

УДК 623.44(045)

DOI 10.22213/2410-9304-2018-3-35-41

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОБОДНОГО ДВИЖЕНИЯ ОРУЖИЯ
НА ПРИМЕРЕ АВТОМАТОВ КАЛАШНИКОВА*Д. В. Чирков*, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия*Л. А. Галаган*, доктор технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия*Р. Ю. Сахратов*, ЗАО «Техкрим»

Причиной рассеивания выстрелов при автоматической стрельбе является неоднобразие взаимодействия оружия, отклоняющегося от точки прицеливания под действием силовых факторов, и стрелка, по возможности компенсирующего эти отклонения.

Представлена математическая модель исследования свободного (без участия стрелка) пространственного движения оружия, учитывающая газодинамические процессы в оружии, возникающие силовые факторы, удары при работе автоматики при их расположении вне центра масс стрелка.

В расчетной схеме математической модели принято расположение центра вращения оружия, прижатого к плечу и неподвижного относительно него, на оси симметрии стрелка в центре его масс при удалении плечевого упора на объективных расстояниях по боку и высоте, характерных для среднестатистического стрелка. Расположение силовых факторов, типичных для работы автоматики, определяется компоновкой механизмов оружия. Обозначены силовые факторы, действующие в оружии и оказывающие влияние на его перемещения в пространстве, создавая опрокидывающие или стабилизирующие моменты относительно центра масс стрелка. Составлены уравнения вращательного движения оружия с учетом ударных взаимодействий в крайних положениях затворной рамы и при отпирании затвора кинематические уравнения, определяющие углы поворота оружия, а также отклонения точек попадания от точки прицеливания. Перечисленные элементы учтены в блок-схеме системы уравнений, определяющих движение автомата с отводом пороховых газов. Выходными данными являются значения опрокидывающих моментов и отклонения оружия от точки прицеливания, позволяющие расценивать устойчивость оружия при стрельбе как предысторию рассеивания при введении стрелка.

Разработанная модель использования для оценки эффективности мероприятий для стабилизации автомата АК-47 в пространстве: уменьшение калибра с целью снижения импульса отдачи и использование дульных газовых устройств.

Ключевые слова: автомат, силы, опрокидывающие моменты, математическая модель, отклонения.

Введение

Под действием силовых факторов, обеспечивающих перемещение звеньев автоматики, оружие независимо от стрелка приходит в сложное пространственное движение, приводящее к изменению его положения, занимаемого при прицеливании. Отклонения выстрелов от точки прицеливания в плоскости стрельбы и в горизонте оружия можно назвать систематическими ошибками стрельбы, характерными для оружия определенной конструкции. Неоднобразие взаимодействия оружия и стрелка при компенсации отклонений оружия, являющееся причиной случайных ошибок, вносимых стрелком, приводит к рассеиванию точек попадания.

Основной раздел

Главным силовым элементом, приводящим оружие к потере устойчивости, является сила отдачи, создающая при упоре в плечо вращающие моменты, перемещающие оружие вверх и вправо от точки прицеливания [1].

В рассматриваемой задаче, предпосылки решения которой приведены в работе [2], принято, что оружие при выстреле совершает сложное движение при одновременном вращении в вертикальной и горизонтальной плоскостях. В рас-

четной схеме перемещения считаются независимыми и рассматриваются отдельно. Сила тяжести в расчет не принимается, влияние стрелка не учитывается.

Основными моментами расчетной схемы, показанной на рис. 1, являются:

1. Центр вращения оружия, прижатого к плечу и неподвижного относительно него, расположен на оси симметрии стрелка в центре его масс.

2. Центр вращения плечевого упора в горизонте оружия расположен на оси симметрии стрелка на объективном расстоянии h_2 , составляющем для среднестатистического стрелка $h_2 = 0,23$ м.

3. Вращающий момент силы $P_{кн}$ в вертикальной плоскости определяется расстояниями h_1 и L , где h_1 – расположение по высоте направления действия силы относительно уровня плеча; L – расстояние от уровня плеча до центра вращения оружия, $L = 0,48$ м для среднестатистического стрелка.

Схема рис. 1 использована для определения вращающих моментов и моментов инерции оружия в двух плоскостях.

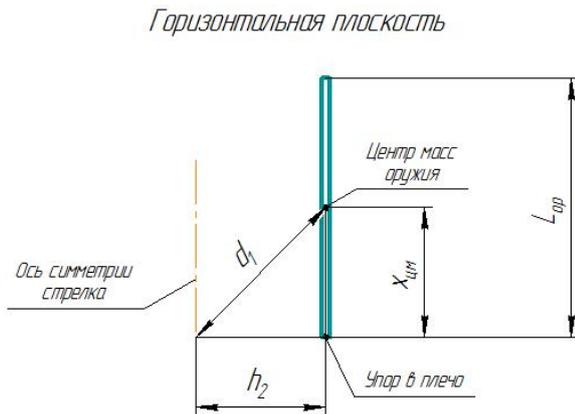
Согласно теореме Штейнера момент инерции образца, представленного как стержень массой

$M_{ор}$ и длиной $L_{ор}$, относительно центра вращения

$$J_{ор} = J_{ц.м} + M_{ор}d^2,$$

где $J_{ц.м}$ – момент инерции оружия относительно центра масс:

$$J_{ц.м} = \frac{M_{ор}L_{ор}^2}{12},$$



d – расстояние от центра вращения (центра масс стрелка) до центра масс образца,

$$d = \sqrt{x_{ц.м}^2 + h^2},$$

где $h = h_1 + L$ – в вертикальной плоскости; $h = h_2$ – в горизонтальной плоскости.

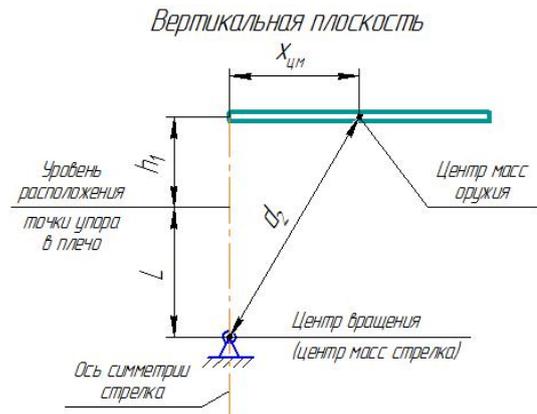


Рис. 1. Расчетная схема для определения пространственного движения оружия относительно центра масс

В связи с движением подвижных частей положение центра масс оружия оказывается зависимым от их перемещения

$$x_{ц.м}(t) = x_{ц.м} - \frac{M_{п.ч} \cdot x_{п.ч}}{M_{ор}},$$

что учитывается при определении момента инерции оружия в двух плоскостях при его вращательном движении.

Каждый из силовых факторов, действующих в оружии, оказывает свое влияние на его перемещение в пространстве, создавая опрокидывающие или стабилизирующие моменты относительно центра масс стрелка.

Уравнения вращательного движения оружия

$$J_{ор_{вер}} \frac{d\omega^{вер}}{dt} = M_{вер};$$

$$J_{ор_{гор}} \frac{d\omega^{гор}}{dt} = M_{гор}$$

и кинематические уравнения, определяющие углы его поворота относительно неподвижной опоры (центра масс стрелка)

$$\frac{d\varphi^{вер}}{dt} = \omega^{вер};$$

$$\frac{d\varphi^{гор}}{dt} = \omega^{гор}.$$

В результате отклонения точек попадания от точки прицеливания (систематические ошибки стрельбы от каждого фактора при дальности X) составят

$$Y = X \cdot \tan \varphi^{вер} - \text{в плоскости стрельбы};$$

$$Z = X \cdot \tan \varphi^{гор} - \text{в горизонте оружия.}$$

Суммарные силы и моменты, действующие на оружие, отклонения его от точки прицеливания в функции времени определяются суммированием эффектов раздельно в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Характерными для работы автоматики являются удары при движении подвижных частей, происходящие в начале и конце отпирания затвора, а также в крайних положениях затворной рамы. Результаты их действия проявляются в мгновенном изменении скорости подвижных частей и оружия.

В крайнем заднем положении уравнение сохранения количества движения при поступательном движении оружия имеет вид [3]:

$$M_{ор}V_{ор_{после}} = M_{ор}V_{ор_{до}} + M_{п.ч}V_{п.ч_{до}}(1+b),$$

где $V_{ордо}$, $V_{орпосле}$ – скорости оружия до и после удара; b – коэффициент восстановления скорости после удара, $b = 0,4$.

Тогда приращение скорости оружия в результате удара подвижных частей в крайнем заднем положении

$$\Delta V_{ор} = \frac{(1+b)M_{п.ч}V_{п.чдо}}{M_{ор}}$$

При вращательном движении оружия приращение угловой скорости его движения

$$\Delta \omega_{ор} = \frac{(1+b)M_{п.ч}V_{п.чдо} \cdot H}{J_{ор}}$$

где $J_{ор}$ – момент инерции оружия относительно центра масс стрелка; H – расстояние от линии удара до оси, проходящей через центр масс стрелка.

В крайнем переднем положении к допущению о мгновенности удара добавляется допущение об отсутствии отскока ведущего звена автоматики, то есть $b = 0$. С учетом этого уравнение сохранения количества движения в крайнем переднем положении принимает вид

$$M_{ор}V_{орпосле} = M_{ор}V_{ордо} + M_{п.ч}V_{п.чдо},$$

что определяет падение скорости оружия вследствие удара

$$\Delta V_{ор} = -\frac{M_{п.ч}V_{п.чдо}}{M_{ор}}$$

При рассмотрении вращательного движения оружия изменение угловой скорости его движения

$$\Delta \omega_{ор} = -\frac{M_{п.ч}V_{п.чдо} \cdot H}{J_{ор}}$$

При откате затворной рамы в начале отпирания затвора происходит мгновенная потеря скорости затворной рамы и увеличение количества движения оружия, которое воспринимается оружием.

Тогда приращение скорости оружия при его поступательном движении

$$\Delta V_{ор} = -\frac{(1-\alpha_{отп})M_{п.ч}V_{п.чотп}}{M_{ор}},$$

где $V_{п.чотп}$ – скорость затворной рамы в момент отпирания затвора; $\alpha_{отп}$ – коэффициент потери скорости при ударе затворной рамы о запертый затвор в начале отпирания.

При рассмотрении вращательного движения оружия

$$\Delta \omega_{ор} = -\frac{(1-\alpha_{отп})M_{п.ч}V_{п.чотп} \cdot H}{J_{ор}}$$

Ударное взаимодействие затворной рамы и затвора в конце его отпирания происходит вне контакта со ствольной коробкой и не влияет на перемещение оружия.

В уравнениях, определяющих вращательное движение оружия, приращения угловой скорости в результате удара рассматриваются в вертикальной (плоскости стрельбы) и горизонтальной плоскости (горизонте оружия) при соответствующих значениях моментов инерции оружия $J_{орвер}$, $J_{оргор}$ и соответствующих расстояниях H от линии удара до осей, проходящих через центр масс стрелка.

Блок-схема системы уравнений, определяющих движение автомата с отводом пороховых газов при выстреле, показана на рис. 2, где приведены составляющие общей системы уравнений и связь между ними, входные данные и выходные параметры для каждого элемента, а также результаты ее решения.

В основе системы лежит расчет ОЗВБ, расчет периода последствия и элементов движения ведущего звена автоматики, формирующие силовые факторы, приводящие к вращательному движению оружия относительно центра масс стрелка. В выходных данных приводятся отклонения оружия в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Разработанная модель использована для исследования пространственного движения автоматов линейки АК. Схема сил и плеч их действия для автомата АК-47 приведена на рис. 3.

В расчетной схеме рис. 3 указаны силовые факторы, определяемые в соответствии с работами [4–6]: $P_{кн}$ – сила давления пороховых газов на дно канала ствола; $F_{к}$ – сила давления пороховых газов на переднюю стенку газовой камеры; F_{ax} – сила действия горизонтальной составляющей от реакции струи газового узла; F_{ay} – сила действия вертикальной составляющей от реакции струи газового узла; $\Pi_{п}$ – сила реакции от сжимающейся пружины; $J_{кзп}$ – импульс удара подвижных частей в крайнем заднем положении; $J_{кпп}$ – импульс удара подвижных частей в крайнем переднем положении; $J_{отп}$ – импульс, передаваемый на оружие в начале отпирания затвора.

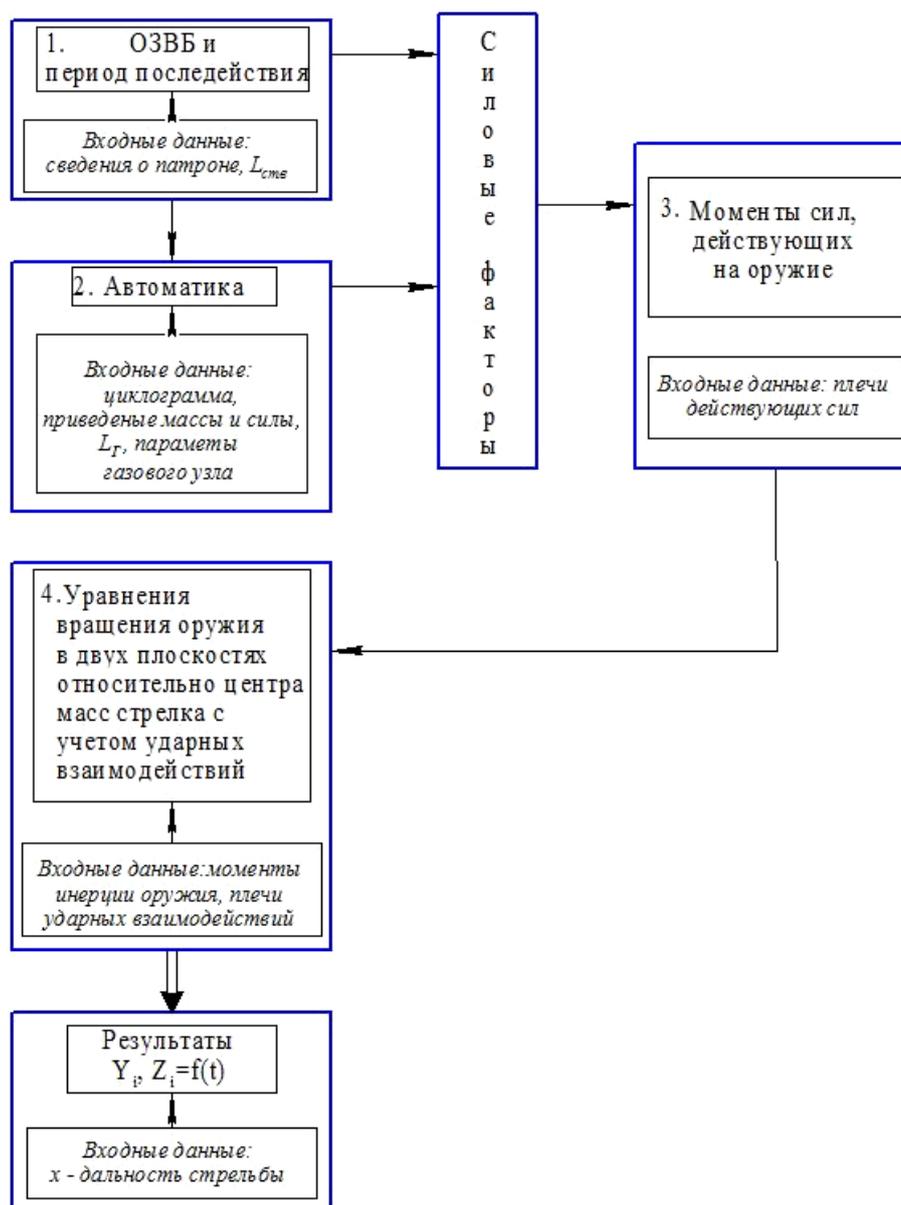


Рис. 2. Блок-схема системы уравнений

При использовании расчетной схемы с вращением оружия под действием силовых факторов относительно центра масс стрелка неизменными для всех систем являются плечи, определяющие расстояния от направления действия силы $P_{кн}$ при упоре в плечо до центра масс стрелка в горизонте оружия и от уровня плеча до центра масс стрелка в плоскости стрельбы, обозначенные в расчетной схеме рис. 3, соответственно, $h_5 = 0,23$ м и $l = 0,48$ м. Прочие силовые факторы и их удаление от центра масс определяются компоновкой механизмов автоматики.

Перемещения оружия в двух плоскостях рассчитаны при использовании системы уравнений, реализованной в программном продукте BGD_UST_Ch.exe кафедры «Стрелковое оружие» под названием «Программа расчета систематических ошибок стрельбы для оружия с отводом пороховых газов». Исходные данные заключены в блоках: баллистика, параметры БГД, автоматика, данные по образцу, силы.

В выходных данных приводятся результаты решения ОЗВБ, БГД, а также действующие силы в функции времени.

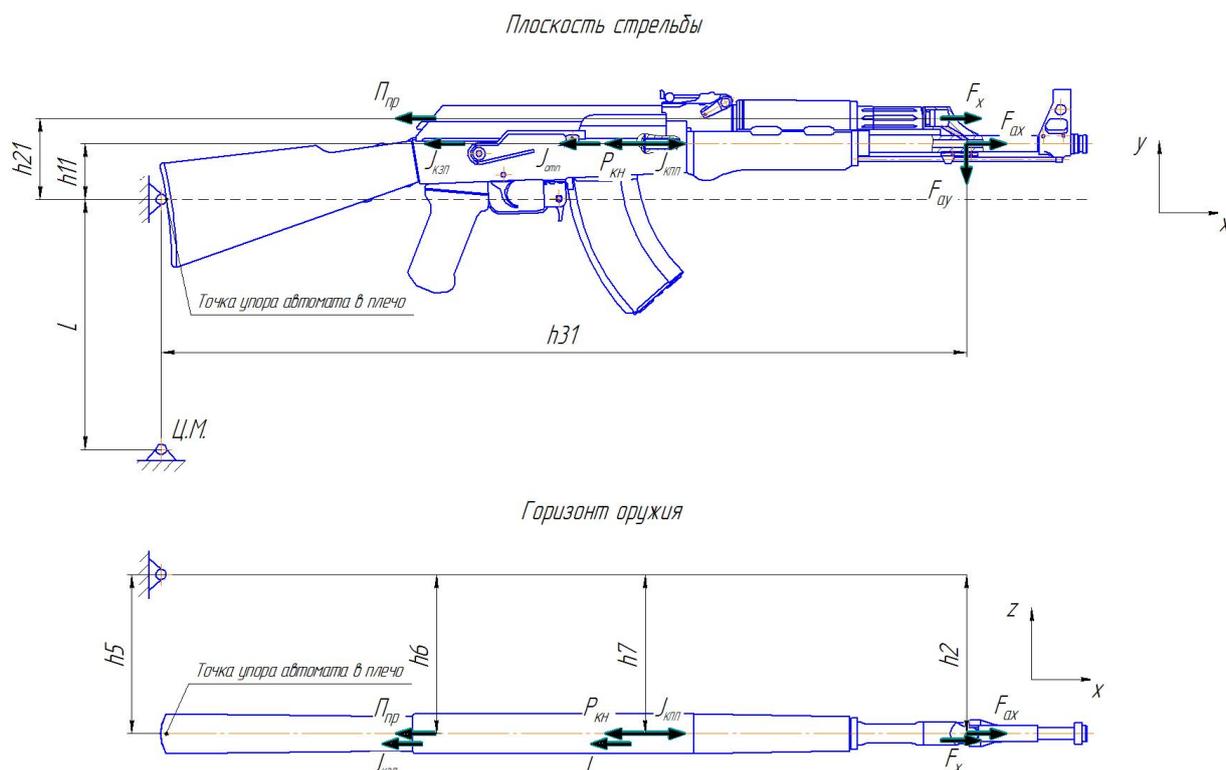


Рис. 3. Схема сил и плеч их действия для автомата АК-47

Итогом являются изменяющиеся во времени суммарный вращающий момент от сил, действующих на оружие, и координаты отклонений вследствие действия всех моментов в горизонте оружия Z и в плоскости стрельбы Y в соответствующие моменты времени. В программе особо выделены: начало работы двигателя автоматики, начало периода последствия, конец работы двигателя, конец отката и наката.

Разработанная модель использована для оценки эффективности мероприятий для стабилизации автомата в пространстве: уменьшение калибра с целью снижения импульса отдачи и использование дульных газовых устройств. Отклонения оружия от точки прицеливания для каждого из трех выстрелов очереди на дальности 10 м для автоматов линейки АК приведены в табл. 1.

Таблица 1. Систематические ошибки стрельбы из автомата на дальности 10 м

Образец	№ выстрела					
	1		2		3	
	Z, см	Y, см	Z, см	Y, см	Z, см	Y, см
АК-47	0,7	1,04	159,4	257,5	517,3	841,5
АКМ	0,81	1,2	137,1	218,8	437,2	763,4
АК-74	0,33	0,48	80,9	104	252,2	330
АК-74М	0,30	0,45	61,3	98,3	180,6	310,4

Эффективность решений по улучшению кучности стрельбы автоматов целесообразно оценить отношением площадей, описывающих отклонения третьих выстрелов в очереди, которые приведены в табл. 2 и показаны на рис. 4.

В табл. 2 дополнительно приведены сведения о калибре, массово-габаритных характеристиках образцов, наличии дульных газовых устройств.

Полученные результаты подтверждают эффективность использованных способов повышения кучности стрельбы автоматов: уменьшение калибра оружия, начиная с АК-74, использование дульных газовых устройств различного конструктивного исполнения во всех последующих после АК-47 образцах.

Таблица 2. Площади отклонений третьих выстрелов в очереди на дальности 10 м

Параметр	Образец			
	АК-47	АКМ	АК-74	АК-74М
Калибр d , мм	7,62	7,62	5,45	5,45
Масса образца M_{op} , кг	3,8	3,3	3,3	3,6
Длина образца L_{op} , м	0,878	0,880	0,943	0,943
Тип дульного газового устройства	Нет	Компенсатор	Дульный тормоз-компенсатор	Дульный тормоз-компенсатор
Отклонения по боку Z , см	517,3	437,2	252,2	180,6
Отклонения по высоте Y , см	841,5	763,4	330,0	310,4
Площадь отклонений S , см ²	435308	333768	83226	56058
$\frac{S_{AK-47}}{S}$	1	1,30	5,23	7,76

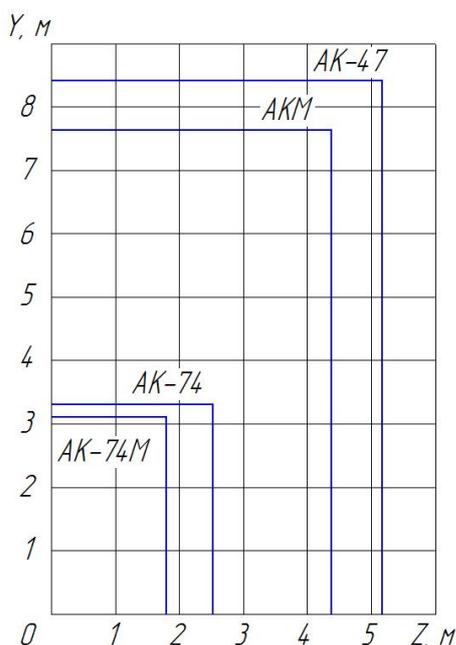


Рис. 4. Отклонения точек попадания третьих выстрелов в очереди от точки прицеливания вследствие пространственного движения оружия

Выводы

1. Предложена расчетная схема, разработана математическая модель и программный продукт, описывающие свободное пространственное движение оружия, характеризующие его устойчивость.

2. В качестве примера использования выполненных разработок:

– исследовано пространственное движение оружия с использованием дульных газовых устройств: компенсатор в АКМ, дульные тормоза-компенсаторы в последующих образцах линейки АК;

– получены конкретные значения перемещений оружия, показано их существенное уменьшение при движении от АК-47 до АК-74М.

Библиографические ссылки

1. Галаган Л. А., Чирков Д. В. Компенсаторы опрокидывающих моментов автомата АК-74 // Вестник ИжГТУ. 2012. № 2. С. 26–29.
2. Чирков Д. В. Исследование движения оружия при стандартной изготовке стрелка // Будущее машиностроения России : электронный сборник трудов всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2012.
3. Алексеев С. А. Проектирование автоматического оружия с инерционным запираем каналом ствола : учеб. пособие. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2007. 120 с.
4. Баллистика ракетного и ствольного оружия: учебник для вузов / под ред. А. А. Королева, В. А. Комочкова. Волгоград, 2010. 472 с.
5. Потанов Ю. П. Термогазодинамика автоматического оружия. М. : Машиностроение, 2009. 365 с.
6. Кулагин В. И., Черезов В. И. Газодинамика автоматического оружия. М. : ЦНИИ информации, 1985. 148 с.

References

1. Galagan L. A., Chircov D. V. [Compensators of overturning moments of AK-74]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2012, no. 2, pp. 26-29 (in. Russ.).
2. Chircov D. V. *Issledovanie dvizheniya oruzhiya pri standartnoi izgotovke strelka* [The study of the motion of the arms with the standard arrow ready]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii, elektronnyi sbornik trudov vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov* [Proc. The Future of Mechanical Engineering in Russia. Electronic collection of proceedings of the all-Russian conference of young scientists and specialists]. Moscow, MGTU imeni N. E. Bauman, 2012 (in. Russ.).
3. Alekseev S. A. *Proektirovanie avtomaticheskogo oruzhiya s inercionnim zapiraniem kanala stvola* [Design of automatic weapons with inertial locking of the barrel bore]. Izhevsk, Kalashnikov ISTU Publ., 2007, 120 p. (in. Russ.).
4. Koroliyov A. A., Komochkova V. A. *Ballistika raketnogo i stvolnogo oruzhiya* [Ballistics of missile and barrel weapons]. Volgograd, 2010, 472 p. (in. Russ.).

5. Potapov Iu. P. *Termogazadinamika avtomaticheskogo oruzhia* [Thermogasdynamics of automatic weapons]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 365 p. (in Russ.).

6. Kulagin V. I., Cherezov V. I. *Gazodinamika avtomaticheskogo oruzhiya* [Gas dynamics of automatic weapons]. Moscow, CNII informacii Publ., 1985, 148 p. (in Russ.).

The Mathematical Model of the Study of Free Movement of Weapons on the Example of Kalashnikov Assault Rifles

D. V. Chirkov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

L. A. Galagan, DSc in Engineering, Kalashnikov ISTU

R. Yu. Sakhratov, Design engineer, JSC "Techkrim"

The reason for the dispersion of shots in automatic shooting is the heterogeneity of the interaction of weapons, deviating from the point of sight under the influence of force factors, and the shooter compensating these deviations, if possible.

A mathematical model of the study of free (without the shooter) spatial movement of weapons, taking into account the gas-dynamic processes in weapons, emerging power factors, strikes at automation at their location outside the center of mass of the shooter.

In the calculation scheme of the mathematical model, the location of the center of rotation of the weapon, pressed to the shoulder and fixed relative to it, on the axis of symmetry of the shooter in the center of its mass when removing the shoulder thrust at objective distances along the side and height, characteristic for the average shooter. The location of power factors typical for the operation of automation is determined by the layout of the mechanisms of weapons. The force factors acting in the weapon and influencing its movement in space, creating tipping or stabilizing moments relative to the center of mass of the shooter, are indicated. The equations are made up for rotational motion of the weapon according to the shock interactions in the extreme positions of the bolt and when the bolt is unlocked, and kinematic equations defining the rotation angles of the weapon, and also deviation of hitting points falling from the aiming point. These elements are taken into account in the block diagram of the system of equations that determine the movement of the machine with the removal of powder gases. The output data are the values of the tipping moments and deviations from the point of sight of the weapon, allowing us to consider the stability of the weapon in shooting as a background scattering when the shooter is present.

The developed model is used to assess the effectiveness of measures to stabilize the AK-47 in space: reducing the caliber to decrease the impact pulse and the use of muzzle gas devices.

Keywords: automatic, force, overturning moments, mathematical model, deviation.

Получено: 30.08.18