

<sup>1, 2</sup>АНАТОЛИЙ ЛОПАТЬЕВ,  
<sup>1, 2</sup>НИКОЛАЙ ДЗЮБАЧИК,  
<sup>2, 3</sup>БОГДАН ВИНОГРАДСКИЙ

## О ВОЗМОЖНЫХ ПОДХОДАХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ В СТРЕЛКОВЫХ ВИДАХ СПОРТА

**Резюме.** Управління системою підготовки спортсменів доцільно проводити з використанням даних, які отримано при аналізі складних систем із використанням методів фізико-математичного моделювання. Розглядаються деякі аспекти використання термодинамічного підходу до моделювання процесів здійснення пострілу в спортивній стрільбі. Подано теоретичні основи застосування фізико-математичних моделей у стрільцькому спорті.

**Summary.** For management in the sport preparation system it is advisable to use data obtained while using physical-mathematical modeling. Some aspects of use of thermodynamical approach to the modeling of shot realization processes in shooting sport are considered. The authors present the theoretical bases of application of physical and mathematical models of the complex systems in the shooting sport.

**Постановка проблемы.** Моделирование на современном этапе развития науки является одним из наиболее действенных и перспективных инструментов изучения сложных явлений и процессов в стрелковом спорте. Анализ научных трудов подтверждает актуальность применения различных вариантов моделирования в таких видах стрелкового спорта, как стрельба из лука, пулевая и стендовая стрельба.

Исторические предпосылки развития стрелкового оружия, способы его использования существенно повлияли на количество научных трудов, которые касаются моделирования данной отрасли человеческой деятельности. Поскольку лук, стрелы, арбалет имеют значительно более глубокие корни с точки зрения истории их использования, то вполне понятным является тот факт, что исследований о конструкциях и процессах в стрельбе из лука насчитывается больше.

Как свидетельствуют данные литературы, еще в средние века ведущие интеллектуалы своего времени пытались описать лук как упругое тело с использованием определенного математического аппарата. Известные ученые — итальянец Леонардо да Винчи и англичанин Роджер Ашем — приложили усилия к описанию механики лука [8]. Поскольку в дальнейшем стрельба из лука потеряла военное значение, не приобретя равноценного другого, то и научный интерес к ней угасает. Со стремительным развитием стрельбы из лука как вида спорта в XX веке появились новые подходы к описанию механики лука [1]. Основой исследований, в которых использовался строгий математический аппарат, можно считать работы зарубежных механиков и математиков [10—13].

На современном этапе самыми обстоятельными работами дедуктивного характера с использованием методов аналитической механики являются исследования И. Заневского [2, 3, 14]. Им разработаны механико-математические модели выстрела из лука, под которыми автор понимает совокупность уравнений, условий и ограничений, описывающую механические процессы, происходящие в системе “стрелок—лук”. Сегодня развивается также индуктивный подход к описанию процессов в стрельбе из лука, который основывается на анализе сложных акселерометрических колебательных сигналов во время и после выполнения выстрела из лука.

Одной из основных особенностей стрельбы из лука является тот факт, что движение снаряда (стрелы) происходит за счет перераспределения внутренней энергии системы, имеющей исключительно механический характер. При применении огнестрельного оружия [6, 7] процесс выстрела является более разнообразным и представляет собой сложный термодинамический и газодинамический процесс очень быстрого, почти мгновенного превращения химической энергии пороха сначала в тепловую, а затем в кинетическую

энергию пороховых газов, приводящих в движение снаряд, ствол и приклад.

Наука, которая изучает закономерности явлений и процессов, протекающих при выстреле во время сгорания заряда в канале ствола огнестрельного оружия, — внутренняя баллистика. К общим задачам внутренней баллистики как науки относится: изучение и анализ условий и факторов, от которых зависит процесс выстрела; установление общих и частных теоретических и экспериментальных закономерностей, характеризующих и сопровождающих процесс выстрела; разработка методов решения задач, возникающих в процессе исследования выстрела; разработка специальной аппаратуры для исследования явлений и процессов при выстреле.

При решении сложных теоретических и практических задач внутренняя баллистика нередко прибегает к схематизации и упрощению изучаемых процессов, вводит определенные допущения, что позволяет решать задачи сначала в первом приближении, а затем уточнять полученные решения, учитывая влияние еще недостаточно изученных факторов.

Во время выстрела различают такие основные процессы: горение пороха и образование газов, имеющих очень высокую температуру и характеризующихся большим запасом внутренней энергии (в этом процессе скорость горения в основном зависит от природы и температуры пороха и от давления газов); преобразование тепловой энергии пороховых газов в кинетическую энергию движения системы: газы заряда — снаряд — ствол — приклад; движение газов заряда, снаряда и ствола.

Все процессы взаимозависимы и протекают одновременно. Несмотря на высокую интенсивность протекающих при выстреле процессов, они, тем не менее, закономерны, в определенных пределах управляемы и при сохранении одних и тех же определенных условий стабильны от выстрела к выстрелу. Таким образом, актуальным является физико-математическое моделирование изучаемой системы.

Проблема, над которой приходится работать, суть создание такой модели системы “стрелок — оружие — мишень”, которая дает возможность отвечать на актуальные вопросы спортивной науки и практики.

**Цель исследования** — расширение методов исследования при моделировании сложной системы “стрелок — оружие — мишень”.

#### **Задачи исследования:**

1. Обоснование целесообразности научного познания системы “стрелок — оружие — мишень” с использованием математических моделей.

2. Определение места термодинамического подхода при моделировании системы “стрелок — оружие — мишень”.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Декомпозиция системы “стрелок — оружие — мишень”. Для создания математической модели системы “стрелок — оружие — мишень”, прежде всего, необходимо рассматривать ее с использованием основных положений системного подхода. Под системой будем понимать взаимосвязанные элементы некоторого вполне определенного множества (или некоторых множеств), образующие целостный объект, при условии существования цели и некоторых ресурсов для достижения этой цели. Любая система состоит из подсистем, любая подсистема может сама быть рассмотрена как система.

Подсистема — это часть системы с некоторыми связями и отношениями.

Описание (спецификация) системы — это описание всех ее элементов (подсистем), их взаимосвязей, целей, функций при некоторых ресурсах, т.е. всех допустимых состояний.

Если входные параметры, цель, условия задачи, ее решение или само понятие решения описываются и формализуются нечетко, то эти задачи называются слабо формализованными. Поэтому при решении таких задач приходится рассматривать целый комплекс вопросов формализации, на основе которых можно исследовать слабо формализованную задачу. Сложность исследования такого класса задач заключается в необходимости учета различных, часто противоречивых критериев определения, оценки решения задачи. К слабо формализованным объектам, с точки зрения построения математической модели, в нашем случае необходимо отнести подсистему “стрелок”.

Одним из важнейших моментов создания модели является структуризация объекта моделирования. Структура упорядочивает процесс моделирования объекта, т.е. определяет совокупность связей и отношений между частями целого, необходимых для достижения цели.

Структура является связной, если возможен обмен ресурсами между любыми двумя подсистемами системы (подразумевается, что если есть обмен  $i$ -й подсистемы с  $j$ -й подсистемой, также существует обмен  $j$ -й подсистемы с  $i$ -й). Данное положение является важным в ходе моделирования системы “стрелок — оружие — мишень”.

Вообще можно образовывать сложные, связанные  $m$ -мерные структуры ( $m$ -структуры), в которых подсистемы —  $(m-1)$ -мерные структуры. Такие  $m$ -структуры могут актуализировать связи и

свойства, которые невозможно актуализировать в  $(m-1)$ -структурах, и эти структуры широко используются в прикладных науках для описания и актуализации сложных взаимосвязанных многопараметрических и многокритериальных проблем и систем.

Системы, плохо формализующиеся и плохо структурирующиеся, чаще всего возникают на стыке различных наук, при исследовании синергетических процессов и систем, таких, как и в нашем случае.

Основными признаками системы “стрелок — оружие — мишень” являются:

- Целостность, связность систем; с исчезновением связности исчезает и сама система, хотя элементы системы и некоторые связи и отношения между ними могут быть сохранены.
- Наличие подсистем и связей между ними, или наличие структуры системы; с исчезновением подсистем или связей между ними может исчезнуть и сама система.
- Связи с окружающей средой по обмену ресурсами.
- Подчиненность всей организации системы определенной цели — достижение высокого стрелкового результата.
- Эмерджентность, или несводимость свойств системы к свойствам элементов.

Подсистемы “стрелок”, “оружие” и “мишень” владеют всеми свойствами системы, в частности, свойством целостности и эмерджентности, которое отличает подсистему от компонентов системы — набора элементов, для которых не сформулирована подцель и в которых нет целостности. С другой стороны, система “стрелок — оружие — мишень” является целостной, что характерно для системы. Целостность, в данном случае, проявляется в виде симметрии, повторяемости, адаптированности и саморегуляции, наличия и сохранения инвариантов. В системе каждая часть дополняет другие и необходима как орган целого.

При системном анализе различных объектов, процессов, явлений обычно необходимо пройти следующие этапы:

- формулировка целей, их приоритетов и проблем исследования;
- определение и уточнение ресурсов исследования;
- выделение системы (от окружающей среды) посредством ресурсов;
- определение и описание подсистем;
- определение и описание целостности (связей) подсистем и их элементов;
- анализ взаимосвязей между подсистемами;
- построение структуры системы;

- исследование функционирования системы и ее подсистем;
- согласование целей системы с целями подсистем;
- анализ (испытание) целостности системы;
- анализ и оценка эмерджентности системы;
- испытание системы (системной модели), ее функционирование.

*Моделирование как средство научного познания системы “стрелок — оружие — мишень”.* Для полноты теоретического изложения рассматриваемой проблемы необходимо дать некоторые определения, а именно, определение модели, моделирования, прикладного моделирования [4, 9].

Заметим, что модель, в отличие от простого описания, должна быть активной, т. е. способствовать проникновению вглубь объекта исследования, в его сущность. Общим для моделей является то, что они являются средствами научного познания. Для того, чтобы дать общее определение модели, необходима как можно более полная классификация существующих моделей. Такая задача является сложной, потому что существующие сегодня классификации моделей строятся исходя из потребностей той области знаний, в которой работает исследователь.

Традиционным является разделение моделей на материальные и идеальные. Вместе с тем такое разделение дополняется делением их на предметно-подобные и символические (знаковые, математические и т. д.).

В области научного познания существуют более конкретные критерии для классификации моделей, а именно, по форме представления моделей (логические, математические, механические, физические, химические и т. д.), по природе явлений, которые моделируются (социальные, биологические и т. д.), по задачам моделирования (прогностические, эвристические и т. п.), по степени точности (приближенные, функциональные и т. д.) и другие.

Существует два подхода к обобщенному определению модели. В рамках одного из них моделью понимают отображение фактов, вещей, отношений определенной области знаний в виде более простой, наглядной материальной структуры данной области или другой области (знаний). Таким образом, когда мы говорим о модели, то речь идет об определенных важных структурах и отношениях, аналогичных предмету исследования, системе, применение которой базируется на научной обоснованности выводов по аналогии.

Для научных моделей характерно то, что они являются заменами объекта исследования, на-

ходящимися с последним в таком соответствии, которое позволяет получать новые знания об этом объекте.

Моделирование можно определить как метод опосредствованного познания при помощи искусственных или естественных систем, сохраняющих некоторые особенности объекта исследования, что дает возможность представить этот объект в определенных отношениях и давать о нем новые знания.

Среди других моделей выделим математические модели. Математическая модель — это уравнение или система уравнений, которые являются записью условий и законов функционирования системы. Процесс построения математической модели называется математическим моделированием.

Приведем общую схему математического моделирования при исследовании поведения объектов естествознания:

- реальный объект;
- содержательная модель (физическая, биологическая, химическая и т. д.);
- математическая модель;
- решение и исследование математической задачи.

На первом этапе выделяется объект, являющийся предметом исследования, и конкретизируется его взаимодействие с окружающей средой. На втором этапе, исходя из реального объекта, формулируются его свойства на языке той или иной науки и выделяются процессы, которые предстоит изучить, — строится модель объекта (механическая, физическая, биологическая и т. п.), которую называют содержательной. Содержание третьего этапа заключается в записи соответствующих уравнений или соотношений, т. е. в переходе на формальный математический язык и, таким образом, к формулировке математической модели. Следующий, четвертый, этап заключается в изучении математической модели. Он включает в себя общий анализ полученных соотношений, постановку и решение математической задачи. На заключительном этапе необходимо проанализировать полученное решение, сделать выводы о закономерности поведения системы, дать интерпретацию полученных результатов, провести их сравнение с известными фактами (в частности, с экспериментальными), провести верификацию модели.

Поскольку объектом исследования является система “стрелок — оружие — мишень”, то ее в дальнейшем будем рассматривать следующим образом. Подсистема “оружие — мишень” есть объект моделирования, а все, что не включено в эту подсистему, но взаимодействует с ней или

взаимовлияет на нее, будем называть внешней средой. Внешней средой относительно системы, таким образом, является человек и окружающая среда, которая характеризуется температурой, давлением, влажностью, действием сил притяжения и силы ветра.

Взаимодействие объекта моделирования с внешней средой будем рассматривать в некотором приближении как действие определенных сил (или давлений), которые идут от человека, сил ветра и притяжения Земли.

Если в дальнейшем будем рассматривать определенные физико-математические или механико-математические модели, то при описании состояния системы используются уравнения (довольно часто дифференциальные уравнения в частных производных), которые для однозначности решения нужно дополнить соответствующими краевыми (начальными и граничными) условиями. Если модель описывается дифференциальными уравнениями в частных производных второго порядка (один из наиболее часто встречающихся случаев), то начальные условия задаются на функции состояния и ее производных, а граничные условия — как зависимость между некоторыми параметрами состояния и их производными.

Действие человека, а также давление ветра на оружие можно записать в следующем виде:

$$p(t) = p_0(t) [H(t - t_1) - H(t - t_2)],$$

где  $p$ ,  $p_0$  — давление;  $t$  — время,  $t_1$ ,  $t_2$  — время начала и конца действия импульса,  $H$  — функция Хевисайда.

Остановимся на изучении объекта управления “стрелок — оружие — мишень” при внешних воздействиях, с целью получения информации, которые протекают в системе, и разработке управленческих решений.

На первом этапе систему “стрелок — оружие — мишень” можно рассматривать как черный ящик, в котором есть безграничное количество параметров входа, а на последующих этапах черный ящик можно детализировать, описывая в определенных приближениях процессы, происходящие в нем. Нам нужно описать параметры входа (точнее подсистему, которую сможем описать) и смоделировать систему эффективных двигательных действий стрелка. В стрельбе входными параметрами в систему “стрелок — оружие — мишень” являются, например, подсистемы параметров, связанные с внутренней и внешней баллистикой оружия со снарядом, а также движением мишени.

Приведем для примера систему входных параметров, которые связаны только с процессами

ми, изучаемыми внутренней баллистикой. Такими параметрами являются: давление форсирования; дульное давление; дульная скорость; максимальное давление в канале ствола; максимальная скорость снаряда; начальная скорость снаряда; сила отдачи. Существует также вариабельность величин, которые влияют на изменение начальной скорости снаряда, например дроби в стендовой стрельбе: разница в длине ствола; разница в среднем диаметре патронника или гильзы; разница в диаметре канала ствола; разница в длине переходного конуса от патронника к каналу ствола; различные сорта капсюлей; разница в форме дна гильзы; различные партии изготовления сорта пороха; различные объемы пороховой камеры гильзы; различная упругость пыжей; разница в 0,5 мм в диаметре дроби; дробь различной твердости; разница в 10 °С в температуре; разница в 0,05 г в массе бездымного пороха; разница в 0,5 г в массе заряда дроби.

Не меньшее количество параметров можно ввести в рассмотрение и из внешней баллистики, а также учитывая взаимодействие и взаимосвязь между подсистемами.

Будем изучать отдельную локальную подсистему "оружие", в частности займемся оценкой и расчетом процессов, определяющих зависимости между характеристиками конструкции и макроскопическими параметрами смеси пороховых газов и воздуха, т.е.  $P = P(l)$  и  $T = T(l)$ , где  $P$  — давление,  $T$  — абсолютная температура,  $l$  — длина ствола.

Описание таких процессов дается уравнениями газовой динамики, в основе которых постулаты термодинамики, законы сохранения и уравнения состояния [5 — 7]. Основные постулаты термодинамики в основном сводятся к возможности макроскопического описания состояния реальных физических систем, в данном случае смеси воздуха и пороховых газов, посредством внутренней энергии  $U$  и сопряженных параметров

$$T \div S, P \div V, m_k \div m_k, k = \overline{1, K}, \quad (1)$$

изменение которых определяет изменение внутренней энергии полностью, где  $T$  — абсолютная температура;  $S$  — энтропия,  $P$  — давление,  $V$  — объем,  $m_k$  — химический потенциал компоненты  $k$  смеси,  $m_k$  — его масса ( $m = \sum_k m_k$  — полная масса

смеси в объеме  $V$ ),  $K$  — число разных компонент смеси.

Подчеркнем, что изменение параметров  $S, V, m_k$  полностью определяет изменение внутренней энергии системы  $U$ .

Во многих практически важных случаях смесь воздуха и пороховых газов в канале ствола можно рассматривать в приближении идеальных или близких к идеальным реальных газов. В связи с этим для суммарного давления  $P$  в смеси можем принимать (закон Дальтона)

$$P = \sum_k P_k, \quad (2)$$

где парциальное давление  $P_k$ , например, в приближении идеальных газов определяется из уравнения Клапейрона-Менделеева

$$P_k = \frac{c_k RT}{M_k}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (3)$$

где  $c_k = \frac{m_k}{V}$  — плотность компоненты  $k$ ,  $M_k$  — атомный вес химического вещества компоненты  $k$ ,  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Подчеркнем, что в более общих случаях вместо соотношений (2) и (3) следует использовать уравнение состояния.

Первый закон термодинамики формулируется в виде

$$dU = d'Q + d'A + d'E_m, \quad (4)$$

где  $dU$  — инфинитизимально малое изменение внутренней энергии системы при изменении энтропии на  $dS$ , объема на  $dV$  масс компонент на  $dm_k$ ,  $k = \overline{1, K}$

$$dU = U(S + dS, V + dV, \{m_k + dm_k\}) - U(S, V, \{m_k\}), \quad (5)$$

$d'A$  — изменение энергии системы вследствие выполнения механической работы над системой при давлении  $P^z$  во внешней среде

$$d'A = P^z dV, \quad (6)$$

$dE_m$  — изменение энергии системы в результате обмена массы с внешней средой, химические потенциалы компонент, в котором  $m_k^z$  ( $k = \overline{1, K}$ )

$$d'E_m = \sum_{k=1}^K m_k^z dm_k, \quad (7)$$

$d'Q$  — обмен энергией в форме тепла между системой и внешней средой при условии правильности выражений (6) и (7). При этом индексом  $z$  отмечено значение соответствующих параметров во внешней среде. Для открытых систем обычно принимается, что каждая компонента, составляющая систему, присутствует и в окружающей среде.

Подчеркнем, что в общем случае

$$P^z \neq P, m_k^z \neq m_k, k = \overline{1, K}, \quad (8)$$

т. е. давление и химические потенциалы компонент во внешней среде и системе отличаются.

В условиях механического равновесия системы и внешней среды

$$P^z = -P, \quad (9)$$

а также равновесия относительно обмена массой

$$M_k^z = M_k, \quad k = \overline{1, K}, \quad (10)$$

из второго закона термодинамики следует, что обмен энергией в форме тепла  $d'Q$  можем представить в виде

$$d'Q = TdS. \quad (11)$$

Тогда из первого закона термодинамики (4), выражений для работы (6) и обмена энергией при изменении массы (7), условий (9) и (10) и соотношения (11) следует уравнение Гиббса

$$dU = Tds - PdV + \sum_{k=1}^K m_k dm_k. \quad (12)$$

Полученное уравнение является основным для всего последующего термодинамического анализа поведения реальных газов.

Подчеркнем, что все величины (1), как и записанные соотношения (2)–(12) для них могут применяться как для определенной (мысленно выделенной) части объема ствола, занятого газовой смесью, так и для всего объема.

Для анализа уравнений состояния удобно также использовать как термодинамический потенциал системы свободную энергию Гиббса

$$G = U - TS + PV, \quad (13)$$

для которой уравнение (12) принимает вид

$$dG = -SdT + VdP + \sum_{k=1}^K m_k dm_k. \quad (14)$$

Если из химико-калориметрических измерений определена зависимость

$$G = G(T, P, \{m_k\}), \quad (15)$$

то уравнения состояния получаются из соотношения Гиббса (14) в форме

$$\begin{aligned} -S &= \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_{P, m_k}, \quad V = \left( \frac{\partial G}{\partial P} \right)_{T, m_k}, \\ m_k &= \left( \frac{\partial G}{\partial m_k} \right)_{T, P, m_{l \neq k}}, \\ k &= \overline{1, K}, \end{aligned} \quad (16)$$

т. е. в виде зависимостей

$$\begin{aligned} S &= S(T, P, \{m_k\}), \quad \mu_k = \mu_k(T, P, \{m_k\}), \\ V &= V(T, P, \{m_k\}), \quad k = \overline{1, K}. \end{aligned} \quad (17)$$

При этом часто энтропия  $S$  и химические потенциалы масс компонент могут задаваться простой зависимостью через теплоемкости, коэффициенты сжимаемости, энергии активности и тому подобное.

Кроме уравнений состояния (17) при исследовании связей параметров (1) для пороховых газов в стволе ружья может представлять интерес связь между ними для адиабатического процесса. В случае адиабатического процесса выполняются условия

$$d'Q = 0, \quad d'E_m = 0, \quad (18)$$

или для процессов, при которых выполняются уравнения (9), (10) и (11), эти условия будут

$$S = const, \quad m_k = const, \quad k = \overline{1, K}. \quad (19)$$

Поэтому последние процессы еще называются изотропийными.

Из уравнения Гиббса при условиях (19) имеем

$$dU = -PdV. \quad (20)$$

Воспользуемся далее зависимостями

$$dU = C_v dT, \quad PV = nRT, \quad (21)$$

а также соотношением Мейера

$$C_p - C_v = nR, \quad (22)$$

справедливыми для смеси идеальных газов, здесь  $C_v$  и  $C_p$  — теплоемкости системы при постоянном объеме и давлении,  $n = \sum_{k=1}^K n_k, n_k = \frac{m_k}{M_k}$  —

количество молей компоненты  $k$ .

Из уравнений (20) и (21) имеем

$$C_v dT = - \frac{nRT}{V} dV,$$

или

$$C_v \frac{dT}{T} = - (C_p - C_v) \frac{dV}{V},$$

или

$$\frac{dT}{T} = (1 - \gamma) \frac{dV}{V}, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (23)$$

После решения последнего уравнения имеем

$$TV^{\gamma-1} = const. \quad (24)$$

Постоянная в этом выражении может быть определена через значение температуры  $T_0$  и объема  $V_0$  в некотором начальном состоянии. Тогда связь между температурой и объемом для произвольного состояния (момента времени) будет

$$TV^{\gamma-1} = T_0 V_0^{\gamma-1}.$$

В случае смеси воздуха и пороховых газов определенный интерес представляет также

связь давления  $P$  и объема  $V$  в стволе ружья. Если с помощью уравнения состояния исключить температуру  $T$  в уравнении (24), то найдем

$$PV^\gamma = P_0V_0^\gamma. \quad (25)$$

Полученное уравнение носит название уравнения Пуассона.

Аналогично путем исключения объема  $V$  из уравнения (24) можем найти конкретную связь между температурой  $T$  и давлением  $P$ .

Если площадь поперечного сечения ствола принять постоянной, то формулы (24) и (25) могут быть представлены в виде

$$Tl^{\gamma-1} = T_0l_0^{\gamma-1}Pl = P_0l_0^\gamma, \quad (26)$$

где под  $l_0$  и  $l$  следует понимать начальное и актуальное положение пули.

Связи (26) без принципиальных трудностей обобщаются на случай необходимости учета особенностей реальных газов и ствола ружья. При определенной модификации их можно использовать и на этапе горения пороха.

### Выводы

В исследовании сделана попытка собрать воедино ранее разрозненные сведения из системного анализа, философских и научно-познавательных определений моделей, моделирования, физико-математического моделирования и т. д. При этом обращено внимание на историю применения математики при изучении явлений в стрелковых видах спорта.

Предложено рассматривать подсистему «оружие — мишень» как термодинамическую систему, при этом внешние воздействия на систему суть действия силы тяжести, ветра, сопротивление воздуха и т. д., а также результат взаимодействия человека с подсистемой.

Предложено задавать силу ветра на систему в виде импульсной функции, как это принято, например, в гидроакустике.

На основе постулатов термодинамики, законов сохранения и уравнений состояния приведены значения абсолютной температуры и давления в канале ствола огнестрельного оружия.

1. Балов А.Ш. Основы баллистики стрельбы из лука. — М.: Военно-политическая академия, 1975. — С. 92.

2. Заневський І.П. Аналіз системи «Людина — метална зброя» на прикладі пострілу з лука //Збірка науково-методичних праць Військового інституту ДУ «ЛП». Вип. 4. — Львів, 1998. — С. 41 — 50.

3. Заневський І.П. Методика моделювання та аналізу характеристик пострілу зі спортивного лука: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. 05.13.02. — Львів: ФМІ НАНУ, 1996. — 40 с.

4. Кочергин А.М. Моделирование мышления. — М.: Изд-во политической литературы., 1969. — 224 с.

5. Лопатев А.О., Пятков В.Т. Внутрішня балістика гладкоствольної зброї // Педагогіка, психологія та медико-біологічні проблеми фізичного виховання і спорту: Зб. наук праць / За ред. Єрмакова С.С. — Харків, 2001. — № 23. — С. 22—28.

6. Лопатев А.О., Пятков В.Т., Чапля Є.Я. Макроскопічне моделювання основних структурних елементів систем у стрілецьких видах спорту // Педагогіка, психологія та медико-біологічні проблеми фізичного виховання і спорту: Зб. наук праць / За ред. Єрмакова С.С. — Харків, 2001. — № 29. — С. 8 — 14.

7. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. — М.: Оборонгиз, 1962. — 704 с.

8. Фаш В., Содел В. Вклад Леонардо да Винчи в теоретическую механику // В мире науки. — 1986. — № 11. — С. 76 — 82.

9. Філософія. Курс лекцій: Навч. посібник / Бичко І.В. та ін. — К.: Либідь, 1994. — 576 с.

10. Klopsteg P.E. Physics of Bow and Arrows //American Journal of Physics. — 1943, V. 11. — № 4. — P. 175 — 192.

11. Marlow W.C. Bow and Arrows Dynamics //American Journal of Physics. — 1981, V. 49. — № 4. — P. 320 — 333.

12. Schuster B.G. Ballistics of the Modern-Working Recurve Bow and Arrow // American Journal of Physics. — 1969, V. 37. — № 4. — P. 364 — 373.

13. Soong T-C. An Optimally Designed Archery. — Xerox Corp., Rochester. — New York, 1986. — 16 p.

14. Zanevskyy I. The Archer's Paradox / Proc. 16 ISBS Symposium. — Konstanz, 1998, V. 1. — P. 301 — 304.

<sup>1</sup>Центр математического моделирования Института прикладных проблем механики и математики им. Я.С. Пидстригача НАН Украины, Львов

<sup>2</sup>Львовский государственный институт физической культуры, Львов

<sup>3</sup>Национальный университет физического воспитания и спорта Украины, Киев