

Разработка метода повышения эффективности артиллерийской стрельбы на основе марковской модели

В. А. Болтенков, А. И. Брунеткин, Е. В. Добрынин, О. Б. Максимова,
В. В. Кузьменко, П. С. Гульцов, В. Э. Демиденко, О. В. Соловьева

Розроблено метод підвищення ефективності стрільби артилерійського підрозділу. У разі сучасного застосування артилерії для контрбатареїної боротьби ефективність стрільби недостатньо оцінювати лише точністю. Необхідно також враховувати та мінімізувати час перебування підрозділу на вогневій позиції та витрату снарядів на поразку цілі.

Показано, що для оцінки ефективності артилерійського пострілу через початкову швидкість снаряда найбільш швидкодіючим і простим засобом є класифікація якості пострілу за акустичним полем. Удосконалено методику класифікації пострілу шляхом застосування автоматичного класифікатора з навчанням на основі машини опорних векторів з найменшими квадратами. Встановлено, що похибка класифікації ефективності пострілу другого роду не перевищує 0,05. Введено поняття ефективності одиночного артилерійського пострілу. В умовах інтенсивної стрільби в кожному пострілі можуть бути випадкові збурення за рахунок зносу зарядної камери гармати, її ствола і за рахунок неповної інформації про порохований заряд. В умовах стрільби зі збуреннями стрільба артилерійського підрозділу може бути описана моделлю марківського дискретного ланцюга. На основі марківської моделі розроблено метод підвищення ефективності артилерійської стрільби. Метод заснований на виділенні гармат, які роблять неефективні постріли. Запроваджено етап управління вогнем підрозділу. У процесі управління вогнем підрозділи такі гармати виключаються із подальшої стрільби. Введено узагальнений критерій ефективності артилерійської стрільби підрозділу, що ґрунтується на згортанні критеріїв. Показано, що розроблений метод суттєво підвищує ефективність стрільби за узагальненим критерієм.

Ключові слова: артилерійський підрозділ, ефективність стрільби, акустичне поле пострілу, марківська модель, узагальнений критерій ефективності.

1. Введение

Опыт применения артиллерии в военных конфликтах XXI века показывает, что ствольная артиллерия продолжает играть одну из основных ролей в ходе военных действий. При этом основной объем задач по огневому поражению противника возлагается на артиллерию больших калибров (более 120 мм) [1]. В этом аспекте большое внимание уделяется повышению эффективности артиллерийской стрельбы. Поскольку эффективность есть понятие комплексное, существуют разные подходы к определению эффективности применения артиллерийского оружия. Так, в [2] эта эффективность рассматривается как взвешен-

ная свертка тактико-технических показателей артиллерийского орудия. Эффективность как максимальная вероятность поражения цели рассматривается в [3], в дальнейшем эта концепция развивается в [4]. В то же время сейчас интенсивно обсуждается необходимость применения артиллерией большого калибра тактики «shoot and scoot» (кратковременный огонь с быстрым поражением цели, дословный перевод – отстрелялся и убежал) [5]. Тактика «shoot and scoot» связана с интенсивным развитием в вооруженных силах высокотехнологичных государств точных средств технической разведки артиллерии. В соответствии с концепцией контрбатареинной борьбы в случае обнаружения и оценивания координат позиции стреляющего артиллерийского подразделения (АП) противник в кратчайшие сроки открывает ответный огонь на поражение этой позиции [6]. Так, согласно [7], безопасное время пребывания артиллерийской батареи на позиции после первого выстрела составляет (5...12) минут. Поскольку с первого выстрела обычно начинается пристрелка цели, за указанное время должна быть закончена корректировка огня и выполнена стрельба на поражение. Поэтому в качестве первого критерия эффективности применения артиллерии следует принять минимизацию времени пребывания орудий на боевой позиции, что определяет сохранение жизне- и боеспособности АП. С другой стороны, за минимальное время подразделение должно выполнить задачу по точному поражению цели. Поэтому вторым критерием эффективности артиллерии является точность поражения цели. Третьим критерием должен являться расход снарядов, израсходованных на поражение цели. Он должен быть минимальным. Формирование аналогичного критерия было предложено в [8], где проводился анализ зависимости работоспособности оборудования от случайных факторов.

Разработка методов повышения эффективности стрельбы с учетом трех сформулированных критериев является задачей, решение которой позволяет вывести управление огнем на принципиально новый уровень. Такие методы сводят к минимуму время запаздывания получения информации о качестве выстрела, необходимой для формирования последующего управляющего воздействия. По сути, устраняется существующая информационная обратная связь, основанная на корректировке огня по результатам предыдущих выстрелов, на которой основана действующая концепция управления артиллерийским огнем. В практическом плане решение этой задачи повысит мобильность и живучесть артиллерийских подразделений. С другой стороны, решение данной научной задачи повышения эффективности даст возможность выполнения огневой задачи с существенной экономией боеприпасов.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Классическая концепция обеспечения эффективности артиллерийской стрельбы путем повышения точности основана на информационной обратной связи между последовательными выстрелами из орудия. Она приведена в работе [9]. Согласно этой концепции, после каждого выстрела (или серии выстрелов) производится коррекция начальных установок стрельбы следующего выстрела по результатам предыдущего с учетом допущенной при выстреле ошибки выстрела. Ошибка оценивается как разность координат цели и разрыва сна-

ряда. Обычно ошибка оценивается в метрике L_2 [10]. Информация об ошибке выстрела используется на огневой позиции для корректировки начальных установок следующего $(i+1)$ -го выстрела. При этом процедуры информационной обратной связи согласно [9] делятся на две категории – «выстрелил – посмотрел – выстрелил» (для наблюдаемых с огневой позиции целей) (shoot-look-shoot, SLS) или «выстрелил – скорректировал – выстрелил» (shoot-adjust-shoot, SAS). Последняя процедура применяется для скрытых огневых позиций. В обоих случаях для корректировки требуется оценка координат разрыва снаряда при выстреле. Это требует применения средств артиллерийской разведки в режиме обслуживания своей стрельбы, что существенно усложняет и удлиняет процедуру. Эти средства определяют координаты разрыва снаряда в точке его приземления путем наблюдения и регистрации физических полей разрыва [10].

Традиционным и наиболее простым средством этой группы является наблюдение разрывов с помощью оптических приборов [11]. Оптоэлектронные средства наблюдения [12] позволяют регистрировать разрывы в любое время суток и в сложных метеорологических условиях с более высокой точностью, чем оптические средства [12]. При огне по визуально ненаблюдаемым целям применяются воздушные средства разведки [13] или беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [14]. К средствам регистрации разрывов снарядов по создаваемым ими акустическим полям относится также звуковая разведка артиллерии [15]. При этом звукометрические комплексы используются в режиме «Обслуживание стрельбы своей артиллерией» [16]. К очевидным недостаткам средств корректировки выстрела, указанным в [10–16], относится необходимость привлечения для поражения цели дополнительных дорогостоящих боевых и технических ресурсов. Главным же недостатком указанных средств является возможность оценки координат разрыва снаряда и формирования корректуры в установки орудия только после приземления снаряда. При этом полетное время снаряда при стрельбе на максимальных дальностях может составлять 60 с и более. Меньших затрат времени на корректировку огня требуют артиллерийские радиолокационные станции (АРЛС) [17]. АРЛС регистрируют только часть – несколько точек полетной траектории снаряда [18]. Далее по нескольким точкам производится интерполяция всей траектории с вычислением координат точки выстрела (разведка артиллерии противника) и/или точки приземления снаряда (обслуживание своей стрельбы) [19]. Однако современные АРЛС представляют собой сложные технические комплексы, оснащенные фазированными антенными решетками. Их применение в условиях перемещающейся по огневым позициям батареи для осуществления коррекции огня нецелесообразно. Кроме того, АРЛС являются активными (излучающими) системами, с этой точки зрения они являются демаскирующими себя целями для огня противника.

Более оперативны устройства измерения главного баллистического параметра выстрела – начальной скорости снаряда при выходе его из дульного среза ствола артиллерийские баллистические станции (АБС) [20]. АБС позволяют оценить траекторию и вычислить координаты точки приземления за время 30–40 с [21]. Недостатками АБС является достаточно высокая стоимость и демаскирующее свойство, поскольку АБС являются излучающими активными систе-

мами. Вариантом преодоления описанных проблем могут быть средства оценки начальной скорости снаряда по акустическим полям выстрела [22]. Эти средства основаны на регистрации баллистической волны (БВ) и дульной волны (ДВ), возникающих при выстреле [23]. По анализу тонкой структуры сигналов БВ и ДВ, регистрируемых микрофонами, расположенными на расстоянии (30–100) м, располагаемых непосредственно на огневой позиции [24] можно провести пороговую классификацию эффективности выстрела по начальной скорости снаряда. Акустические методы просты, не требуют дорогостоящего оборудования. Это делает их весьма перспективными для оценки координат приземления снарядов. Поскольку до сих пор эти методы применялись для оценки уровня износа стволов, применение их для корректировки огня требует дополнительных исследований. Применение акустических методов фактически позволяет исключить процесс информационной обратной связи для коррекции выстрела, исключить время на ожидание пролета снаряда по траектории и процедуры SLS или SAS. При таком подходе практически полностью исключается процесс пристрелки. Тем самым существенно сокращается время пребывания АП на огневой позиции и увеличивается вероятность поражения цели.

При стрельбе каждого отдельного орудия могут возникать случайные ошибки, неповторяющиеся для всех выстрелов орудия. Эти ошибки (индивидуальные случайные возмущения выстрела) имеют три причины [25]. Первой причиной является удлинение зарядной камеры орудия [26]. В условиях интенсивной огневой деятельности инструментальный контроль как износа зарядной камеры, так и износа ствола, может быть затруднен по тактико-техническим причинам. Из-за износа ствола возникает второе случайное возмущение выстрела – уменьшение начальной скорости снаряда Δv_0 за счет износа ствола орудия. Третьим возмущающим фактором является неполная информация о состоянии и параметрах заряда. В практике артиллерийской стрельбы при дефиците зарядов или превышенном сроке их хранения возможно ведение стрельбы зарядами с недостоверными данными об их качестве и энергии. Неполной информацией о состоянии и параметрах заряда вызывается третье случайное возмущение – изменение начальной скорости снаряда за счет неопределенности энергии заряда [27]. Случайные возмущения трех видов влияют на выстрел одинаковым образом – случайно изменяя начальную скорость заряда. Разделить их не представляется возможным и целесообразно рассматривать суммарное индивидуальное для данного орудия отклонение начальной скорости снаряда от табличной для данного выстрела. Способы учета указанных случайных возмущений и их коррекции для повышения точности стрельбы в литературе не обнаружены. Тем не менее, перспективными для учета случайных возмущений выстрелов представляются именно акустические методы оценки ошибок стрельбы [22–24].

Анализ литературных данных [5–7, 9, 10, 25] показал, что основные направления исследований повышения эффективности стрельбы построены на принципе информационной обратной связи. Принцип основан на оценке координат разрыва снаряда с последующей коррекцией установок стрельбы (пристрелкой). Известные средства оценки ошибок стрельбы [11–16] связаны с

большими затратами времени и являются дорогостоящими. Остались нерешенными вопросы, связанные с учетом и компенсацией случайных возмущений выстрела. Вопросы стрельбы без обратной связи с сокращением времени стрельбы не исследованы вообще, как и вопросы сокращения расхода снарядов на поражение цели. Это позволяет утверждать следующее. Целесообразно проведение исследования, посвященного повышению эффективности стрельбы путем устранения информационной обратной связи за счет оценки начальной скорости снаряда оперативными и простыми средствами. Необходимо исследовать пути устранения случайных возмущений, которые могут присутствовать в выстреле. Для количественной оценки эффективности стрельбы целесообразно сформировать обобщенный критерий эффективности. Такой критерий должен учитывать не только точность стрельбы, но и время пребывания артиллерийского подразделения на позиции и расход снарядов на поражение цели.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование возможностей повышения эффективности стрельбы артиллерийского подразделения с управлением стрельбой при наличии случайных возмущений выстрелов. Результаты исследования дадут возможность повысить точность стрельбы, уменьшить минимальное время пребывания АП на огневой позиции и минимизировать расход снарядов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- разработать усовершенствованную методику классификации эффективности одиночного выстрела из орудия на базе бинарной классификации эффективности выстрела по параметрам создаваемого им акустического поля;
- построить марковскую модель эффективности последовательной стрельбы артиллерийского подразделения с управлением стрельбой при наличии в выстрелах случайных возмущений;
- разработать метод управления стрельбой артиллерийского подразделения повышенной эффективности, в основу которого положена марковская модель;
- сформировать обобщенный количественный критерий оценки эффективности стрельбы артиллерийского подразделения при наличии случайных возмущений выстрелов.

4. Материалы и методы исследования

Объектом исследования является процесс управления огнем артиллерийского подразделения с учетом случайных возмущений, присутствующих в выстрелах отдельных орудий.

В основу исследования положена следующая рабочая гипотеза. Главным количественным параметром, определяющим эффективность артиллерийского выстрела, является начальная скорость снаряда при выходе его из дульного среза ствола. Если начальная скорость снаряда не ниже табличной, выстрел является эффективным.

При решении поставленной задачи были приняты следующие упрощения. Считается, что все систематические ошибки стрельбы АП, связанные с топологическими особенностями огневой позиции и месторасположения цели и ме-

теоретическими условиями вдоль траектории полета снарядов, учтены и скорректированы на этапе подготовки стрельбы. При исследовании рассматривается только управление случайными возмущениями, которые могут присутствовать в каждом выстреле отдельного орудия.

Для определения эффективности артиллерийского выстрела необходимо оценить начальную скорость снаряда у дульного среза орудия. Наиболее пригоден для этого метод анализа акустического поля, создаваемого выстрелом. Этот метод пассивный, требует минимального оборудования (два измерительных микрофона). Метод хорошо зарекомендовал себя при оценке начальной скорости снарядов для определения уровня износа стволов [24]. При этом использовался алгоритм бинарной классификации на основе машины опорных векторов (Support Vector Machines, SVM). Однако для качественной классификации требуется предварительное обучение классификатора на достаточно больших выборках. Также в задаче оценки качества выстрела непосредственно на огневой позиции за кратчайшее время необходимо максимизировать время классификации. Кроме того, в исследованиях, проведенных ранее, единственным показателем качества классификации была достоверность классификации. Желательно оценить и другие показатели классификации, в частности, долю ошибочных решений качества выстрела по параметрам акустического поля на базе классификатора машиной опорных векторов с наименьшими квадратами (Least Squares Support Vector Machines, LSSVM) [28, 29]. Этот метод требует меньшей обучающей выборки и имеет более высокое быстродействие. Для оценки качества классификации методами имитационного эксперимента была оценена целая система показателей качества распознавания, основанная на концепции логики бинарной классификации. При этом материалом для имитационного моделирования служил набор реальных записей акустических полей, зарегистрированных при стрельбе гаубицы М109 [30].

При оценке эффективности стрельбы артиллерийского подразделения применяются методы оценки вероятностных ошибок стрельбы. Внесение корректив в установки орудий производится с обратной связью, то есть для коррекции следующего выстрела необходимо знать результат предыдущего. Такой принцип обратной связи увеличивает время стрельбы. Кроме того, существующая процедура пристрелки не позволяет устранить случайные возмущения, присутствующие в выстрелах отдельных орудий. Для устранения указанных недостатков был применен аппарат марковских цепей [31, 32]. Описание стрельбы АП последовательными состояниями марковской цепи позволило разработать метод управления стрельбой АП при наличии случайных возмущений в выстрелах отдельных орудий для достижения максимальной эффективности стрельбы.

Задачей исследования является выбор и максимизация целевой функции эффективности стрельбы, построенной на основании частных критериев точности стрельбы, минимального времени стрельбы и минимального расхода боекомплекта. Для формирования обобщенного критерия качества были применены методы формирования многокритериальной свертки, применяемые в современной теории принятия решений [33, 34].

5. Результаты исследования метода управления стрельбой повышенной эффективности

5.1. Методика классификации эффективности одиночного выстрела из орудия

Для определения понятия эффективности одиночного выстрела была выдвинута следующая гипотеза. Если начальная скорость снаряда составляет не менее 0,95 от табличного значения ($v_0 \geq 0,95 v_{\text{fire_table}}$), то при условии компенсации всех остальных ошибок на стадии подготовки стрельбы снаряд попадает в круговую окрестность цели. Радиус срединной круговой ошибки при дальности стрельбы D составляет $CEP_D \approx 1 \% D$ с вероятностью $p \geq 0,5$. Для проверки рабочей гипотезы был поставлен имитационный эксперимент. В процессе эксперимента моделировались последовательные выстрелы из 155-мм гаубицы М109 (снаряд М107, заряд максимальный – 5 модулей DM72) 5-ю сериями по 100 выстрелов в каждой. Начальная скорость каждого выстрела выбиралась случайным образом в диапазоне $v_{0i} \in [\text{rand}(0,95...1)] \cdot v_{\text{fire_table}}$, $i = \overline{1,100}$ (*rand* – стандартный оператор генерации псевдослучайного числа с равномерным распределением). Имитировались 5 серий по 100 выстрелов в каждой. Каждая серия соответствовала дальности стрельбы $D=1000$ м; 3000 м; 5000 м; 9000 м; 12000 м соответственно. Для каждого выстрела рассчитывалась траектория снаряда при стрельбе по цели с координатами (x_0, y_0) точка приземления (x_i, y_i) , $i = \overline{1,100}$. Расчет производился по полетной модели с пятью степенями свободы, построенной на основании стандарта НАТО STANAG 4106 [34]. Для моделирования использовался код программы для системы MATLAB® R2017a, разработанный в North-West University (ЮАР) и приведенный в [35]. Для каждого выстрела оценивался факт попадания/непопадания точки приземления снаряда в круг радиусом $R=1 \% D$ и число попаданий. Для каждой серии рассчитывались среднеквадратичные отклонения (СКО) σ_x, σ_y в направлении стрельбы и перпендикулярном направлении. Переход от СКО к срединной круговой ошибке осуществлялся по соотношениям [36]

$$CEP = \begin{cases} 0.615\sigma_x + 0.562\sigma_y, & \sigma_x < \sigma_y, \\ 1.177\sigma_x & \sigma_x, \sigma_y, \\ 0.615\sigma_x + 0.562\sigma_y, & \sigma_x > \sigma_y. \end{cases} \quad (1)$$

Результаты имитационного эксперимента приведены в табл. 1. Во второй строке табл. 1 приведена оценка вероятности попадания снарядов в круг радиуса R для каждой серии выстрелов \hat{p} .

Таблица 1
Результаты имитационного эксперимента

D , м	1000	3000	5000	9000	12000
\hat{p}	0.78	0.73	0.69	0.71	0.68
СЕР, м	9.23	24.8	43.6	85.4	112.7

Данные табл. 1 подтверждают рабочую гипотезу. На основании результатов имитационного эксперимента введены два определения. Эффективным будем называть выстрел, при котором начальная скорость снаряда v_0 составляет не менее 0,95 от табличной: $0,95v_{\text{table_fire}} < v_0 < v_0$. Неэффективным будем называть выстрел, начальная скорость которого составляет менее 0,95 от табличной: $v_0 < 0,95v_{\text{table_fire}}$. То есть далее эффективным считается выстрел, при котором снаряд попадает в круг радиуса $R=1\% D$ с вероятностью не менее 0,5. Это выполняется если начальная скорость снаряда меньше табличной не более, чем на 5%. Остальные выстрелы считаются неэффективными.

Для построения методики оценки эффективности выстрела применим анализ его акустического поля. Акустическое поле, образующееся при артиллерийском выстреле, формируется двумя принципиально различными видами волн. При вылете снаряда из ствола со сверхзвуковой скоростью образуется баллистическая (ударная) волна (БВ). Центр этой волны совпадает с носиком летящего по траектории снаряда. Баллистическая волна распространяется вместе с летящим по траектории снарядом. Она может быть зарегистрирована микрофоном, находящимся внутри конуса Маха, образуемого снарядом при полете [37]. Баллистическая волна имеет N-образную форму. Длительность ее 3–6 мс, амплитуда звукового давления составляет 90–120 Па. С точки зрения спектрального анализа БВ представляет собой широкополосный звуковой сигнал с шириной спектра 10–700 Гц. Дульная волна (ДВ) распространяется от среза ствола орудия со скоростью звука. ДВ представляет собой затухающее синусоидальное колебание длительностью 1,5–3 периода. Центральная частота спектра ДВ лежит в диапазоне 10–30 Гц, ширина спектра составляет около 40 Гц. Амплитуда звукового давления дульной волны лежит в диапазоне 150–350 Па на расстоянии 50–100 м от дульного среза орудия. При этом амплитуда ДВ сильно флуктуирует в зависимости от метеоусловий в точке ее регистрации микрофоном. Установлено, что выстрел из ствола с начальной скоростью, меньшей табличной, по генерируемому акустическому полю эквивалентен выстрелу из орудия меньшего калибра [22, 23]. Практически это означает, что длительности импульсных акустических сигналов БВ и ДВ при неэффективном выстреле меньше, чем при эффективном, следовательно, спектры их шире. Этот эффект дает возможность построить автоматизированный классификатор эффективности выстрела, основанный на наборе временных и спектральных признаков сигналов БВ и ДВ. В основу построения классификатора положены положительные результаты работ [22–24]. Для построения классификатора были образованы 2 класса объектов – класс 1 – «неэффективный выстрел» и класс 2 – «эффективный выстрел». В класс 1 отнесены выстрелы из стволов, для которых начальная скорость снаряда $v_0 < 0,95v_{\text{table_fire}}$, где $v_{\text{table_fire}}$ – табличное значение начальной скорости снаряда при выстреле с полным отсутствием случайных возмущений. В класс 2 отнесены стволы с начальной скоростью снаряда $v_0 \geq 0,95v_{\text{table_fire}}$. Для построения классификатора было проведено компьютерное моделирование. Целью моделирования было формирование репрезентативной выборки записей акустических сигналов от эффективных и неэффективных выстрелов. Для формирования выборки, как и в [22], были использованы реальные записи акустических сигналов, зарегистри-

рованных при стрельбе гаубицы M109A3GN [30]. Сигналы были зарегистрированы при стрельбе широкополосными измерительными микрофонами на расстояниях 20 м и 250 м от огневой позиции. Начальная табличная скорость снаряда – $v_0=684$ м/с. Для имитации неэффективных выстрелов из стволов с износом выделенные на записях участки, содержащие сигналы БВ (длительностью 10 мс) и ДВ (длительностью 150 мс), с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) переводились в спектральную область. В спектральной области спектры БВ и ДВ сдвигались в сторону высоких частот на величину $\eta_{\text{SHIFT}}=\text{rand}[0,95;1]$, где rand – программно реализованный оператор равномерного случайного выбора числа из заданного интервала. Далее «деформированные» таким образом сигналы БВ и ДВ с помощью обратного дискретного преобразования Фурье переводились назад во временную область. Всего таким образом было сформировано 150 записей сигналов БВ и ДВ, имитирующих выстрелы 1 и 2 класса. Выборка имитационных сигналов содержит примерно поровну сигналов 1 и 2 класса. Следующим этапом имитационного эксперимента было формирование векторов информационных признаков. Для каждой записи, содержащей сигналы БВ и ДВ, вычислены амплитудные, временные, спектральные и кумулянтные характеристики БВ и ДВ. Подробно признаки описаны в [22]. Поскольку все признаки имеют различную физическую природу и различный диапазон значений, они нормировались по минимаксному методу нормализации с приведением к интервалу (0; 1) [38]. Далее нормализованные величины признаков собирались последовательно в вектор \mathbf{AS} размерности $\dim(\mathbf{AS})=14$. Каждая из компонент векторов \mathbf{AS}_i представляет собой численную характеристику акустического поля, создаваемого эффективным или неэффективным выстрелом. Следует отметить, что векторы признаков выстрелов сопоставимы только при стрельбе из орудий одинакового типа, с одинаковым зарядом и одинаковыми снарядами. Следующим этапом построения автоматического классификатора был выбор типа классификатора. В работах [22, 24] результате анализа различных типов классификаторов износа стволов использовался бинарный SVM-классификатор [39]. Для оценки эффективности выстрела был выбран более эффективный, чем примененный в [22, 24] метод машин опорных векторов (Support Vector Machines, SVM) – метод машин опорных векторов с наименьшими квадратами (Least Squares Support Vector Machines, LSSVM) [40]. LSSVM – это переформулированный классический метод SVM, который приводит к решению линейных систем и сводится к решению задачи линейного программирования. Классический метод SVM реализует решение задачи квадратичного программирования. В результате метод LSSVM практически на порядок сокращает расчетное время при тех же показателях качества классификации. Кроме того, применение LSSVM-метода позволяет в 2–4 раза сократить объем обучающей выборки [41]. Кроме того, для метода существует отлаженный и верифицированный тулбокс системы Matlab [42]. Классификатор обучался на выборке размером 50 признаковых векторов $\mathbf{AS}_{\text{LEARN}}$, выбранных случайным образом из сгенерированной выборки. Далее на вход обученного и настроенного по гиперпараметрам классификатора LSSVM подавалась тестовая выборка $\mathbf{AS}_{\text{TEST}}$ размером 50 векторов. Его элементы также выбирались случайным образом из общей выборки \mathbf{AS} . В этом случае было поставлено условие –

элементы обучающей и тестовой выборок не должны пересекаться. Сформированная случайным образом тестовая выборка включала 28 признаковых векторов неэффективных выстрелов и 22 признаковых вектора эффективных выстрелов.

До сих пор количественно качество классификации выстрелов по начальной скорости снаряда оценивалось одним количественным показателем – достоверностью, представляющей собой отношение правильно классифицированных объектов к общему числу объектов. Эта оценка является недостаточно полной. Поэтому для классификации выстрелов по эффективности были построены и рассчитаны различные показатели качества классификации, приведенные в [43]. Логика классификации представлена в табл. 3. В столбцах 2, 3 табл. 3 представлены истинные классы, к которым относится выстрел. В строках табл. 3 представлены решения классификатора, показывающие, к какому из двух классов классификатор относит выстрел. В клетках таблицы на пересечении соответствующих строк и столбцов приведено количество истинных или ложных решений классификатора. Поскольку основной задачей классификации является выявление выстрелов с начальной скоростью ниже табличной (неэффективных выстрелов), состояние «Выстрел действительно неэффективен» принимается за истинно положительное состояние. Тогда противоположное состояние – «Выстрел действительно эффективен» является истинно отрицательным. Решения классификатора могут быть такими: «Выстрел неэффективен» – это истинно положительное решение, а результат классификации: «Выстрел неэффективен» – это истинно отрицательное решение. Смысл ошибочно положительных и ошибочно отрицательных решений понятен из табл. 2. Соответствующие клетки табл. 2 показывают количественные результаты классификации исследуемой выборки.

Таблица 2
Логика результатов классификации

Состояния выстрела	Истинно положительное состояние	Истинно отрицательное состояние
Решения классификатора	«Выстрел действительно неэффективен»	«Выстрел действительно эффективен»
Классифицированный класс: «Выстрел неэффективен»	True Positives (TP) 26	False Negatives (FN) 1
Классифицированный класс: «Выстрел эффективен»	False Positives (FP) 2	True Negatives (TN) 21

В табл. 3 приведены количественные метрики качества классификации по тестовой выборке объемом $\dim(\mathbf{AS}_{TEST})=50$ выстрелов.

Близость мер интегральной оценки ACC , TNR , Pre , TPR и F к единице свидетельствует о высоком качестве классификации. Особо следует отметить низкое значение частоты ложноположительных оценок FP или ошибок второго рода. Их значение показывает, сколько неэффективных выстрелов классифицируются как эффективные. Величина этого значения 0,04 свидетельствует о том,

что в процессе эксплуатации разработанный бинарный классификатор ошибочно признает эффективными лишь 4 % неэффективных выстрелов.

Таблица 3

Таблица метрик качества классификации

Метрика	Формула	Интерпретация
Accuracy	$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} = 0,94$	Достоверность. Оценивает общее отношение корректно классифицированных объектов к общему числу объектов
Error Rate	$Err = 1 - ACC = 0,06$	Отношение некорректно классифицированных объектов к общему числу объектов
Специфичность (Specificity, True Negative Rate)	$TNR = \frac{TN}{TN + FP} = 21 / (21 + 2) = 0,93$	Специфичность оценивает долю эффективных выстрелов, классифицированных корректно
Точность (Precision)	$Pre = \frac{TP}{TP + FP} = 26 / (26 + 2) = 0,92$	Точность оценивает долю неэффективных выстрелов, классифицированных корректно
False Positive Rate (fall-out, false alarm rate)	$FPR = \frac{FP}{TN + FP} = 1 - TPR = 0,04$	Доля неэффективных выстрелов, которые ошибочно классифицированы как эффективные
Полнота (Sensitivity, True Positive Rate, Recall)	$TPR = \frac{TP}{TP + FN} = 26 / (26 + 1) = 0,96$	Полнота показывает, какая часть неэффективных стволов классифицирована как неэффективные
F-мера	$F = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} = 52 / (52 + 3) = 0,95$	Среднее гармоническое между точностью и полнотой (общее качество классификации)

5. 2. Марковская модель стрельбы артиллерийского подразделения со случайными возмущениями выстрелов отдельных орудий

Пусть АП из n орудий совершает серию одиночных выстрелов из каждого орудия. Интервал между выстрелами из орудий Δt считаем постоянным и определяемым темпом стрельбы. Представим последовательные состояния АП простой однородной цепью Маркова с $(n+1)$ состоянием, граф которой изображен на рис. 1. Предположение о марковском характере процесса вполне обоснован-

но. Эффективность последующего выстрела из орудия определяется только состоянием элементов орудия (зарядной камеры и ствола), в которые орудие пришло в результате предыдущего выстрела. Кроме того, эффективность определяется состоянием приготовленного заряда. Состояния марковской цепи следующие. Начальное состояние S_0 – АП из n орудий готово к стрельбе последовательными выстрелами из каждого орудия. Состояние S_1 – одно из n орудий АП совершает выстрел. В каждом выстреле может присутствовать одно или несколько из перечисленных выше случайных возмущений – изменение начальной скорости снаряда Δv_0 за счет износа зарядной камеры $\Delta v_0^{\lambda_chamb}$, за счет износа заряда ствола орудия Δv_0^{barrel} и за счет неопределенности энергии заряда – Δv_0^{charge} . Перечисленные возмущения в выстреле могут проявляться как отдельно, так и в различных сочетаниях. Худшим вариантом неэффективного выстрела является наличие в нем всех трех видов возмущений – $\Delta v_0^{\Sigma} = \Delta v_0^{\lambda_chamb} + \Delta v_0^{barrel} + \Delta v_0^{charge}$. Вероятности отсутствия возмущений (эффективного выстрела) заданы и равны: $p_1 = p(\Delta v_0^{\lambda_chamb})$, $p_2 = p(\Delta v_0^{barrel})$ и $p_3 = p(\Delta v_0^{charge})$. Вероятности возникновения в одиночном выстреле из орудия возмущений трех перечисленных видов – это вероятности противоположных событий: $q_1 = p(\Delta v_0^{\lambda_chamb})$, $q_2 = p(\Delta v_0^{barrel})$ и $q_3 = p(\Delta v_0^{charge})$. Следующее состояние АП S_2 – произведен выстрел из 2-го орудия АП, который также может содержать или не содержать возмущения. Таким образом, последовательно задаются последующие состояния АП S_i ($i = \overline{1, n}$) для всей серии из n выстрелов.

Марковская матрица переходных вероятностей выглядит следующим образом:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & \dots & p_{0j} & \dots & p_{0n} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1j} & \dots & p_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & & p_{ij} & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nj} & \dots & p_{nn} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где p_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$) – вероятности перехода марковской цепи из состояния S_i в состояние S_j . Марковский граф, соответствующий матрице (2) представлен на рис. 1.

Марковская матрица заполняется по следующему правилу. Марковская модель построена с целью определения количества эффективных и неэффективных выстрелов. Поэтому каждое состояние её будет оцениваться вероятностью проявления числа эффективных выстрелов из n совершенных выстрелов. В силу стохастичности марковской матрицы для состояния S_1 выполняется условие: $p_{10} + p_{11} = 1$. Вероятность осуществления эффективного выстрела (без возмущений) $p = p_{11}$ определяется вероятностями p_1, p_2, p_3 или вероятностями их всевозможных одновременных сочетаний. Тогда $p_{10} = 1 - p_{11}$. Остальные вероят-

ности строки S_1 будут нулевыми. Для остальных строк переходные вероятности p_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$) рассчитываются для состояния S_m по формуле Бернулли (то есть, как вероятность осуществления точно i эффективных и $(m-i)$ неэффективных выстрелов в серии из m последовательных одиночных выстрелов орудий АП):

$$p_{ij} = C_m^{m-i} p^i q^{m-i}, \quad (3)$$

где C_m^k – число сочетаний из m по k ,

p – вероятность осуществления эффективного выстрела,

q – вероятность осуществления неэффективного выстрела, определяемая вероятностями q_1, q_2, q_3 или вероятностями их всевозможных одновременных сочетаний. Таким образом, в строке состояния S_m матрицы \mathbf{P} , начиная со столбца с номером $i=m+2$ переходные вероятности $p_{ij}=0$. Условие стохастичности матрицы выполняется. Возврат к состояниям с номерами $i < j$, т. е. из состояний с меньшим числом эффективных выстрелов к состояниям с их большим числом эффективных возможен не всегда. Возврат возможен только из состояний, в которые орудия АП пришли за счет неопределенности энергии заряда. В течение двух и более последовательных выстрелов отдельные орудия могут оказаться в состояниях неэффективного выстрела. Такое состояние может произойти за счет износа зарядной камеры или за счет износа ствола орудия (событий, происходящих с вероятностями $q_1 = p(\Delta v_0^{\lambda-chamb})$ и $q_2 = p(\Delta v_0^{barrel})$). В таком случае это проявление не случайного возмущения. Этот факт свидетельствует о необратимых изменениях в элементах орудия. Дальнейшая стрельба из него без соответствующего технического обслуживания будет неэффективной.

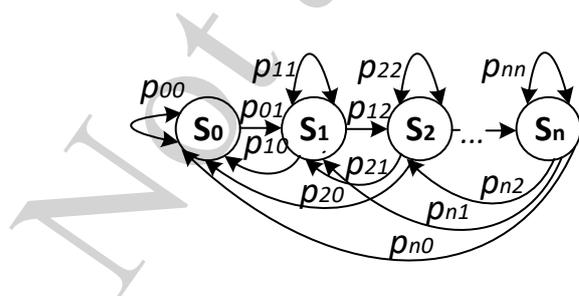


Рис. 1. Марковский граф состояний и переходных вероятностей

Марковская модель (5) дает возможность оценить вероятность проявления числа эффективных выстрелов после M циклов стрельбы АП:

$$\mathbf{P}_M = \mathbf{P}_0^M, \quad (4)$$

где P_0 – матрица переходных вероятностей после первого цикла стрельбы.

Для каждого состояния возможна оценка числа эффективных выстрелов в общем числе произведенных выстрелов путем расчета математического ожидания. Умножением вектора состояния sv_i , который равен

$$sv_i = \left[sv_j = 1, j = i; sv_j = 0, j \neq i; j = \overline{1, n} \right]^T, \quad (5)$$

на \mathbf{P}_M получаем состояние выстрелов АП после M циклов повторения стрельбы.

Построим описанную марковскую модель для конкретных значений параметров. Пусть артиллерийское подразделение состоит из $n=6$ орудий. Принятые вероятности осуществления эффективного выстрела равны соответственно: $p_1=0,95$ – вероятность выстрела с отсутствием возмущения в виде износа зарядной каморы; $p_2=0,95$ – вероятность выстрела с отсутствием возмущения в виде износа ствола; $p_3=0,9$ – вероятность выстрела с отсутствием возмущения в виде неопределенности заряда. Соответствующие вероятности неэффективных выстрелов с наличием соответствующих возмущений равны $q_i = 1 - p_i, i = \overline{1, 3}$. В наихудшей ситуации при выстреле каждого орудия присутствуют все три вида возмущений. Тогда вероятность эффективного выстрела $p_{123}=p_1p_2p_3=0,81225$. Вероятность неэффективного выстрела с тремя видами случайных возмущений равна $q_{123}=1-p_{123}=0,18775$.

Матрица переходных вероятностей, построенная по правилу (3), приведена в табл. 4.

Таблица 4

Матрица переходных вероятностей

Состояния	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
S_0	1	0	0	0	0	0	0
S_1	0,18775	0,81225	0	0	0	0	0
S_2	0,03525	0,305	0,65975	0	0	0	0
S_3	0,00661	0,08589	0,37160	0,53588	0	0	0
S_4	0,00124	0,02150	0,13953	0,40244	0,43527	0	0
S_5	0,00023	0,0054	0,04366	0,18889	0,40861	0,35354	0
S_6	4,38E-05	0,00113	0,01229	0,07093	0,23014	0,39827	0,28717

На рис. 2 приведены зависимости вероятности эффективного выстрела при стрельбе АП из n орудий от числа последовательных циклов стрельбы.

Марковский процесс смены состояний эффективности выстрелов носит дискретный характер. Графики, приведенные на рис. 2, являются лишь качественной визуализацией, демонстрирующей, что при наличии в выстрелах трех видов случайных возмущений вероятность эффективного выстрела резко падает с увеличением числа последовательных выстрелов.

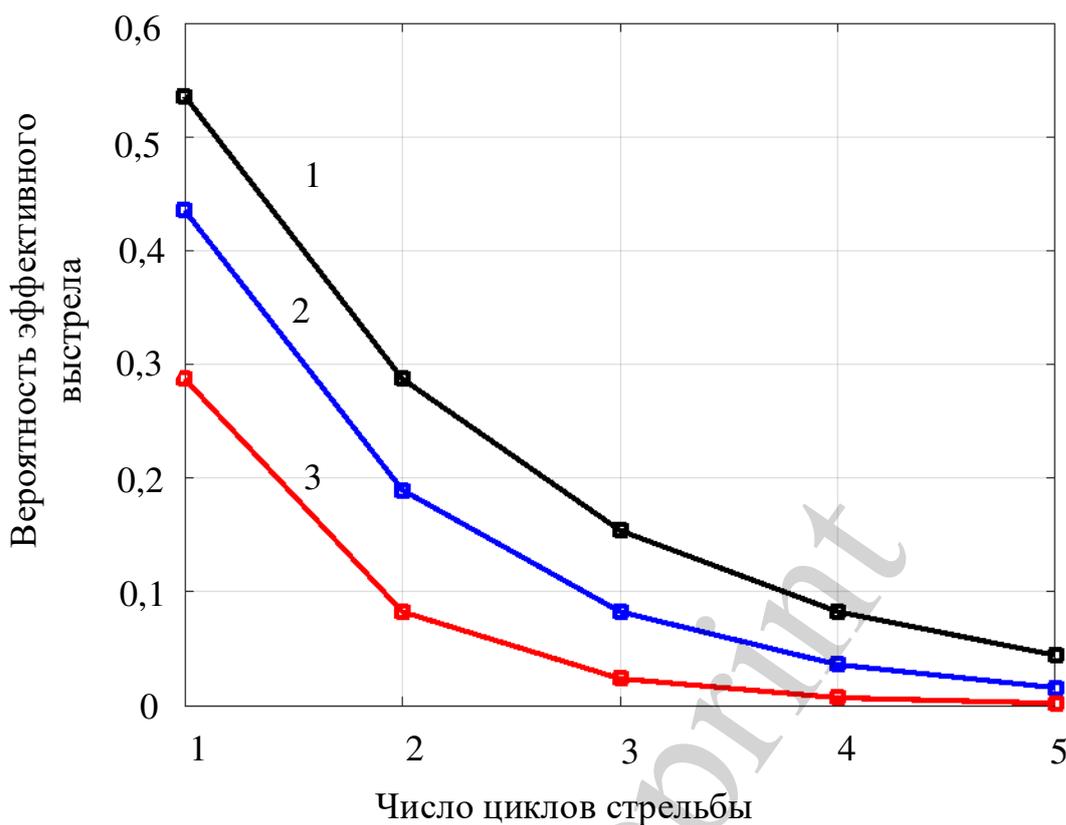


Рис. 2. Зависимость вероятности эффективного выстрела от числа последовательных циклов стрельбы: 1 – $n=3$; 2 – $n=4$; 3 – $n=6$

5. 3. Метод управления стрельбой артиллерийского подразделения повышенной эффективности

На основании сформулированной модели предлагается следующий метод управления стрельбой АП с учетом случайных возмущений. Случайные возмущения по причинам износа зарядной камеры и ствола и неопределенности информации о состоянии заряда могут присутствовать в каждом выстреле каждого орудия АП. Задача поражения цели огнем АП формулируется следующим образом. Заданы координаты одиночной неподвижной цели. Стрельба производится сериями одновременных выстрелов по n выстрелов ($n \leq m$, m – число орудий в АП). Цель считается пораженной, если произведено n_{eff} эффективных выстрелов по цели. В соответствии с введенным ранее определением не менее n_{eff} выстрелов должны с вероятностью не менее 0,5 иметь попадание в круг заданного радиуса с центром в точке расположения цели. При этом должны выполняться следующие дополнительные частные критерии эффективности. Время огня АП от момента первого выстрела до поражения цели $time_{fire}$ не должно превышать предельно возможного времени безопасного пребывания АП на огневой позиции. Общий расход снарядов АП на поражения цели не должен превышать n_{shoot}^{total} .

Этап 1. Предварительная подготовка.

В основу предварительной подготовки положена сформулированная выше методика классификации эффективности выстрела в соответствии с начальной

скоростью снаряда по акустическому полю выстрела. В основе методики лежит применение бинарного LSSVM классификатора, требующего предварительного обучения. Поэтому на данном этапе по предыдущим стрельбам из каждого орудия с номером i строятся $L \cdot m$ обучающих выборок для каждого j -го из L типов зарядов, применяемого при стрельбе из данного орудия $\mathbf{AS}_{LEARN}^{i,j}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, L}$. На этапе формирования обучающих выборок желательно применение для подтверждения достоверности классификации артиллерийской баллистической станции. Однако это требование не обязательно, поскольку выше показано, что вероятность ошибки классификации 2-го рода FPR (вероятность классификации неэффективного выстрела как эффективного) не превышает 0,04. $L \cdot m$ обучающих выборок вместе с программой LSSVM-классификации заносятся в полевой компьютер классификатора.

Этап 2. Предварительная подготовка стрельбы на огневой позиции.

После занятия огневой позиции подразделением у каждого орудия на расстоянии 30 м и 100 м от дульного среза орудия устанавливаются измерительные микрофоны для классификации выстрелов и подключаются к полевому компьютеру классификатора. Вводятся начальные установки стрельбы каждого орудия. Далее осуществляется введение всех возможных поправок в начальные установки орудия: баллистических поправок, метеорологических поправок, топографических поправок. Таким образом, остаются неучтенными только возможные случайные возмущения. Затем строится марковская модель стрельбы АП, в частности матрица переходных вероятностей \mathbf{P} (2). Рассчитывается матрица состояний \mathbf{P}_M после M циклов стрельбы (3). Задается минимальное значение вероятности числа эффективных выстрелов после M циклов стрельбы p_M^{\min} .

Этап 3. Начальная стрельба без управления огнем.

Открывается огонь на поражение цели в соответствии с введенными установками полным составом АП из m орудий последовательными циклами. Для каждого орудия каждый выстрел оценивается классификатором как эффективный или неэффективный. После каждого цикла стрельбы подсчитывается общее число произведенных выстрелов N_0 , а также число эффективных N_0^{eff} и неэффективных $N_0^{non-eff}$ выстрелов по данным классификатора. Очевидно, что $N_0 = N_0^{eff} + N_0^{non-eff}$. После каждого цикла стрельбы оценивается математическое ожидание числа эффективных выстрелов по марковской модели как $N_0^{eff*} = N_0 p_M$. Выполнение условия $|N_0^{eff} - N_0^{eff*}| / N_0^{eff} < 0,05$ является одновременным подтверждением правильности работы классификатора и справедливости марковской модели (4). Окончание начальной стрельбы без управления огнем определяется выполнением условия

$$N_0^{non-eff*} = N_0(1 - p_M^{\min}) > 0,2n_{shoot}^{total}. \quad (6)$$

Условие (6) означает, что более 20 % ресурса снарядов АП потрачено на неэффективные выстрелы. По этому условию осуществляется переход к стрельбе с управлением огнем.

Этап 4. Стрельба с управлением огнем.

На данном этапе стрельба на поражение цели осуществляется только орудиями АП, из которых эффективный выстрел наиболее вероятен. В частности, орудия, в которых неэффективный выстрел наблюдался более 3-х раз подряд, имеют неустранимый в полевых условиях дефект – износ зарядной камеры или износ ствола. Это приводит к уменьшению начальной скорости снаряда при выстреле до значения ниже $0,95v_{fire_table}$. Вероятность же осуществления неэффективного выстрела более 3-х раз подряд из исправного орудия пренебрежимо мала. Этап 4 продолжается до выполнения условия $N_0^{eff} \geq n_{eff}$. Выполнение этого условия означает, что задача поражения цели выполнена.

Для верификации предложенного метода был поставлен имитационный эксперимент. Имитировалась следующая условная боевая задача. Заданы координаты цели, расположенной на расстоянии $D=12000$ м. АП состоит из $m=6$ орудий. Радиус эффективного выстрела при расчете $CEP R=0,01D=120$ м. Число эффективных выстрелов для поражения цели $n_{eff}=40$. Ресурс выстрелов $n_{shoot}^{total} = 75$.

Имитировались два метода стрельбы. Первый метод – метод стрельбы с пристрелкой (МСП) тремя выстрелами из основного орудия АП. Корректировки ошибки пристрелки переносятся на все орудия АП. Оценка координат разрывов в процессе пристрелки производится подразделением артиллерийской разведки. Второй метод – метод стрельбы с управлением (МСУ), предлагаемый в данной статье. Следует отметить, что в [44, 45] удачно был применен метод управления неэффективным оборудованием в результате его перегруппировки. Там же был приведен метод сопоставления эффективности управления для различных случаев. Поэтому для имитации рассматриваемых в данной статье методов в составе артиллерийского подразделения были определены 2 орудия с дефектами: одно с превышенным износом зарядной камеры, второе орудие с износом ствола. Все выстрелы из этих орудий в обоих экспериментах моделировались как неэффективные, с начальной скоростью $0,85v_{fire_table}$. Моделирование неэффективных выстрелов из-за неполной информации о состоянии заряда производилось путем имитации каждого десятого выстрела со значением начальной скорости $0,8v_{fire_table}$, при этом номер орудия с таким выстрелом выбирался случайно с номером орудия $i=rand[1, 2, 4, 6]$. При этом орудия с дефектами (с номерами $i=3,5$) из случайного выбора исключались. Для оценки CEP , как и ранее, для обоих методов выстрелы моделировались как стрельба из 155-мм гаубицы М109 с применением программы расчета полетной траектории [35].

Результаты расчета приведены в табл.5.

Для оценки бюджета времени на выполнение огневой задачи проведены следующие расчеты. Для стрельбы гаубиц калибра более 122 мм темп стрельбы составляет 5 выстрелов в минуту [46]. Для стрельбы по МСП на 69 выстрелов шестью орудиями подряд расходуется $\Delta t_1^1 = 2,3$ минуты. Поскольку стрельба орудий не синхронизирована, увеличим это время на 50 %. Время стрельбы со-

ставит $\Delta t_1^{1*} = 3,45$ минуты. Время на каждый пристрелочный выстрел состоит из полетного времени (по таблицам стрельбы для гаубицы М109 – 32 с) и времени распространения звукового сигнала разрыва от точки разрыва до звукоприемников станции звуковой разведки, равное $\Delta t_{\text{SOUND_RANGE}} = 12000 \text{ м} / 340 \text{ м/с} = 35 \text{ с}$. Для трех выстрелов это время составит примерно $\Delta t_{\text{SOUND_RANG}}^* = 2$ минуты. Время на введение начальных установок и корректур стрельбы примем равным $\Delta t_{\text{CORR}}^1 = 5$ минутам. Общий бюджет времени при стрельбе по методу 1 составляет примерно $T_0^1 = \Delta t_1^{1*} + \Delta t_{\text{SOUND_RANG}}^* + \Delta t_{\text{CORR}}^1 \approx 11$ минут.

Таблица 5
Сравнение результатов стрельбы двумя методами

Моделируемый метод	$CEP, \text{ м}$	Число неэффективных выстрелов	Число эффективных выстрелов	Общее число выстрелов
МСП	116	29	40	69
МСУ	103	11	40	51

Для метода МСУ на 51 выстрел с учетом несинхронности стрельбы орудий будет потрачено примерно $\Delta t_1^{2*} = 3$ минуты. Дополнительные затраты времени примем равными $\Delta t_{\text{ADD}}^2 = 2$ минутам на переход от Этапа 3 к Этапу 4 (исключение из дальнейшей стрельбы дефектных орудий). Общий бюджет времени при стрельбе по методу 2 составляет $T_0^2 = \Delta t_1^{2*} + \Delta t_{\text{ADD}}^2 = 5$ минут.

5. 4. Обобщенный критерий эффективности стрельбы артиллерийского подразделения

В качестве обобщенного критерия эффективности стрельбы АП предлагается свертка следующих частных критериев. Все частные критерии нормированы соответствующим образом.

Частный критерий точности стрельбы:

$$Crit_{\text{accuracy}} = \frac{CEP_{\text{fire}}}{CEP_D}, \quad (7)$$

где CEP_{fire} – срединная круговая ошибка стрельбы,

CEP_D – срединная круговая ошибка стрельбы для дальности D .

Согласно [46] для артиллерии калибром более 122 мм $CEP_D \approx 1 \% D$. Из практики стрельбы известно, что значение данного критерия не может быть менее 0,75 [36].

Частный критерий времени выполнения задачи:

$$Crit_{time} = \frac{time_{fire}}{time_{fire}^{limit}}, \quad (8)$$

где $time_{fire}$ – время огня АП для поражения цели,
 $time_{fire}^{limit}$ – предельное время огня на данной позиции.

В реальных условиях считается, что время огневой деятельности должно составлять 0,6–0,7 от общего времени пребывания на огневой позиции [5, 9].

Частный критерий эффективности расхода снарядов

$$Crit_{project} = \frac{n_{shoot}^{non_eff}}{n_{shoot}^{total}}, \quad (9)$$

где $n_{shoot}^{non_eff}$ – число неэффективных выстрелов,

n_{shoot}^{total} – общее количество произведенных выстрелов.

Практически значение этого критерия часто превышает 0,3, то есть почти треть выстрелов являются неэффективными [9].

На рис. 3 приведены перечисленные частные критерии, рассчитанные по данным имитационного эксперимента (табл. 5).

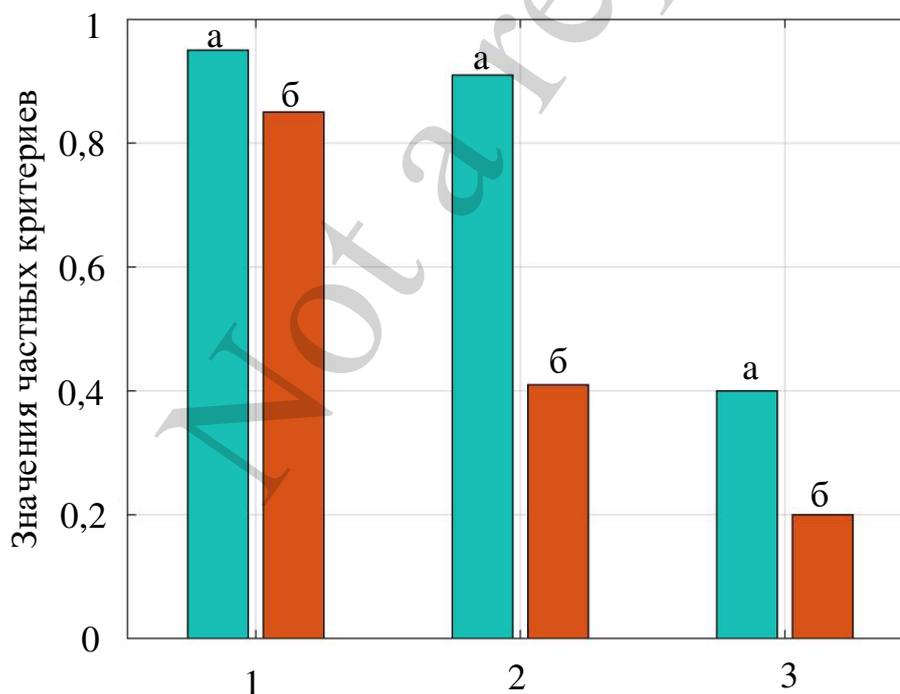


Рис. 3. Частные критерии эффективности для метода стрельбы с пристрелкой и метода стрельбы с управлением: *a* – метод стрельбы с пристрелкой; *b* – метод стрельбы с управлением; 1 – $Crit_{accuracy}$, 2 – $Crit_{time}$, 3 – $Crit_{project}$.

Сформируем общий критерий эффективности стрельбы АП $Crit_{fire}^{effect}$, как свертку указанных частных критериев [32, 33]. Наиболее популярными методами оценки эффективности по ряду критериев n аддитивная и мультипликативная свертки. Аддитивная свертка представляет собой операцию:

$$Crit_0^{add} = \sum_{i=1}^n c_i Crit_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

где c_i – весовые коэффициенты частных критериев, $Crit_i$ – частные критерии.

Мультипликативная свертка:

$$Crit_0^{mult} = \prod_{i=1}^n c_i Crit_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Обе указанные свертки имеют существенные недостатки. Во-первых, в них действует принцип «тихой компенсации» – недостаточный показатель качества по одному из частных критериев в процессе формирования свертки компенсируется уменьшением/увеличением показателями качества по другим частным критериям. Второй недостаток – необходимость оценки весовых коэффициентов частных критериев, т. е. относительной их важности. Поэтому для формирования обобщенного критерия эффективности выбрана свертка с расстоянием от идеальной точки по норме L_2 :

$$Crit_0^{ideal_point} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(Crit_i - Crit_i^{ideal_point} \right)^2}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

где $Crit_i^{ideal_point}$ – значения частных критериев в так называемой идеальной точке – фиктивной точке в n -мерном пространстве, в которой значения частных критериев достигают экстремума (в данном случае минимума). В выражении (12) значения расстояния частных критериев от идеальной точки могут быть взвешены соответствующими весовыми коэффициентами. Однако выбор весовых коэффициентов, определяющих значимость соответствующих частных критериев, в значительной мере субъективен. Кроме того, он может определяться конкретной тактической ситуацией (например, ограниченным ресурсом снарядов, в этом случае частный критерий (9) является наиболее значимым). Поэтому в рассматриваемой условной боевой задаче частные критерии приняты равно значимыми. Частные критерии, выбранные для оценки показателей эффективности стрельбы в данном случае, минимизировались:

$$Crit_{CEP}^{accuracy} \rightarrow \min, \quad Crit_{time_fire}^{time} \rightarrow \min, \quad Crit_{n_{shoot}^{non_eff}}^{project} \rightarrow \min. \quad (13)$$

Однако по определению эффективность есть степень достижения системой своего целевого показателя. С этой точки зрения обобщенный критерий эффективности стрельбы логически должен быть максимизирован. Поэтому в качестве обобщенного критерия эффективности стрельбы выбрана величина, обратная свертке $Crit_0^{ideal_point}$:

$$Crit_{gen_eff} = 1 / Crit_0^{ideal_point}. \quad (14)$$

Для расчета обобщенного критерия была выбрана идеальная точка с координатами $Crit_i^{ideal_point} = (0,75; 0,5; 0,2)$. Принятые для идеальной точки значения частных критериев означают следующее. В идеальной точке значение средней круговой ошибки стрельбы CEP_{fire} составляет 0,75 от расчетного значения. Время огневой деятельности в идеальной точке составляет 0,5 общего времени пребывания на огневой позиции. Число неэффективных выстрелов по отношению к общему расходу снарядов составляет 0,2. Значения частных критериев, меньшие указанных, не могут быть реализованы практически. Соответствующие значения критериев для первого и второго методов равны $Crit_{gen_eff}^1 = 1,42$ и $Crit_{gen_eff}^2 = 7,24$ соответственно. Для наглядности обобщенные критерии для обоих методов представлены на рис. 4.

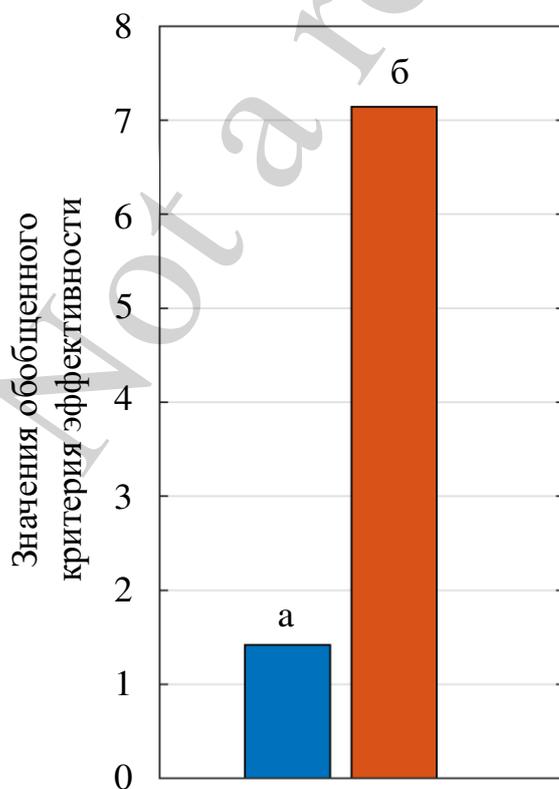


Рис. 4. Обобщенный критерий эффективности $Crit_{gen_eff}$: а – метод стрельбы с пристрелкой; б – метод стрельбы с управлением

Рис. 4 наглядно демонстрирует, что применение МУС позволяет повысить значение обобщенный критерия эффективности практически в 5 раз по сравнению со стрельбой по МСП.

6. Обсуждение результатов исследования путей повышения эффективности стрельбы артиллерийского подразделения

Для решения задачи разработки путей повышения эффективности стрельбы АП было введено понятие эффективного выстрела. С помощью имитационного моделирования полетной траектории снаряда гаубицы М109 баллистической моделью с пятью степенями свободы на 5 сериях по 100 выстрелов в каждой подтверждено следующее. При выстреле с начальной скоростью снаряда, отклоняющейся от табличной в меньшую сторону не более, чем на 5 % от табличного значения, при условии компенсации всех остальных ошибок стрельбы снаряд попадает в круговую окрестность цели. Радиус круговой ошибки $R=0,01D$ при этом с вероятностью более 0,5 (табл. 1). Такой выстрел называется эффективным. Для классификации выстрелов на эффективные и неэффективные была разработана усовершенствованная методика. Методика основана на бинарной классификации выстрела по параметрам баллистической и дульной волны, образующихся при выстреле. Для классификации применен усовершенствованный LSSVM классификатор. Быстродействие классификатора на полевом компьютере средней производительности (MacOS Catalina v10.15.5, CPU: Intel Core i7 2.2 GHz, RAM: 16Gb) не превышает 15 с. На основании логики бинарных решений определены характеристики качества классификации выстрела в классы эффективный/неэффективный. Установлено, что общее качество классификации по F -мере составляет 0,95 (табл. 2). Особо следует отметить, что показатель FPR (ошибка классификации 2-го рода или доля неэффективных выстрелов, которые ошибочно классифицированы как эффективные) равен 0,04 (табл. 2).

Ограничением разработанной методики является необходимость предварительного обучения классификатора для каждого орудия АП при стрельбе на всех типах применяемых зарядов.

При стрельбе АП в каждом выстреле отдельного орудия могут присутствовать случайные возмущения. Возмущения возникают за счет износа зарядной камеры $\Delta v_0^{\lambda_chamb}$, износа ствола Δv_0^{barrel} и неопределенности информации о примененном заряде Δv_0^{charge} . Разработанная марковская модель состояния стрельбы АП позволяет оценить вероятность осуществления эффективных выстрелов со случайными возмущениями после n серий стрельбы. На рис. 3 показано, что эта вероятность резко убывает при наличии в каждом выстреле отдельных орудий случайных возмущений. Однако следует иметь в виду, что вероятность наличия всех трех видов возмущений в каждом выстреле весьма мала.

На основании марковской модели стрельбы АП разработан метод управления стрельбой повышенной эффективности. Метод позволяет на второй стадии стрельбы выявить орудия, имеющие износ зарядной камеры или износ ствола. Такие орудия как неэффективные исключаются из дальнейшей стрельбы. Раз-

работанный метод позволяет фактически исключить процедуру обратной связи «ошибка предыдущего выстрела → установки следующего выстрела». Это существенно сокращает время выполнения огневой задачи. Кроме того, метод позволяет в значительной степени уменьшить влияние случайных возмущений на точность стрельбы (табл. 5). Ограниченностью разработанного метода является необходимость достаточно правильной оценки вероятностей отсутствия/наличия случайных возмущений. Для условной боевой задачи рассчитаны частные критерии эффективности для стрельбы с пристрелкой и для стрельбы с управлением огнём по предложенному методу (рис. 3). Продемонстрирован существенный эффект, получаемый при стрельбе с управлением. Сформирован обобщенный критерий эффективности (14), представляющий собой многокритериальную свертку по методу идеальной точки. Отметим, что свертка по методу идеальной точки достаточно субъективна за счет выбора координат идеальной точки. Однако применение аддитивной и мультипликативной свертки в данной задаче невозможно, поскольку для них «недобор» показателя по одному частному критерию может компенсироваться превышением по другому частному критерию.

В процессе дальнейших исследований планируется разделить случайные возмущения, присутствующие в выстреле методами глубокого обучения. Также возможно устранение субъективизма в формировании обобщенного критерия эффективности стрельбы путем введения нормированных весов частных критериев эффективности. Такие исследования позволят устранить ограничения предложенного метода.

7. Выводы

1. Разработана усовершенствованная методика классификации эффективности одиночного выстрела из орудия на базе бинарной классификации эффективности выстрела по параметрам создаваемого им акустического поля. Рассчитаны количественные показатели качества классификации эффективности выстрела. Показано, что общий показатель качества классификации по F -мере составляет 0,95, при этом вероятность ошибки классификации 2-го рода равна 0,04.

2. Построена марковская модель эффективности последовательной стрельбы артиллерийского подразделения. Модель позволяет учесть случайные возмущения, присутствие которых возможно в каждом выстреле отдельных орудий. Это возмущения, обусловленные необнаруженными ранее износом зарядной камеры орудия, износом ствола орудия и неполной информацией о состоянии применяемого при выстреле заряда. Показано, что наличие случайных возмущений в выстрелах снижает вероятность эффективного выстрела до 0,25 при стрельбе АП тремя орудиями уже после трех серий выстрелов.

3. Разработан метод управления стрельбой артиллерийского подразделения повышенной эффективности на основе построенной марковской модели. Метод позволяет управлять огнем АП путем выявления орудий с износом зарядной камеры или износом ствола и исключения их из дальнейшей стрельбы. Метод сокращает время выполнения огневой задачи за счет исключения обратной связи между последовательными выстрелами с 11 минут до 5 минут для АП с ше-

стью орудиями. Показано, что исключение из стрельбы АП двух выявленных дефектных орудий позволяет выполнить задачу поражения цели с экономией 18-ти выстрелов.

4. Сформирован обобщенный количественный критерий оценки эффективности стрельбы артиллерийского подразделения при наличии случайных возмущений выстрелов. Критерий построен на основании многокритериальной свертки частных критериев по методу идеальной точки. Показано, что при стрельбе с управлением значение обобщенного критерия эффективности почти в 5 раз превышает его значение при стрельбе с пристрелкой.

Литература

1. Oprean, L.-G. (2020). Artillery from the Perspective of Firing Effects and Ensured Capabilities. *Scientific Bulletin*, 25 (2), 107–113. doi: <https://doi.org/10.2478/bsaft-2020-0015>
2. Aliev, A. A., Bayramov, A. A., Sabziev, E. N. (2018). Effectiveness of artillery systems. *Advanced Information Systems*, 2 (3), 115–122. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.20>
3. Katsev, I. (2018). Evaluation method of the artillery's effectiveness against unitary target. *Security & Future*, 2 (4), 196–198. URL: <https://stumejournals.com/journals/confsec/2018/4/196.full.pdf>
4. Moon, S.-H. (2021). Weapon effectiveness and the shapes of damage functions. *Defence Technology*, 17 (2), 617–632. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.04.009>
5. Shim, Y., Atkinson, M. P. (2018). Analysis of artillery shoot-and-scoot tactics. *Naval Research Logistics (NRL)*, 65 (3), 242–274. doi: <https://doi.org/10.1002/nav.21803>
6. Schmitt, M. N. (2008). The Principle of Distinction and Weapon Systems on the Contemporary Battlefield. *Connections: The Quarterly Journal*, 07 (1), 46–56. doi: <https://doi.org/10.11610/connections.07.1.03>
7. Temiz, Y. Z. (2016). Artillery survivability model. Monterey: Naval Postgraduate School, 98. URL: <https://calhoun.nps.edu/handle/10945/49399>
8. Pelykh, S. N., Maksimov, M. V., Nikolsky, M. V. (2014). A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements. *Problems of Atomic Science and Technology*, 92 (4), 108–116. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/80362/15-Pelykh.pdf?sequence=1>
9. Washburn, A. R. (2002). Notes on Firing Theory. Naval Postgraduate School Monterey, 34. URL: https://www.researchgate.net/publication/238621088_Notes_on_Firing_Theory
10. Kochan, R., Kochan, O., Trembach, B., Kohut, U., Zawislak, S., Falat, P., Warwas, K. (2019). Theoretical Error of Bearing Method in Artillery Sound Ranging. 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). doi: <https://doi.org/10.1109/idaacs.2019.8924450>

11. Петренко, В. М., Ляпа, М. М., Приходько, А. І. та ін. (2015). Засоби підготовки та управління вогнем артилерії. Суми: Сумський державний університет, 458. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/40047>
12. Кондрат, В. В., Костенко, О. І., Корнієнко, О. В. (2018). Аналіз оптико-електронних засобів розвідки та напрямки їх удосконалення з метою підвищення ефективності бойового застосування ОБТ. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2(56), 66–71. doi: <https://doi.org/10.30748/zhups.2018.56.08>
13. Кривошеєв, А. М., Приходько, А. І., Петренко, В. М. (2014). Основи артилерійської розвідки. Суми: Сумський державний університет, 393. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/34022/1/art_pozvidka.pdf
14. Kratky, M., Minarik, V., Sustr, M., Ivan, J. (2020). Electronic Warfare Methods Combatting UAVs. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5 (6), 447–454. doi: <https://doi.org/10.25046/aj050653>
15. Шуляков, С. О., Бзот, В. Б., Жилін, Є. І., Шигімага, Н. В., Артеменко, А. А. (2020). Шляхи удосконалення розвідувального забезпечення бойового застосування ракетних військ і артилерії. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 1 (63), 22–30. doi: <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.63.03>
16. Scanlon, M. V., Ludwig, W. D. (2010). Sensor and information fusion for improved hostile fire situational awareness. *Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications XII*. doi: <https://doi.org/10.1117/12.850406>
17. Liu, Y. J., Shan, X. M., Yang, H. Y., Xu, G. X. (2013). Study on Data Fusion Technologies of Artillery Radar Decision System. *Advanced Materials Research*, 718-720, 1595–1598. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.718-720.1595>
18. Liang, G., Lv, G., Huang, X., Wang, L. (2020). Teaching Method Research of Practical Course of Certain Artillery Radar Equipment. 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Education (ICAIE). doi: <https://doi.org/10.1109/icaie50891.2020.00098>
19. Tan, J. Y., Lee, C. H., Chua, W. S. (2020). Operating and supporting three generations of weapon locating radars. *DSTA Horizons*, 58–65. URL: https://www.dsta.gov.sg/docs/default-source/dsta-about/dh15202006_operating-and-supporting-three-generations-of-weapon-locating-radars.pdf
20. Ляпа, М. М., Макеєв, В. І., Петренко, В. М. (2007). Перспективні методи та засоби балістичної підготовки стрільби. Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки, 3, 45–56.
21. Прокопенко, В. В. (2012). Оцінка ефективності стрільби артилерії з використанням перспективної балістичної станції. Системи озброєння і військова техніка, 4, 52–60. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2012_4_13
22. Dobrynin, Y., Maksymov, M., Boltenkov, V. (2020). Development of a method for determining the wear of artillery barrels by acoustic fields of shots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (5 (105)), 6–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206114>

23. Dobrynin, Y., Volkov, V., Maksymov, M., Boltenkov, V. (2020). Development of physical models for the formation of acoustic waves at artillery shots and study of the possibility of separate registration of waves of various types. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (5 (106)), 6–15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209847>
24. Dobrynin, Ye. V., Boltenkov, V. O., Maksymov, M. V. (2020). Information Technology for Automated Assessment of the Artillery Barrels Wear Based on SVM Classifier. *Applied Aspects of Information Technology*, 3 (3), 117–134. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44052959>
25. Косарев, В. В., Пушин, В. Г., Пономарев, А. И., Хорошилов, В. А. (2003). Артиллерийское оружие ВМФ. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 43. URL: http://8361.ru/fvo/bsf/Kosarev-Artilleriiskoe_oruzhie.pdf
26. Новак, Д. А., Волков, І. Д. (2019). Методичний підхід до визначення залежності відхилення початкової швидкості снарядів через подовження зарядної камери артилерійських гармат, виміряне за допомогою ПЗК. *Військово-технічний збірник*, 20, 28–32. doi: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.28-32>
27. Анипко, О. Б., Хайков, В. Л. (2012). Анализ методов оценки состояния пороховых зарядов как элемент системы мониторинга артиллерийских боеприпасов. *Интегрированные технологии и энергосбережение*, 3, 60–71. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/2199>
28. Suykens, J. A. K., Van Gestel, T., De Brabanter, J., De Moor, B., Vandewalle, J. (2002). *Least Squares Support Vector Machines*. World Scientific, 308. doi: <https://doi.org/10.1142/5089>
29. Xia, X.-L., Jiao, W., Li, K., Irwin, G. (2013). A Novel Sparse Least Squares Support Vector Machines. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1–10. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/602341>
30. Huseby, M. (2007). Noise emission data for M109, 155 mm field howitzer. Norwegian Defence Research Establishment (FFI), 45. URL: <https://www.ffi.no/en/publications-archive/noise-emission-data-for-m109-155-mm-field-howitzer>
31. Gagniuc, P. A. (2017). *Markov Chains: From Theory to Implementation and Experimentation*. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119387596>
32. Mavrakakis, M. C., Penzer, J. (2021). *Probability and Statistical Inference. From Basic Principles to Advanced Models*. Chapman and Hall/CRC, 444. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315366630>
33. Ishizaka, A., Nemery, P. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118644898>
34. Zavadskas, E. K., Antuchevičienė, J., Kapliński, O. (2016). Multi-criteria decision making in civil engineering: Part I – a state-of-the-art survey. *Engineering Structures and Technologies*, 7 (3), 103–113. doi: <https://doi.org/10.3846/2029882x.2015.1143204>
35. Aldoegre, M. (2019). Comparison between trajectory models for firing table application. North-West University, Potchefstroom. URL:

<https://5dok.net/document/7q08x49y-comparison-between-trajectory-models-for-firing-table-application.html>

36. Song, X., Gao, M., Wang, Y., Wu, H., Cui, X. (2019). Research on Evaluation Methods of Firing Precision of Trajectory Correction Projectile. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 612 (3), 032095. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/612/3/032095>

37. Carlucci, D. E., Jacobson, S. S. (2018). Ballistics. Theory and Design of Guns and Ammunition. CRC Press, 654. doi: <https://doi.org/10.1201/b22201>

38. Li, W., Liu, Z. (2011). A method of SVM with Normalization in Intrusion Detection. Procedia Environmental Sciences, 11, 256–262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.040>

39. Awad, M., Khanna, R. (2015). Support Vector Machines for Classification. Efficient Learning Machines, 39–66. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4302-5990-9_3

40. Suykens, J. A. K., Van Gestel, T., De Brabanter, J., De Moor, B., Vandewalle, J. (2002). Least Squares Support Vector Machines. World Scientific, Singapore, 308. doi: <https://doi.org/10.1142/5089>

41. Xia, X.-L., Jiao, W., Li, K., Irwin, G. (2013). A Novel Sparse Least Squares Support Vector Machines. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 1–10. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/602341>

42. LS–SVMlab toolbox. URL: <https://www.esat.kuleuven.be/sista/lssvmlab/>

43. James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. (2013). Support Vector Machines. An Introduction to Statistical Learning, 337–372. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7_9

44. Pelykh, S. N., Maksimov, M. V. (2013). The method of fuel rearrangement control considering fuel element cladding damage and burnup. Problems of Atomic Science and Technology, 5 (87). URL: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2013_5/article_2013_5_84a.pdf

45. Maksimov, M. V., Pelykh, S. N., Gontar, R. L. (2012). Principles of controlling fuel-element cladding lifetime in variable VVER-1000 loading regimes. Atomic Energy, 112 (4), 241–249. doi: <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9552-3>

46. Петренко, В. М., Ляпа, М. М., Приходько, А. І. та ін. (2015). Засоби підготовки та управління вогнем артилерії. Суми: Сумський державний університет, 458. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/339163633.pdf>