}V_3} r_{P_{\text{Н}}P_{\text{П}}} - r_{P_{\text{Н}}V_3} + r_{P_{\text{Н}}B_1} r_{B_1V_3}) - r_{B_2V_3}(r_{P_{\text{Н}}P_{\text{П}}}^2 + r_{P_{\text{Н}}B_1}^2)}{1 - r_{P_{\text{Н}}P_{\text{П}}}^2 - r_{P_{\text{Н}}B_1}^2 - r_{P_{\text{Н}}B_2}^2},$$

где σ_x — средние квадратические отклонения параметров боеприпаса ($P_{\text{П}}$, $P_{\text{Н}}$, B_1 , B_2 , V_3), которые вычисляются по общей формуле [2, 4]:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

где r_{xy} — коэффициенты корреляции между парой параметров боеприпаса ($P_{\text{П}}$ и $P_{\text{Н}}$, B_1 и B_2 , V_3 и $P_{\text{П}}$ и др.), которые вычисляются по общей формуле [2, 4]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n \sigma_x \sigma_y}.$$

Вывод коэффициентов a, b, c, d полностью указан в работах [1, 9].

Приведенные формулы (7) определяют искомые коэффициенты: a, b, c, d .

Определение средней плотности РЗ производится следующим образом.

У боеприпаса перед снаряжением определяют массы пустого корпуса $P_{\text{П}}$, кумулятивной воронки B_1 и экрана B_2 в граммах. После снаряжения боеприпаса определяют его массу $P_{\text{Н}}$ в граммах.

Среднюю плотность РЗ определяют по формуле (6) подстановкой в нее полученных значений $P_{\text{П}}$, B_1 , B_2 , $P_{\text{Н}}$.

Для получения уравнения (6) обычно использовалась накопленная информация о $n = 100$ боеприпасах, средняя плотность РЗ которых определялась гидростатическим методом.

При смене поставщиков ВВ, пустых корпусов, кумулятивных воронок или экранов (далее — комплектующих) уравнение (6) подлежало

корректировке, так как статистические характеристики ВВ и комплектующих будут другими.

Через определенное время проводилась проверка уравнения (6) путем сравнения значений средней плотности, полученной по данному уравнению, со значениями средней плотности, полученными гидростатическим методом. При этом максимальная разность значений средней плотности РЗ не должна превышать 0,004 г/см³.

Если устанавливалось превышение, то проводилась корректировка уравнения (6).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДА

Примем за точность метода остаточную дисперсию [1]. Из формул (5) и (6) следует:

$$\rho_{\text{И}} - \rho_{\text{М}} = \left(\frac{1}{V} - a \right) (P_{\text{Н}} - \bar{P}_{\text{Н}}) - \left(\frac{1}{V} + b \right) (P_{\text{П}} - \bar{P}_{\text{П}}) + (z_1 - c)(B_1 - \bar{B}_1) + (z_2 - d)(B_2 - \bar{B}_2) - \frac{\bar{\rho}}{V} (V_3 - \bar{V}_3),$$

$$\text{где } z_1 = k_1 \frac{\bar{\rho}}{V} - \frac{1}{V}; \quad z_2 = k_2 \frac{\bar{\rho}}{V} - \frac{1}{V}.$$

Возводя обе части последнего выражения в квадрат и применяя операцию математического ожидания, после подстановки значений коэффициентов a, b, c, d получим выражение для остаточной дисперсии:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\bar{\rho}^2}{V^2} \sigma_{V_3}^2 \left[1 - \frac{r_{P_1 V_3}^2 + r_{P_1 V_3}^2 (1 - r_{P_1 B_1}^2 - r_{P_1 B_2}^2)}{1 - r_{P_1 P_1}^2 - r_{P_1 B_1}^2 - r_{P_1 B_2}^2} + \frac{r_{B_1 V_3}^2 + (1 - r_{P_1 P_1}^2 - r_{P_1 B_2}^2)}{1 - r_{P_1 P_1}^2 - r_{P_1 B_1}^2 - r_{P_1 B_2}^2} - \frac{r_{B_2 V_3}^2 (1 - r_{P_1 P_1}^2 - r_{P_1 B_1}^2) + 2 r_{P_1 P_1} r_{P_1 V_3} (r_{P_1 B_1} r_{B_1 V_3} - r_{P_1 V_3})}{1 - r_{P_1 P_1}^2 - r_{P_1 B_1}^2 - r_{P_1 B_2}^2} - \frac{2 r_{P_1 B_1} r_{B_1 V_3} (r_{P_1 B_2} r_{B_2 V_3} - r_{P_1 V_3}) + 2 r_{P_1 B_2} r_{B_2 V_3} (r_{P_1 P_1} r_{P_1 V_3} - r_{P_1 V_3})}{1 - r_{P_1 P_1}^2 - r_{P_1 B_1}^2 - r_{P_1 B_2}^2} \right]. \quad (8)$$

Формула (8) определяет точность метода, ее вывод полностью приведен в работах [1, 9].

Ошибка в определении средней плотности РЗ статистическим методом в большой степени зависит от колебаний внутренних объемов боеприпасов σ_v ; чем меньше эти колебания, тем точнее определяется средняя плотность РЗ. Кроме того, чем теснее связь между массами пустого, снаряженного корпуса, кумулятивной воронки, экраном и его объемом, тем меньше ошибка в определении средней плотности РЗ статистическим методом.

Истинная средняя плотность РЗ с вероятностью α будет находиться в пределах:

$$\sigma_{\text{И}} = \sigma_{\text{М}} \pm t_{\alpha, n-1} S_{\text{ост}}, \quad (9)$$

где $t_{\alpha, n-1}$ — квантиль распределения Стьюдента [2].

В частности, для $\alpha = 0,95$ и $n = 100$ получим [2]:

$$\sigma_{\text{И}} = \sigma_{\text{М}} \pm 2 S_{\text{ост}}. \quad (10)$$

Данный метод применялся на ряде предприятий, выпускающих кумулятивные боеприпасы, что позволило этим предприятиям экономить миллионы рублей в год.

Дело в том, что при гидростатическом методе определения средней плотности РЗ кумулятивных боеприпасов, чтобы определить объем, занимаемый РЗ, необходимо определять значения веса пустого корпуса, кумулятивной воронки, экрана и снаряженного боеприпаса в воздухе и воде.

В соответствии с требованиями нормативной документации, снаряженный боеприпас, побывавший в воде, подлежит уничтожению. Если учесть, что из сменной выработки отбиралось несколько боеприпасов, то понятно, чем обусловлена такая значительная экономия средств.

Этот метод может применяться на предприятиях, выпускающих кумулятивные боеприпасы, и приносить экономический эффект в зависимости от объема выпускаемых кумулятивных боеприпасов.

ВЫВОДЫ

Разработан статистический метод определения средней плотности РЗ кумулятивных боеприпасов взамен существующего гидростатического метода определения средней плотности РЗ.

Метод позволил практически исключить такие операции, как взвешивание пустого корпуса, кумулятивной воронки, экрана и снаряженного боеприпаса в воде, что дало возможность предприятиям, выпускающим кумулятивные боеприпасы, получить большой экономический эффект. [ММК]

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прошин В.В., Херсонский Н.С., Матвеевич Б.В., Ликин В.А. Статистические методы определения средней плотности разрывных зарядов боеприпасов. — Смоленск: ФГУ «Смоленский ЦНТИ», 2007.
2. Вентцель Е.С. Курс теории вероятностей. — М.: Наука, 1964.
3. Гнеденко Б.Б. Курс теории вероятностей. — М.: ГИФ-МЛ, 1961.
4. Длин А.М. Математическая статистика в технике. — М.: Советская наука, 1958.
5. Кутай А.К., Кордонский Х.Б. Анализ точности и контроль качества в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1958.
6. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. — Т. 1. — М.: Наука, 1966.
7. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. — М.: Наука, 1973.
8. Курош А.Г. Высшая алгебра: Учеб. для ун-тов. — 9-е изд. — М.: Наука, 1968.
9. Херсонский Н.С. Статистические методы в задачах менеджмента разработки, проектирования, производства и обслуживания изделий различного назначения. — М.: Эко-Пресс, 2011. — 336 с.
10. Оружие России 2006–2007. — М.: ООО «Военный парад», 2007.