

УДК 358.21

doi: 10.53816/20753608\_2025\_4\_110

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ МИНОИСКАТЕЛЕЙ В ИНТЕРЕСАХ ИНЖЕНЕРНЫХ ВОЙСК

## METHODOLOGY FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF PROMISING SAMPLES OF MINE DETECTORS IN THE INTERESTS OF ENGINEERING TROOPS

*По представлению академика РАРАН В.Н. Крамаренко*

***А.В. Шевченко, Д.А. Верейкин***

*Военно-инженерная академия им. Д.М. Карбышева*

***A.V. Shevchenko, D.A. Vereykin***

На основе подхода к оценке эффективности перспективных миноискателей с использованием функции бета-распределения приводятся результаты их определительных натурных испытаний, формулируется критерий эффективности, приводятся математические выкладки по определению объемов испытаний. Даются предложения по методике проведения испытаний, а также рекомендации по расчетам показателя эффективности в виде вероятности обнаружения мины с заданной достоверностью и дополнительных эксплуатационных показателей.

**Ключевые слова:** бета-распределение, инженерные войска, инициативная работа, мина, миноискатель, натурные испытания, определительные испытания, показатель эффективности.

Based on the approach to evaluating the effectiveness of promising mine detectors using the beta distribution function, the results of their definitive field tests are presented, an efficiency criterion is formulated, mathematical calculations are given for determining the test volume. Suggestions are made on the methodology of testing, as well as recommendations for calculating the efficiency indicator in the form of the probability of detecting a mine with a given reliability and additional operational parameters.

**Keywords:** beta distribution, engineering troops, initiative work, mine, mine detector, field tests, definitive tests, efficiency indicator

### Введение

Проводимая специальная военная операция на Украине выявила не только реальные боевые возможности современного оружия, но и позволила определить направления модернизации существующих образцов вооружения и потребность в новых перспективных видах ору-

жия. Поэтому в сложившихся условиях кратно возросло число предложений от организаций Российской Федерации по созданию (модернизации) в интересах Минобороны России образцов вооружения и военной техники в инициативном порядке за счет собственных средств исполнителя без финансирования из государственного бюджета (далее — инициативная работа) [1].

Для выполнения таких работ профильными научными организациями Минобороны России осуществляется их военно-научное сопровождение, в ходе которого проводятся, в том числе, необходимые испытания на соответствие установленным показателям качества.

Одним из показателей качества образца вооружения является эффективность, характеризующая его функционально-целевое предназначение. Эффективность можно оценить как расчетным путем, так и в ходе натурных испытаний, дающих наиболее объективную оценку. Натурные испытания реализуются в случае выполнения трех основных условий [2]:

1. Испытаниям подвергается непосредственно изготовленная продукция (то есть объект испытаний) без применения моделей изделия или его составных частей;

2. Испытания проводятся в условиях и при воздействии на продукцию, соответствующих условиям и воздействиям использования по целевому назначению;

3. Определяемые характеристики свойств объекта испытаний измеряются непосредственно и при этом не используются аналитические зависимости, отражающие физическую структуру объекта испытаний и его составных частей. Допускается использование математического аппарата статистической обработки экспериментальных данных.

Из приведенных условий видно, что провести натурные испытания в большом количестве для оценки эффективности достаточно трудоемкое и высоко затратное дело. Особенно это относится к перспективным видам вооружения, изготовленным при выполнении инициативных работ в виде опытных образцов. Цикл испытаний таких образцов начинается с этапа определительных испытаний, которые проводятся для нахождения значений характеристик объекта с заданными величинами показателей точности и (или) достоверности. Если образец проходит определительные испытания, то работа по нему продолжается. В противном случае образец отправляется на доработку.

Применительно к средствам инженерной разведки по опыту специальной военной операции в условиях активного применения мин противоборствующими сторонами эффективность средств обнаружения взрывоопасных предме-

тов, и в частности, миноискателей, становится важнейшим показателем, обеспечивающим снижение риска подрыва саперов при преодолении минно-взрывных заграждений и в последующем при очистке от мин (взрывоопасных предметов) освобожденных территорий. В этом случае эффективность перспективных миноискателей определяется вероятностью обнаружения мины.

### Методический подход к определению показателя эффективности миноискателя и объема испытаний

Сложившаяся практика испытаний миноискателей предусматривает определение показателя эффективности в виде детерминированной вероятности обнаружения мины  $P_{\text{обн}}$  при проведении одиночного испытания с использованием 10-ти мин на площади поиска испытательной площадки (мишенном поле) по формуле

$$P_{\text{обн}} = \frac{N_{\text{обн}}}{N},$$

где  $N_{\text{обн}}$  — число обнаруженных мин с помощью миноискателя;  $N$  — общее число установленных мин.

Однако если имеется необходимость повторения в разное время натурных испытаний миноискателей, то постоянно повторяется ситуация, обусловленная неодинаковыми условиями испытаний, носящими стохастический характер. В связи с этим показатель эффективности миноискателя — вероятность обнаружения мины  $P_{\text{обн}}$  приобретает характер случайной величины, описываемой функцией распределения, получаемой при статистической обработке результатов этих натурных испытаний.

В работе [3] сказано, что особенность натурных испытаний для перспективных систем вооружения и военной техники состоит в невозможности привлечения к испытаниям большого количества их образцов, что приводит к ограниченности объема выборки случайной величины показателя эффективности. Поэтому возникает задача построения функции его распределения по малой выборке. Это же относится и к определительным натурным испытаниям миноискателей, где дополнительным

ограничением является еще и число объектов поиска. Вследствие ограниченности объема выборки, для описания на ее основе функции распределения показателя эффективности авторами указанной выше работы положен принцип максимума неопределенности в соответствии с работой [4] и математически показано, что в качестве функции распределения может быть принято классическое бета-распределение.

Возможность использования классического бета-распределения была положена нами в основу методики оценки эффективности перспективных металлодетекторов различных производителей (рис. 1) в ходе проведения их определительных натурных испытаний.

При проведении определительных натурных испытаний по каждому металлодетектору формировалась выборка случайной величины «Вероятность обнаружения мины» в ходе 15-ти полевых испытаний по нахождению в каждом из них 15-ти объектов поиска (мин), установленных на мишенном поле. По полученным выборкам определялись в соответствии с [5] параметры функции бета-распределения по каждому металлодетектору. Построенные по рассчитанным параметрам графики функций бета-распре-

деления случайной величины «Вероятность обнаружения мины» по подвергнутым испытаниям металлодетекторам представлены на рис. 2.

Как показали проведенные испытания перспективные образцы миноискателей характеризуются высокой вероятностью обнаружения мины и использование в каждом испытании только 15-ти мин является все же недостаточным. Поэтому нами предложено в зависимости от достигаемой от испытания к испытанию вероятности обнаружения мины количество мин в каждом последующем испытании ( $n$ , шт.) определять исходя из следующего.

Пусть  $P_{\text{обн}}$  — вероятность обнаружения мины с помощью миноискателя ( $0 < P_{\text{обн}} < 1$ ), а  $P_{\text{пр}}$  — вероятность пропуска мины с помощью миноискателя ( $0 < P_{\text{пр}} < 1$ ), и  $P_{\text{обн}} + P_{\text{пр}} = 1$ . Тогда вероятность пропуска мины составит  $P_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{обн}}$ , а вероятность пропуска хотя бы одной мины из  $n$  установленных мин найдется выражением  $P_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{обн}}^n$ . Решая это выражение относительно  $n$ , имеем

$$n = \left\lceil \frac{\ln(1 - P_{\text{пр}})}{\ln(P_{\text{обн}})} \right\rceil, \quad (1)$$

где  $\lceil \rceil$  — знак округления к большему целому числу.

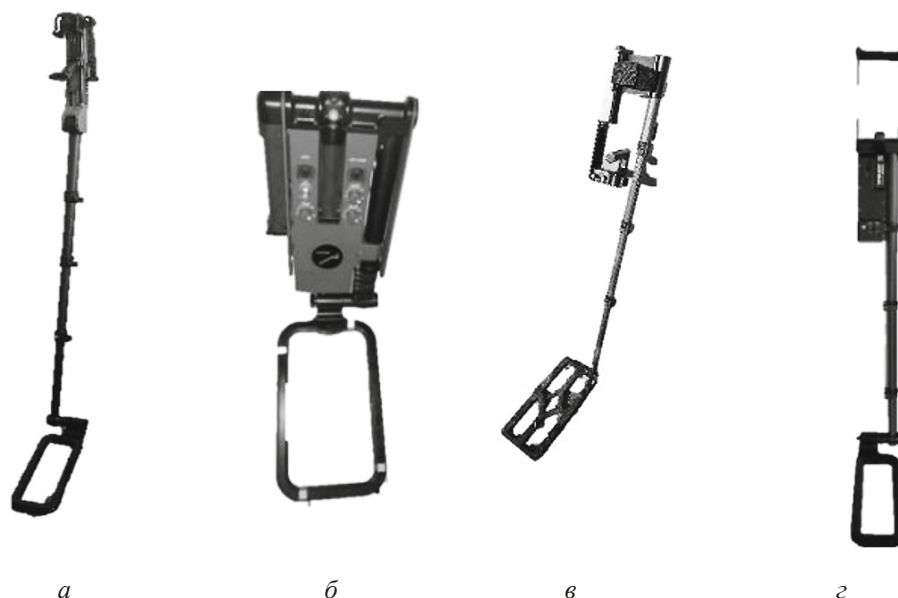


Рис. 1. Металлодетекторы, подвергнутые определительным натурным испытаниям:  
а — NR-MF (Группа защиты «ЮТТА»); б — СВАРОГ (ООО «ПОИСКОВИК-СВАРОГ»);  
в — СТИМ (ООО «ИННОПРОМ»); г) ПКМ (Группа защиты «ЮТТА»).

Примечание: металлодетектору присваивается наименование миноискатель после прохождения государственных испытаний и присвоения конструкторской документации литеры О1

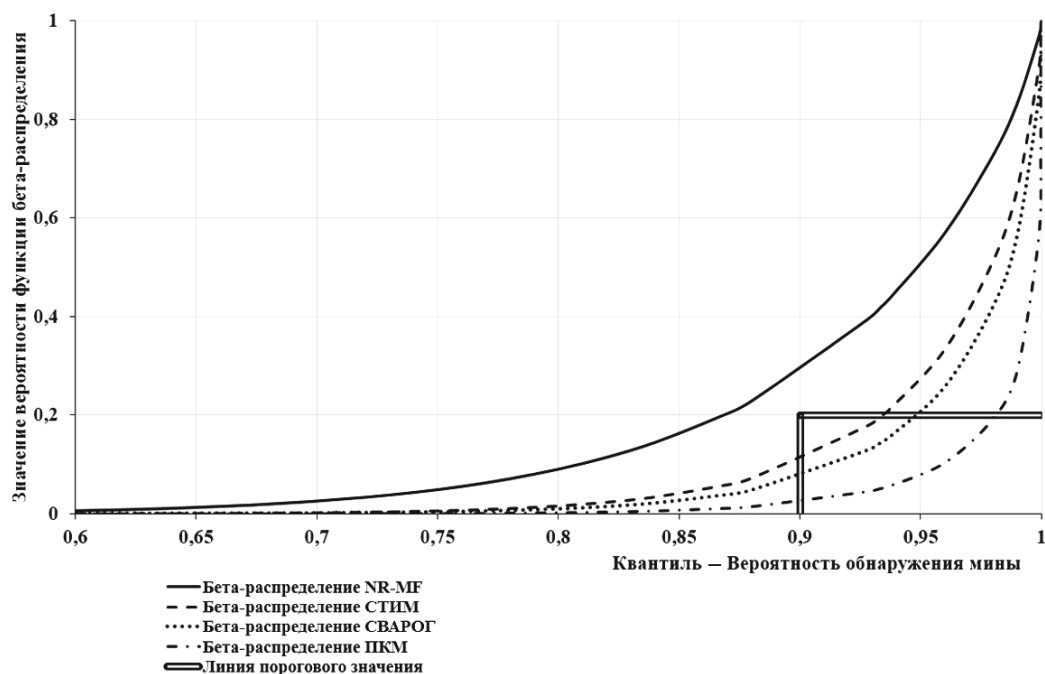


Рис. 2. Графики функций бета-распределения случайной величины «Вероятность обнаружения мины» металлодетекторов различных производителей

Для установления функции распределения вероятности обнаружения мины перспективным образцом миноискателя необходимо использовать в каждом испытании столько мин, чтобы в ходе испытаний имелась возможность не обнаружить хотя бы одну мину с задаваемой вероятностью пропуска  $P_{пр}$ , равной, например, 0,8. Тогда в рамках этого примера, при нормативном требовании вероятности обнаружения мины  $P_{обн}$ , равной 0,9, в ходе первых двух испытаний на площади поиска испытательной площадки должно быть обеспечено размещение мин в количестве

$$n = \left\lceil \frac{\ln(1 - 0,8)}{\ln(0,9)} \right\rceil = 16 \text{ шт.}$$

Если в ходе испытаний выясняется, что вероятность обнаружения мины перспективным миноискателем превышает нормативное значение, то проводится перерасчет количества устанавливаемых мин на площади поиска, исходя из найденного экспериментально значения вероятности обнаружения мины. Например, найденное в ходе первых двух испытаний экспериментальное значение вероятности обнаружения мины  $P_{обн}$  составляет 0,93, тогда количество

устанавливаемых мин на площади поиска для следующего испытания составит

$$n = \left\lceil \frac{\ln(1 - 0,8)}{\ln(0,93)} \right\rceil = 23 \text{ шт.}$$

В дальнейших испытаниях при необходимости перерасчет количества устанавливаемых мин повторяется.

Число проводимых испытаний ( $M$ , ед.) определяется на основании задаваемых значений предельной ошибки статистического исследования ( $\Delta$ ) и доверительного уровня. В общем случае имеем

$$\Delta = Z \sqrt{\frac{R(1-R)}{M}}, \quad (2)$$

где  $Z$  — квантиль стандартного нормального распределения при заданном доверительном уровне;  $R$  — вероятность корректности, правильности и полноты работы системы «прибор–оператор» [6].

Решая выражение (2) относительно  $M$ , получим

$$M = \left\lceil Z^2 \frac{R(1-R)}{\Delta^2} \right\rceil. \quad (3)$$

Например, принимая при доверительном уровне  $0,9$   $Z = 1,281$ ,  $R = 0,9$  (надежность работы системы «прибор–оператор» высокая) и предельную ошибку статистического исследования  $\Delta = 0,1$  или  $10\%$ , получим  $M$ , равное 15-ти испытаниям.

### **Предложения по методике проведения испытаний миноискателей**

Изложенное позволило впервые предложить следующую методику проведения определительных натурных испытаний перспективных миноискателей и нахождения показателя их эффективности в виде бета-распределения случайной величины «Вероятность обнаружения мины».

1. Объект испытаний: образец испытываемого металлоискателя (металлодетектора).

2. Цель испытаний: проверка вероятности обнаружения объектов поиска.

3. Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения: возможность обнаружения объектов поиска, содержащих в своей компонентной базе металлические элементы, и расчетная вероятность их обнаружения.

4. Материально-техническое обеспечение: примерный тип используемых в испытаниях инженерных боеприпасов: макет мины ПМН, макет мины ПМН-2, макет мины ПМН-4, макет мины TS-50, макет мины ТМ-62ПЗ, инертный взрыватель МВП-62, замыкатель «Гирлянда-1», замыкатель «Гирлянда-2», растяжка из комплекта ОЗМ-72.

5. Условия, режимы, порядок, место проведения, виды испытаний.

5.1. Условия проведения испытаний — испытания проводятся в полевых условиях при реальных метеорологических и климатических условиях на территории с грунтовым лотком, категория грунта «супесь».

5.2. Режимы — оцениваемый образец, представленный на испытания, калибруется (отстраивается) оператором перед началом проведения испытаний на участке грунта, свободного от объектов поиска, комиссией фиксируется уровень чувствительности прибора.

5.3. Порядок проведения проверки и обработки результатов.

А) Минимальное число испытаний  $M$  определяется по формуле (3) путем задания значений доверительного уровня, вероятности корректности, правильности и полноты работы системы «прибор–оператор» и величины ошибки статистического исследования.

Б) Количество устанавливаемых мин на площади поиска грунтового лотка в первых двух испытаниях находится по формуле (1) путем задания значений вероятности пропуска и нормативного требования вероятности обнаружения мины, равного  $0,9$ .

В) Мишенная обстановка на грунтовом лотке формируется в отсутствии оператора миноискателя (моделирование минного поля вслепую для оператора).

Г) Если в ходе первых двух испытаний выясняется, что максимальное значение из полученных значений вероятности обнаружения мины перспективным миноискателем превышает нормативное значение, то проводится перерасчет количества устанавливаемых мин на площади поиска, исходя из максимального значения вероятности обнаружения мины, исключая значение, равное единице. В дальнейших испытаниях при необходимости перерасчет количества устанавливаемых мин повторяется с использованием максимального из полученных значений вероятности, исключая значение, равное единице. Предельное количество устанавливаемых мин определяется размерами площади поиска на грунтовом лотке с учетом разрешающей способности испытываемого образца миноискателя и характерного размера мин. Под разрешающей способностью прибора понимается способность прибора сформировывать для двух рядом расположенных объектов два независимых сигнала обнаружения и отделять по величине параметров сигналы помех от сигналов искомых предметов при поиске, которые могут быть скрыты вблизи помехообразующих объектов.

Установление разрешающей способности испытываемого образца миноискателя должно предшествовать испытаниям по определению вероятности обнаружения мины.

Д) Результаты каждого испытания фиксируются в табличном виде по следующим параметрам: номер испытания  $i$ , число установленных мин ( $N_i$ , шт.), число обнаруженных мин ( $N_{обн\ i}$ , шт.), общее число сигналов о наличии мин



( $C_{\text{общ } i}$ , ед.), время калибровки прибора ( $t_i$ , с), время поиска мин ( $\tau_i$ , с), площадь поиска мин ( $S_i$ , кв. м).

Е) По результатам каждого  $i$ -го испытания определяются:

– вероятность обнаружения мины по формуле

$$P_{\text{обн } i} = N_{\text{обн } i} / N_i; P_{\text{обн } i} = \frac{N_{\text{обн } i}}{N_i};$$

– число ложных срабатываний миноискателя (ед.), под которым понимается регистрация сигнала от миноискателя о наличии мины, при ее фактическом отсутствии, по формуле

$$L_i = C_{\text{общ } i} - N_{\text{обн } i};$$

– селективность прибора (отн. ед.), под которой понимается способность миноискателя не допускать ложного срабатывания, по формуле

$$Q_i = \frac{N_{\text{обн } i}}{(N_i + L_i)};$$

– темп поиска мин ( $\text{м}^2/\text{час}$ ) по формуле

$$T_i = 3600 \frac{S_i}{\tau_i}.$$

Данные обобщаются в табличном виде по следующим показателям: номер испытания ( $i$ ), вероятность обнаружения мины ( $P_{\text{обн } i}$ ), число ложных сигналов ( $L_i$ , ед.), селективность прибора ( $Q_i$ , отн. ед.), темп поиска мин ( $T_i$ ,  $\text{м}^2/\text{час}$ ).

Ж) С использованием обобщенных в табличном виде показателей по пункту Е) для случайной величины, определяющей вероятность обнаружения мины  $P_{\text{обн}}$ , находятся выборочное среднее значение

$$\bar{P}_{\text{обн}} = \frac{\sum_{i=1}^M P_{\text{обн } i}}{M}$$

и выборочная дисперсия

$$S_{P_{\text{обн}}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^M (P_{\text{обн } i} - \bar{P}_{\text{обн}})^2}{M - 1}.$$

С использованием  $\bar{P}_{\text{обн}}$  и  $S_{P_{\text{обн}}}^2$  рассчитываются параметр  $u$  по формуле

$$u = \bar{P}_{\text{обн}} \left[ \frac{\bar{P}_{\text{обн}} (1 - \bar{P}_{\text{обн}})}{S_{P_{\text{обн}}}^2} - 1 \right]$$

и параметр  $v$  по формуле

$$v = (1 - \bar{P}_{\text{обн}}) \left[ \frac{\bar{P}_{\text{обн}} (1 - \bar{P}_{\text{обн}})}{S_{P_{\text{обн}}}^2} - 1 \right]$$

функции бета-распределения случайной величины, определяющей вероятность обнаружения мины,

$$F(P_{\text{обн}}) = \frac{1}{B(u, v)} \int_0^{P_{\text{обн}}} t^{u-1} (1-t)^{v-1} dt,$$

где  $B(u, v) = \int_0^1 t^{u-1} (1-t)^{v-1} dt$  — бета-функция.

С использованием полученной функции бета-распределения случайной величины, определяющей вероятность обнаружения мины, находится значение 20 % квантиля. Если значение 20 % квантиля превышает величину 0,9, то можно утверждать, что с вероятностью 80 % вероятность обнаружения мины будет больше 0,9. На основании этого делается вывод о том, что перспективный миноискатель рекомендуется к дальнейшей разработке в интересах инженерных войск. Например, из данных рис. 2 видно, что функции бета-распределения случайной величины, определяющей вероятность обнаружения мины, для образцов металлодетекторов СТИМ (ООО «ИННОПРОМ»), СВАРОГ (ООО «ПОИСКОВИК-СВАРОГ») и ПКМ (Группа защиты «ЮТТА») пересекают вертикальный отрезок, выходящий из квантиля со значением 0,9. Следовательно, по этим образцам металлодетекторов целесообразно продолжить работу по принятию на снабжение инженерных войск. Пересечение этих же линий с горизонтальным отрезком, соответствующим значению вероятности функции распределения по оси ординат, равному 0,2, позволяет количественно оценить эффективность указанных металлодетекторов в виде вероятности обнаружения мины с заданной величиной достоверности. Так, с вероятностью 80 % можно утверждать, что вероятность обнаружения мины металлодетектором СТИМ будет более 0,93, металлодетектором СВАРОГ — более 0,95, а металлодетектором ПКМ — более 0,98 и, следовательно, из приведенных марок металлодетекторов металлодетектор ПКМ является наиболее перспективным образцом.

Полученные функция бета-распределения случайной величины, определяющей вероятность обнаружения мины, и функции распределения, отражающие эксплуатационные показатели, используются для задания тактико-технических требований к перспективным миноискателям, а также установления нормативов по их применению.

### Заключение

Практическое применение предложенной методики при небольших объемах определенных натурных испытаний обеспечивает выбор для дальнейших разработок тех образцов перспективных миноискателей, которые в 80 % случаев позволяют обнаруживать мины с вероятностью более 0,9 и, следовательно, работы по которым целесообразно продолжить. Это позволяет сократить время на проведение испытаний, а значит и время на их разработку в целом.

### Список источников

1. Инструкция органам военного управления по рассмотрению предложений, поступив-

ших от организаций Российской Федерации в рамках инициативных работ: Утв. приказом Минобороны России от 24 октября 2022 года. № 640.

2. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011. 24 с.

3. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Ковальчук А.М. и др. Оценка эффективности перспективного вооружения и военной техники на основе натурных испытаний // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских. 2022. № 1 (121). С. 42–46.

4. Мартыщенко Л.А., Шатохин Д.В. Методы оперативного статистического анализа результатов выборочного контроля качества промышленной продукции. СПб., Тула: Гриф и К, 2001. 72 с.

5. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001. 295 с.

6. Рудаков И.А. Методика и результаты оценки качества информации современных миноискателей отечественного и иностранного производства; сб. науч. тр. Военно-инженерной академии. Нахабино: 2023. С. 50–63.