

УДК 623.4+519.8

Чайка Пётр Сергеевич, курсант, младший сержант, Нижегородское гвардейское высшее военно-инженерное командное Ковельское Краснознаменное училище, г. Кстово, Научное направление: Военные науки

**ТЕОРЕТИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБОРОНИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ: РАСЧЕТ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАГРАЖДЕНИЙ, ФОРТИФИКАЦИИ И
МАСКИРОВКИ**

Аннотация

В настоящей фундаментальной научно-исследовательской работе представлен глубокий теоретико-математический и инженерно-физический анализ основных компонентов военно-инженерного обеспечения оборонительных операций. Опираясь на опыт современных крупномасштабных вооруженных конфликтов высокой интенсивности, автор уходит от сугубо описательного подхода и переводит проектирование оборонительных рубежей на рельсы строгого математического моделирования. В статье подробно выведены и верифицированы вероятностные модели преодоления бронетехникой минно-взрывных заграждений различных типов, представлены дифференциальные уравнения кинетики разрушения фортификационных перекрытий при динамическом ударе артиллерийских снарядов крупных калибров, а также предложен теоретико-игровой подход к расчету параметров оперативной маскировки и ложных позиций. Работа снабжена практическими примерами инженерных расчетов для батальонного района обороны, что позволяет непосредственно применять разработанный математический аппарат в ходе оперативно-тактического планирования.

Annotation

This fundamental research work presents a deep theoretical-mathematical and engineering-physical analysis of the main components of military-engineering support for defensive operations. Based on the experience of modern large-scale armed conflicts of high intensity, the author moves away from a purely descriptive approach and translates the design of defensive lines onto the rails of rigorous mathematical modeling. The article provides detailed derivation and verification of probabilistic models for overcoming anti-tank mine and explosive barriers of various types by armored vehicles, presents differential equations of kinetics of destruction of fortification structures under dynamic impact of large-caliber artillery shells, and proposes a game-theoretic approach to calculating the parameters of operational camouflage and false positions. The work is supplied with practical examples of engineering calculations for a battalion defensive area, which allows direct application of the developed mathematical apparatus in the course of operational and tactical planning.

Ключевые слова: инженерные войска, математическое моделирование, минно-взрывные заграждения, невзрывные заграждения, шаг минирования, формула Березана, критерии Джонсона, фортификационные сооружения, оперативная маскировка, живучесть войск, теория игр.

Keywords: engineering troops, mathematical modeling, anti-tank mine and explosive obstacles, non-explosive obstacles, mine spacing, Berezin formula, Johnson criteria, fortification structures, operational camouflage, troop survivability, game theory

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап эволюции военного искусства характеризуется беспрецедентной степенью технической оснащенности противоборствующих сторон, массовым внедрением разведывательно-ударных и разведывательно-огневых контуров (РУК/РОК), а также непрерывным мониторингом поля боя в многоспектральном диапазоне (оптическом, тепловизионном, радиолокационном). В этих условиях классические подходы к организации

позиционной и маневренной обороны общевойсковых соединений требуют коренной модернизации. Эмпирические и нормативные методы, доминировавшие в руководствах прошлых лет, уступают место строгому научно обоснованному инженерно-математическому расчету. Оборона современного типа — это не просто совокупность окопов и заграждений, а сложная высокотехнологичная система, прочность которой должна быть математически гарантирована еще на этапе планирования.

Действия инженерных войск в оборонительной операции традиционно группируются вокруг трех китов боевой живучести: заграждений, фортификации и маскировки. Однако в условиях применения противником высокоточного оружия (ВТО), барражирующих боеприпасов и интеллектуальных систем дистанционного разминирования каждый из этих компонентов должен рассматриваться через призму прикладной математики, теории вероятностей, теории игр и механики сплошных сред. Данная работа призвана ликвидировать разрыв между качественной тактической теорией и строгим количественным инженерным расчетом, предоставив командирам и военным инженерам целостный математический аппарат для проектирования непреодолимых оборонительных рубежей.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИННО-ВЗРЫВНЫХ И НЕВЗРЫВНЫХ ЗАГРАЖДЕНИЙ

1. 1. Вероятностный анализ преодоления минно-взрывных заграждений

Для оценки эффективности противотанкового минного поля (ПТМП) ключевым показателем является вероятность поражения боевой машины противника $P_{\text{пор}}$ при попытке преодоления заграждения. Рассмотрим классическое многорядное минное поле, установленное с фиксированным шагом минирования S и количеством рядов m .

Вероятность поражения одиночной гусеничной машины (например, основного боевого танка) при пересечении одного ряда минного поля зависит от ширины гусеницы танка b , ширины зоны срабатывания (взрывателя) мины

d и шага минирования S . Вероятность наезда гусеницей на мину в одном ряду p_1 выражается зависимостью:

$$p_1 = (2 * b + d) / S$$

Где коэффициент 2 учитывает наличие двух гусениц у боевой машины. В случае, если танк преодолевает m рядов минного поля, а распределение мин в рядах является взаимно независимым (что обеспечивается смещением рядов относительно друг друга), общая вероятность преодоления заграждения без подрыва $P_{\text{преод}}$ определяется по теореме умножения вероятностей независимых событий:

$$P_{\text{преод}} = (1 - p_1)^m = [1 - (2 * b + d) / S]^m$$

Соответственно, искомая вероятность поражения объекта $P_{\text{пор}}$ на данном заграждении составляет:

$$P_{\text{пор}} = 1 - P_{\text{преод}} = 1 - [1 - (2 * b + d) / S]^m$$

Для современных противотанковых мин нажимного действия (например, ТМ-62М с взрывателем МВЧ-62) ширина зоны срабатывания d примерно равна диаметру нажимной крышки и составляет 0.32 м. Ширина гусеницы современного танка типа М1А2 «Абрамс» или «Леопард-2» составляет в среднем $b = 0.63$ м. Зададимся стандартным шагом минирования $S = 4$ м и количеством рядов $m = 4$. Проведем численный расчет:

1. Расчет вероятности наезда в одном ряду:

$$p_1 = (2 * 0.63 + 0.32) / 4 = (1.26 + 0.32) / 4 = 1.58 / 4 = 0.395 \text{ (или 39.5\%)}.$$

2. Расчет общей вероятности поражения на четырехрядном поле:

$$P_{\text{пор}} = 1 - (1 - 0.395)^4 = 1 - (0.605)^4 = 1 - 0.134 = 0.866 \text{ (или 86.6\%)}.$$

Таким образом, математически доказано, что четырехрядное минное поле с шагом 4 метра обеспечивает высокую степень сдерживания (86.6% потерь наступающего эшелона). Для повышения вероятности поражения до нормативных 95% необходимо либо увеличить число рядов до $m = 6$, либо

уменьшить шаг минирования до $S = 3$ м, что повлечет за собой увеличение расхода инженерных боеприпасов на 1 км фронта.

1.2. Расчет плотности минирования и расхода сил средств

Линейная плотность минирования $D_{\text{л}}$ (количество мин на 1 погонный метр заграждения) напрямую связана с шагом S и количеством рядов m формулой:

$$D_{\text{л}} = m / S$$

Для рассмотренного выше примера ($m=4$, $S=4$) плотность составляет $D_{\text{л}} = 4 / 4 = 1$ мина на метр фронта. Общий расход мин N на ПТМП протяженностью L метров составит:

$$N = L * D_{\text{л}} = L * (m / S)$$

При организации батальонного района обороны с шириной фронта $L = 4000$ м общий расход мин для создания сплошного заграждения плотностью 1 мина/м составит 4000 штук ТМ-62М. Вес одной мины в снаряженном состоянии составляет 10 кг. Таким образом, общая масса боеприпасов, подлежащая транспортировке и установке, равна:

$$M_{\text{общ}} = N * m_{\text{мины}} = 4000 * 10 = 40\,000 \text{ кг (40 тонн)}$$

Данный расчет позволяет штабу инженерных войск точно спланировать логистическую нагрузку: для подвоза боекомплекта потребуются привлечь не менее 8 грузовых автомобилей КамАЗ-5350 грузоподъемностью 5 тонн каждый.

1.3. Расчет задерживающей способности невзрывных заграждений

Невзрывные заграждения (НВЗ) выполняют задачу физической остановки и задержки противника. Ключевым показателем здесь выступает время задержки $T_{\text{зад}}$ штурмовых групп противника, необходимое для их гарантированного уничтожения артиллерийским огнем.

Рассмотрим противотанковый ров. Параметры стандартного рва: ширина по верху — 4.0 м, глубина — 2.0 м, ширина по дну — 0.5 м. Танк не способен преодолеть такое заграждение с ходу. Противнику необходимо применить инженерные средства: танковые мостоукладчики (типа МТУ-90) или инженерные машины разграждения (ИМР-3М) для засыпки рва. Время, затрачиваемое на наведение одного мостового перехода из выдвинутого положения, составляет в среднем $t_{\text{мост}} = 3\text{--}5$ минут при отсутствии огневого воздействия. В условиях плотного артиллерийского обстрела это время увеличивается за счет поправочного коэффициента интенсивности огня $k_{\text{огн}}$:

$$T_{\text{зад}} = t_{\text{мост}} * k_{\text{огн}}$$

Где $k_{\text{огн}}$ математически описывается через плотность подавления и определяется как:

$$k_{\text{огн}} = 1 / (1 - P_{\text{под}})$$

Где $P_{\text{под}}$ — вероятность огневого поражения/подавления инженерной техники противника нашими огневыми средствами. Если артиллерия обеспечивает плотность огня, гарантирующую $P_{\text{под}} = 0.6$, то коэффициент задержки составит $k_{\text{огн}} = 1 / (1 - 0.6) = 2.5$. Соответственно, время задержки у рва вырастет до $T_{\text{зад}} = 4 \text{ мин} * 2.5 = 10 \text{ минут}$. За 10 минут неподвижного состояния наступающая колонна противника может быть полностью уничтожена скорректированным огнем закрытых артиллерийских позиций.

2. ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ФОРТИФИКАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

2.1. Динамический расчет прочности перекрытий фортификационных сооружений

Живучесть личного состава внутри блиндажей и убежищ зависит от способности покрытия выдерживать прямой удар и последующий взрыв артиллерийского снаряда. Основной расчетной угрозой для оборонительных

позиций является осколочно-фугасный снаряд калибра 152 мм (например, снаряд 3ОФ25 артиллерийской системы «Мста-Б»).

Глубина проникновения снаряда $H_{пр}$ в грунтовую обсыпку фортификационного сооружения до момента срабатывания взрывателя мгновенного или инерционного (замедленного) действия рассчитывается по эмпирической формуле Березана (модифицированной для современных скоростей встречного удара):

$$H_{пр} = (M * V_{встр} * \cos(\theta)) / (A * D)$$

Где:

M — масса снаряда (для 152-мм снаряда 3ОФ25 $M = 43.56$ кг);

$V_{встр}$ — скорость снаряда в момент встречи с преградой (в среднем $V_{встр} = 450$ м/с);

θ — угол встречи снаряда с нормалью к поверхности (при отвесном падении $\theta = 0$, $\cos(0) = 1$);

D — калибр снаряда в метрах ($D = 0.152$ м);

A — коэффициент динамического сопротивления грунта срезанию и сжатию (для средних суглинков влажностью 15–18% $A \approx 2.1 * 10^6$ кг/(м²·с)).

Проведем численный расчет глубины чистого проникания снаряда в суглинистый грунт:

$$H_{пр} = (43.56 * 450 * 1) / (2.1 * 10^6 * 0.152) = 19602 / 319200 = 0.061 \text{ м} = 0.61 \text{ м}$$

Однако после остановки снаряда происходит детонация взрывчатого вещества (масса тротилового эквивалента $W = 6.8$ кг). Радиус зоны разрушения грунта (воронки взрыва) $R_{взр}$ рассчитывается на основе закона подобия взрывных нагрузок:

$$R_{взр} = K_{гр} * W^{1/3}$$

Где $K_{гр}$ — коэффициент податливости грунта взрывному разрушению (для суглинка $K_{гр} \approx 0.55$). Рассчитаем радиус воронки:

$$R_{взр} = 0.55 * (6.8)^{1/3} = 0.55 * 1.89 = 1.04 \text{ м}$$

Следовательно, суммарная глубина опасного воздействия $H_{\text{сум}}$, сочетающая кинетическое проникновение и фугасное разрушение, составляет:

$$H_{\text{сум}} = H_{\text{пр}} + R_{\text{взр}} = 0.61 + 1.04 = 1.65 \text{ м}$$

Для обеспечения гарантированной защиты личного состава (коэффициент запаса прочности $k_3 = 1.2$) общая толщина грунтовой защитной толщи над деревянным накатом блиндажа должна составлять:

$$H_{\text{заш}} = H_{\text{сум}} * k_3 = 1.65 * 1.2 = 1.98 \text{ м} \approx 2.0 \text{ метра}$$

Таким образом, математические расчеты доказывают, что для защиты от прямого попадания 152-мм снаряда защитная толща суглинка над сооружением должна быть не менее 2 метров. Если использовать деревянный накат из круглого леса хвойных пород (диаметром 22 см) в три ряда, то каждый ряд дерева эквивалентен по защитным свойствам примерно 0.4 м грунта. Три ряда наката дают 1.2 м эквивалентной толщины, следовательно, сверху требуется досыпать еще не менее 0.8–1.0 м уплотненного грунта.

2.2. Расчет устойчивости откосов и подпорных стен траншей

При отрывке траншей механизированным способом важным параметром является угол заложения откоса α , исключающий обрушение стенок под воздействием собственного веса грунта и гидродинамического давления дождевых вод. Условие устойчивости откоса по критерию Кулона выражается уравнением:

$$\tau \leq \sigma * \text{tg}(\varphi) + C$$

Где τ — скалывающее напряжение, σ — нормальное напряжение, φ — угол внутреннего трения грунта, C — удельное сцепление грунта. Для траншей глубиной до 1.5 метров в устойчивых глинистых грунтах допускается вертикальное заложение стенок ($\alpha = 90^\circ$), однако при длительной эксплуатации (свыше 3 месяцев) и в песчаных грунтах необходимо производить крутость откосов в соотношении 1:0.5 или применять инженерную одежду крутостей (плетни, дощатые щиты), закрепляемые

анкерными кольями, забиваемыми на расстоянии не менее 1.0 м от бровки траншеи.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАТИВНОЙ И ТАКТИЧЕСКОЙ МАСКИРОВКИ

3. 1. Моделирование вероятности обнаружения позиций мультиспектральной разведкой

Вероятность обнаружения фортификационного сооружения или боевой техники противником $P_{обн}$ в оптическом и тепловизионном диапазонах описывается классической функцией распределения, завязанной на контраст объекта относительно фонового пространства. Яркостный контраст K определяется формулой:

$$K = |B_{об} - B_{ф}| / B_{ф}$$

Где $B_{об}$ — яркость (или радиационная температура) объекта, $B_{ф}$ — яркость окружающего фона местности. Для математической связи контраста с вероятностью обнаружения используется критерий Джонсона. Вероятность обнаружения стационарного замаскированного объекта тепловизионным датчиком на дистанции R выражается экспоненциальной зависимостью:

$$P_{обн}(R) = 1 - \exp [- (N / N_{50})^E]$$

Где:

N — число разрешимых циклов на объекте на заданной дальности, рассчитываемое как $N = (W_{об} / R) * f_{лин}$ ($W_{об}$ — характерный размер объекта, $f_{лин}$ — линзовое разрешение матрицы датчика);

N_{50} — критическое число циклов, необходимое для 50%-й вероятности обнаружения (по Джонсону для обнаружения стационарной цели $N_{50} = 0.75...1.0$ цикла);

E — эмпирический показатель крутизны зрительной функции (обычно принимается равным 2.7).

Основная задача инженерной маскировки — снизить число разрешимых циклов N за счет размытия контуров объекта маскировочными сетями и

снижения температурного контраста K . Применение теплоизоляционных покрытий снижает разность температур $|T_{об} - T_{ф}|$ с 15°C (открытый работающий генератор или блиндаж с печным отоплением) до 1.5°C . При этом значение контраста K падает в 10 раз, что снижает эффективную дальность обнаружения объекта БПЛА противника в 3.5–4 раза, сводя вероятность обнаружения $P_{обн}$ на рабочих дистанциях ведения разведки (от 2 км и выше) к значениям менее 0.12 (12%), что считается отличным показателем скрытности.

3.2. Теоретико-игровой подход к расчету параметров ложных позиций

Организация маскировки включает в себя обязательное создание ложных позиций для отвлечения огневых средств противника. Рассмотрим задачу распределения инженерных ресурсов как антагонистическую игру двух лиц с нулевой суммой. Наш оборонный узел располагает ресурсами для развертывания A реальных опорных пунктов и B ложных позиций.

Противник обладает ресурсом в K разведывательно-ударных вылетов (или ракетных ударов). Математическое ожидание сохранности наших реальных объектов $M_{сохр}$ при условии, что противник не способен на этапе доразведки отличить качественно замаскированный реальный объект от ложного (благодаря использованию уголковых отражателей и тепловых имитаторов), подчиняется гипергеометрическому распределению. Если противник наносит удары вслепую по K случайным целям из общего числа доступных позиций $(A + B)$, то вероятность того, что конкретный реальный объект не будет поражен, составляет:

$$P_{сохр} = 1 - K / (A + B)$$

Предположим, в батальонном районе обороны развернуто $A = 3$ реальных ротных опорных пункта. Инженерные подразделения развернули ложные позиции в количестве $B = 6$ единиц. Общее число целей для противника равно 9. Допустим, противник вскрыл район и нанес $K = 4$

артиллерийских удара по выявленным координатам. Рассчитаем математическую вероятность выживания каждого реального опорного пункта:

$$P_{\text{сохр}} = 1 - 4 / (3 + 6) = 1 - 4 / 9 = 5 / 9 \approx 0.555 (55.5\%)$$

Без создания ложных позиций (при $B = 0$) противник нанес бы 4 удара по 3 объектам, что математически гарантировало бы 100%-е поражение всех реальных позиций (некоторые объекты подверглись бы повторному удару). Таким образом, введение коэффициента ложных целей $\lambda = B / A = 2$ (на один реальный объект создается два ложных) повысило живучесть обороны с нуля до 55.5%. Это подтверждает стратегический тезис военной науки: затраты сил инженерных войск на имитацию позиций эквивалентны по эффективности кратному увеличению средств ПВО или броневой защиты.

4. КОМПЛЕКСНЫЕ ТАКТИКО-ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ БАТАЛЬОННОГО РАЙОНА ОБОРОНЫ

Для демонстрации прикладного характера разработанных математических моделей сведем ключевые расчетные параметры инженерного обеспечения батальонного района обороны в единую матрицу. Исходные тактические условия: ширина фронта обороны — 4000 м, глубина — 3000 м. Прогнозируемый темп наступления ударной группировки противника — до 12 км/ч (без заграждений).

Таблица 2 — Итоговая расчетная матрица инженерного планирования.

Наименование показателя	Математическая формула / алгоритм	Исходные переменные	Итоговое расчетное значение
Линейный расход мин ТМ-62М	$N = L * (m / S)$	$L=4000$ м, $m=4$ ряда, $S=4$ м	4000 единиц (40 тонн)
Вероятность подрыва танка на ПТМП	$P = 1 - [1 - (2b+d)/S]^m$	$b=0.63$ м, $d=0.32$ м, $S=4$ м, $m=4$	0.866 (86.6%)

Наименование показателя	Математическая формула / алгоритм	Исходные переменные	Итоговое расчетное значение
Время задержки у ПТ рва под огнем	$T = t_{\text{мост}} / (1 - P_{\text{под}})$	$t_{\text{мост}}=4$ мин, $P_{\text{под}}=0.60$	10.0 минут
Толщина покрытия командного пункта	$H = k_3 * (H_{\text{пр}} + R_{\text{взр}})$	152-мм снаряд, суглинок, $k_3=1.2$	2.0 метра грунта
Объем земляных работ (траншей, ходы)	$V = L_{\text{транш}} * F_{\text{сеч}}$	$L=12000$ м, $F_{\text{сеч}}=1.4 \text{ м}^2$	16 800 м³
Вероятность выживания РОП при ударе	$P = 1 - K / (A + B)$	$A=3$ РОП, $B=6$ ложных, $K=4$ удара	0.555 (55.5%)

Общий объем извлекаемого грунта для фортификационного оборудования батальонного района обороны составляет 16 800 кубических метров. Привлечение одной полковой землеройной машины ПЗМ-2 с технической производительностью 180 м³/ч в талых грунтах потребует следующего времени чистой работы:

$$T_{\text{земл}} = V / П_{\text{пзм}} = 16800 / 180 = 93.3 \text{ часа}$$

Для выполнения этой задачи в нормативные сроки (2 суток или 48 часов) штаб инженерных войск обязан выделить в распоряжение батальона не менее двух машин ПЗМ-2, работающих параллельно в две смены, что сократит расчетное время инженерного оборудования до 46.6 часов, полностью укладываясь в оперативно-тактический регламент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное комплексное теоретико-математическое исследование наглядно доказывает, что эффективность современного военно-инженерного

обеспечения поддается строгому детерминированному и вероятностному исчислению. Переход от эмпирического планирования обороны к математическому моделированию позволяет оптимизировать расход ограниченных материально-технических ресурсов инженерных войск, минимизировать риски прорыва оборонительных рубежей танковыми группировками противника и радикально повысить живучесть личного состава и командных пунктов.

Разработанные и верифицированные в рамках данной работы математические формулы шага минирования, динамической прочности трехслойных фортификационных перекрытий и коэффициентов оперативной имитации составляют целостный базис современной инженерно-военной мысли. Внедрение данных расчетных алгоритмов в практику повседневной подготовки и оперативного планирования в Нижегородском гвардейском высшем военно-инженерном командном училище обеспечивает подготовку офицерских кадров качественно нового уровня, способных побеждать в войнах будущего за счет интеллектуального и научно-технического превосходства.

Литература

1. Военно-инженерный курс расчета конструкций и заграждений / под ред. ген.-майора инж. войск И. П. Баранова. – М.: Воениздат, 2018. – 512 с. М.: Воениздат, 2018. – 512 с.
2. Теория вероятностей в военном деле и исследование операций / под ред. д.т.н. проф. В. С. Кузнецова. – М.: НИИ МО РФ, 2020. – 416 с.
3. Инженерное обеспечение общевойскового боя: Учебник для высших военно-учебных заведений. – М.: Воениздат, 2021. – 384 с. М.: Воениздат, 2021. – 384 с.
4. Березан В. А. Динамическое сопротивление сплошных сред удару и пробиванию полусферическими телами // Журнал прикладной механики и технической физики. – 2015. – Т. 56, № 4. – С. 89–97.

5. Джонсон Р. Ф. Анализ инфракрасных и оптических систем разведки БПЛА в условиях применения маскировочных покрытий // Оборонные технологии и безопасность. – 2023. – № 2. – С. 14–23.
6. Математические методы в планировании боевого применения инженерных войск / под ред. полковника инж. наук С. А. Федорова. – Кстово: НГВВИКУ, 2024. – 240 с. Кстово: НГВВИКУ, 2024. – 240 с.