

УДК 623.4.052

Методы повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела

Фёдорцев Р.В.¹, Шкадаревич А.П.², Ийд Кусай Мохамад^{3,1}, Фуфаев А.В.^{2,1}

¹Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

²Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО,
ул. Макаенка, 23, корп. 1, г. Минск 220114, Беларусь

³Дамасский университет,
Mousalam Baroudy, г. Дамаск, Сирийская Арабская Республика

Поступила 10.04.2018

Принята к печати 05.06.2018

Актуальной задачей производителей прицельной техники является разработка автономных моделей оптических прицелов, способных самостоятельно осуществлять измерение и анализ входных параметров в боевых условиях и на их основе вносить корректировки в систему наведения и механизмы прицеливания. Цель работы заключалась в исследовании методов повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела модели DNS-1 для стрелкового оружия посредством анализа степени влияния внешних факторов среды определяющих траекторию полета пули и точность ее попадания в цель.

Рассмотрен вариант практической реализации прицела DNS-1 со встроенным баллистическим вычислителем, учитывающим: скорость и направление ветра, угол места цели, температуру окружающей среды, относительную влажность и атмосферное давление. Проведена оценка жесткости и устойчивости конструкции прицела при креплении его на ствольной коробке по направляющей «ласточкин хвост» и на планке «Пикатинни». В варианте с планкой *Picatinny rail* нагрузки составляют меньшую величину и распределяются более равномерно вдоль линии корпуса прицела. Проведены расчеты траектории движения пули от патрона 7Н10 калибром 5,45 мм для АК-74Н на дистанциях 300 и 1000 м. На дистанции 300 м и при величине превышения 53,2 см угол бросания практически не меняется и находится в пределах 0,2°. Для дальних дистанций до 1000 м баллистический угол возрастает до 3°. Предложен метод измерения ветровой нагрузки с применением теплового анемометра на базе датчика *Dantec Dynamics 55P11*. Выполнена оптимизация конструкции корпуса анемометра и проведено моделирование ветровой нагрузки, получены распределения полей скорости ветра при аэродинамической продувке узла анемометра в диапазоне от 2 до 20 м/с. Предложен метод измерения угла места цели с применением акселерометра на базе датчика *SC4830-D07* с точностью 0,00179°.

Представленные результаты исследований показывают возможность создания комплексной автоматизированной системы управления огнем для стрелкового оружия.

Ключевые слова: величина поправки, баллистический вычислитель, анемометр, инклинометр.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

Адрес для переписки:

Фёдорцев Р.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: fedortsev@bntu.by

Address for correspondence:

Fiodortcev R.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: fedortsev@bntu.by

Для цитирования:

Фёдорцев Р.В., Шкадаревич А.П., Ийд Кусай Мохамад, Фуфаев А.В.
Методы повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 182–196.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

For citation:

Fiodortcev R.V., Shkadarevich A.P., Qusai Eid Mohammad, Fufaev A.V.
[Methods for increasing the efficiency of a dual-channel opto-electronic sight].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 182–196 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

Methods for increasing the efficiency of a dual-channel opto-electronic sight

Fiodortcev R.V.¹, Shkadarevich A.P.², Qusai Eid Mohammad^{3,1}, Fufaev A.V.^{2,1}

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

²Scientific Technical Center «LEMT» BelOMO,
str. Makayonka, 23, building. 1, Minsk 220114, Belarus

³Daamas University,
Mousalam Baroudy, Damascus, Syrian Arab Republic

Received 10.04.2018

Accepted for publication 05.06.2018

Abstract

The actual task of the aiming equipment manufacturers is to develop autonomous models of optical sights capable of independently measuring and analyzing input parameters in combat conditions and on their basis to make corrections to the guidance system and aiming mechanisms. The aim of the study was to investigate methods for increasing the efficiency of the dual-channel opto-electronic sight of the DNS-1 model for small arms by analyzing the degree of influence of external environmental factors determining the trajectory of a bullet flight and the accuracy of its hit into the target.

The variant of the practical implementation of the DNS-1 sight with an integrated ballistic computer, taking into account: wind speed and direction, target location angle, ambient temperature, relative humidity and atmospheric pressure is considered. Evaluation of the rigidity and stability of the sight design was made when fastening it to the receiver along the «swallowtail» guide and on the «Picatinny» bar. In the variant with Picatinny rail, the loads are smaller and distributed more evenly along the line of the body of the sight. Calculations of the trajectory of the bullet from the cartridge 7H10 with a caliber of 5.45 mm for the AK-74H at distances of 300 and 1000 m were carried out. At a distance of 300 m and at a value exceeding 53.2 cm, the throwing angle remains practically unchanged and lies within 0.2°. For long distances up to 1000 m, the ballistic angle increases to 3°. A method for measuring wind load using a thermal anemometer based on the Dantec Dynamics 55P11 sensor is proposed. Optimization of the anemometer housing design was performed and wind load simulation was performed, wind field velocity distribution was obtained in the aerodynamic blowdown of the anemometer assembly in the range from 2 to 20 m/s. A method is proposed for measuring the angle of the target site using an accelerometer based on the SCA830-D07 sensor with an accuracy of 0.00179°.

The presented research results show the possibility of creating a complex automated fire control system for small arms.

Keywords: magnitude of correction, ballistic calculator, anemometer, inclinometer.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

Адрес для переписки:

Фёдорцев Р.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: fedortsev@bntu.by

Address for correspondence:

Fiodortcev R.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: fedortsev@bntu.by

Для цитирования:

Фёдорцев Р.В., Шкадаревич А.П., Ийд Кусай Мохаммад, Фуфаев А.В.
Методы повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 182–196.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

For citation:

Fiodortcev R.V., Shkadarevich A.P., Qusai Eid Mohammad, Fufaev A.V.
[Methods for increasing the efficiency of a dual-channel opto-electronic sight].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 182–196 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

Введение

Современная концепция развития вооружений направлена на создание высокоточных прицелов и автоматизированных систем управления огнем (СУО) преимущественно для уничтожения дорогостоящей легкобронированной и бронетанковой техники [1]. Однако повышение эффективности поражения цели на 20–30 % такими средствами наведения приводит к увеличению массы и габаритных размеров изделия, а также к снижению ее мобильности [2]. Актуальной задачей любого производителя прицельной техники на современном этапе становится разработка таких моделей оптических прицелов, которые обеспечат максимальную автономность изделия с точки зрения его функционирования в боевых условиях, способность самостоятельно осуществлять оценку и измерение ряда параметров и на их основе вносить корректировки в систему наведения и механизмы прицеливания.

Такие направления успешно развиваются за рубежом. Например, агентство перспективных исследовательских проектов министерства обороны США *DARPA* в рамках проекта *EXACTO* по созданию высокоточного снайперского комплекса совместно с компанией *SNL* занимается разработкой корректируемых пуль калибра 12,7 мм для гладкоствольного оружия. Система управления осуществляет изменение траектории полета пули посредством лазерного луча в зависимости от скорости и направления ветра, погодных условий или местоположения стрелка относительно цели [3].

Другая американская компания *Tracking Point* представила макет компьютеризированного снайперского комплекса *PGF (Precision Guided Firearm* – высокоточное огнестрельное оружие). Стрелковое оружие оснащается специальным оптическим прицелом с электронным блоком управления, включающим модуль беспроводной сети, обеспечивающий его синхронизацию с планшетным компьютером на базе операционных систем *iOS* или *Android*. Вся информация о баллистических и метеорологических условиях ведения огня фиксируется на встроенном в прицел накопителе информации. Электронный блок, помимо модуля беспроводной сети, содержит метеорологические датчики (давления и температуры), баллистический калькулятор, компас, а также *USB*-порт

для подключения к персональному компьютеру [4]. Однако в данной модели не предусмотрена процедура автоматизированного ввода поправки на скорость ветра [5].

В зависимости от области применения большинство оптических прицелов получили определенные конструктивные специализации под конкретные виды оружия. Точность попадания в цель определяется качественной пристрелкой оружия на заданную дистанцию и зависит от ряда внешних и внутренних факторов. К внутренним факторам, как правило, относят конструктивные и технологические: жесткость посадки оптического прицела на планку ствольной коробки или его установку на направляющую тип «ласточкин хвост»; предельно допустимые значения винтовых механизмов вертикальной и горизонтальной выверки; устойчивость корпуса прицела и его внутренних составных компонентов к воздействию внешних знакопеременных нагрузок вследствие выстрела, ударов или падения; качество изготовления и сборки оптических деталей прицела; системы точного определения дистанции до объекта и многие другие. Внешние факторы определяются типом и маркой используемого боеприпаса и видом оружия, направлением действия и скоростью ветра, углом установки места цели, метеорологической дальностью видимости, температурой окружающей среды и периодом времени суток, а также прочими факторами, имеющими случайный и периодический характер. Учет большинства перечисленных выше факторов требует определенного уровня профессиональной подготовки и навыков от стрелка, а также подразумевает наличие у него значительный практического опыта в этой области.

Цель работы заключалась в разработке методов повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела посредством анализа степени влияния внешних факторов среды определяющих траекторию полета пули и точность ее попадания в цель.

Объект исследования

В качестве базового варианта конструкции рассмотрим двухканальный оптический прицел марки *DNS-1*, выпускаемый Научно-техническим центром «ЛЭМТ» БелОМО. Основные оптические и механические параметры прицела приведены в таблице 1.

Таблица 1/ Table 1

Основные тактико-технические характеристики прицела DNS-1

The main tactical and technical characteristics of the sight of DNS-1

Наименование параметра Parameter name	Дневной канал Day channel	Ночной канал Night channel
Видимое увеличение, крат Visible magnification, times	2,9	2,9
Угловое поле зрения, угл. град Angular field of view, angular hailstones	11	12
Фокусное расстояние объектива, мм Focal length of the lens, mm		80
Относительное отверстие Relative aperture (F-number /T-number)	–	1,67/1,8
Удаление выходного зрачка, мм Removal of exit pupil, mm		30
Диапазон диоптрийной настройки, дптр. Diopter adjustment range, diopter		–5... +5
Диапазон выверки, угл. град Reconciliation range, angular degrees		±1
Шаг выверки, угл. мин Step of alignment, angular mines	1 (3 см на дистанции 100 м) 1 (3 cm at a distance of 100 m)	
Напряжение питания, В Supply voltage, V		3 (2×1,5)
Габаритные размеры, мм: Overall dimensions, mm:		
исполнение 1 execution 1		240×195×81
исполнение 2 execution 2		240×115×79
Масса с элементами питания, кг: Weight with batteries, kg:		
исполнение 1 execution 1		1,3
исполнение 2 execution 2		1,2
Диапазон рабочих температур, °C Operating temperature range, °C		–40... +50
Типы оружия, на которые устанавливается: Types of weapons that are installed:	Стрелковое оружие с боковой планкой типа «ласточкин хвост» Small arms with a side bar of the «swallowtail» type	
исполнение 1 execution 1	стрелковое оружие с планкой типа «Picatinny rail» Small	
исполнение 2 execution 2	arms with a bar like «Picatinny rail»	

Прицел содержит два параллельных комбинированных канала для круглосуточного наблюдения и прицеливания (рисунок 1).

Дневной канал работает в видимом спектральном диапазоне и включает следующие оптические элементы: телеобъектив 1–2, сетку 3, пятикомпонентную линзовую оборачивающую систему 4–8 и призму AP-90° 9 для поворота оптической оси. Ночной канал рассчитан на работу в пассивном режиме. Ночной канал включает: четырехкомпонентный объектив 10 большой апертуры и электронно-оптический преобра-

зователь (ЭОП) 3-го поколения 11 ЭПМ105Г-02-22А. В качестве системы защиты ночного канала от ярких источников засветки, а также для проверки работоспособности ЭОП в конструкции прицела предусмотрен фотоприемник 14, определяющий уровень освещенности объектов и фона и отключающий канал при превышении порогового значения. Изображения, формируемые в дневном и ночном каналах, проецируются на диагональную грань светоделительной куб-призмы К-0° 12 и далее посредством окуляра Эрфле 13 переносятся в плоскость выходного зрачка.

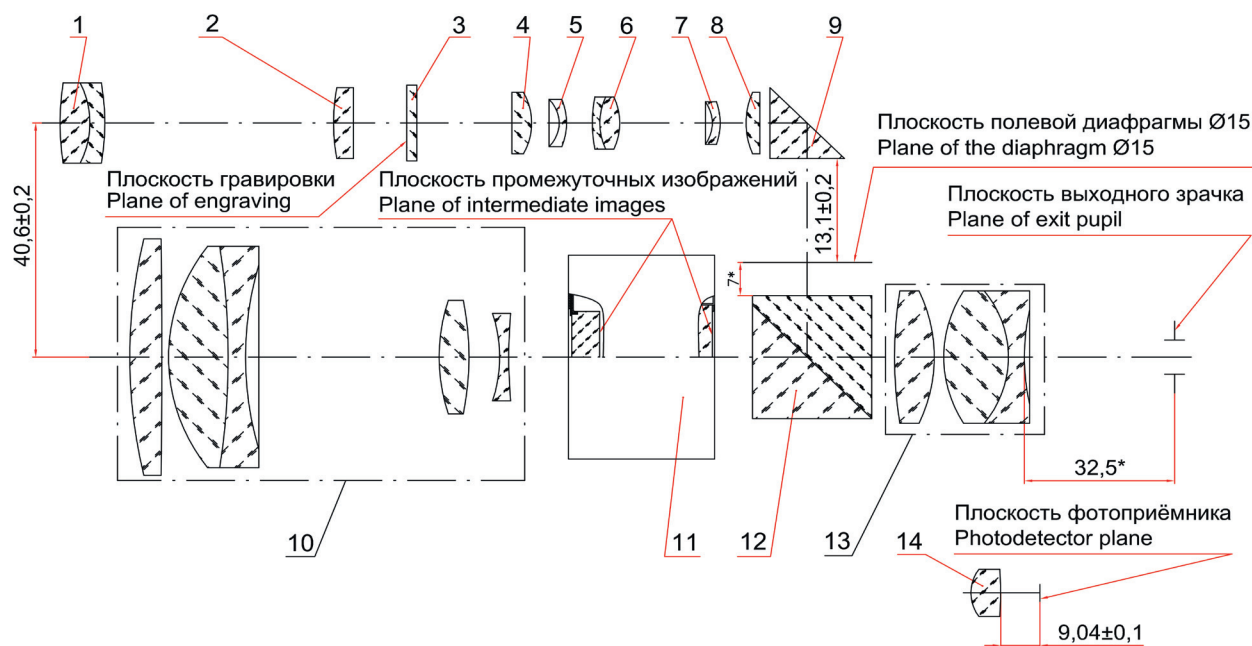


Рисунок 1 – Оптическая схема прицела DNS-1
Figure 1 – Optical Scope of the DNS-1

Существует две модификации оптического прицела по элементам крепления на ствольной коробке: «исполнение 1» боковое – на планку типа «ласточкин хвост» (*dovetail*) шириной 14,5 мм для установки на штурмовые винтовки АК (автомат Калашникова) всех модификации, пистолеты-пулеметы АКС-74УН, ПП-19 «Бизон-2», пулеметы РПКН, ПКН, ПКМН и другие, или «исполнение 2» верхнее – с планкой типа *Picatinny rail* (*MIL-STD-1913*) для АК-12. Для повышения жесткости конструкции кронштейн с направляющими планками «ласточкин хвост» имеет монолитное исполнение с корпусом оптического прицела, два встроенных шарнира и поворотный рычаг обеспечивают точную установку прицела относительно ствола оружия, его надежную фиксацию и быструю смену при необходимости. В варианте конструкции с планкой *Picatinny rail* оптический прицел имеет возможность передвижения по рельсу вперед-назад или жесткой фиксации посредством болтов, тисков или рычагов. Для крепежных стяжек, а также во избежание смещения закрепленного прицела при отдаче и деформации крепления при термическом расширении и охлаждении ствола во время стрельбы в планке через равные промежутки проделаны поперечные прорезы, размеры которых стандартизированы *NATO Accessory Rail STANAG 4694*.

Программные методы оценки жесткости элементов конструкции прицела

Устойчивость оптического прицела к воздействию внешних знакопеременных нагрузок определяется величиной отдачи, включающей следующие взаимосвязанные параметры: импульс, энергию, силу и мощность (ГОСТ 28653-90). В соответствии с третьим законом Ньютона импульс отдачи I_b (выстрела) рассматривается как внутренняя сила, действующая вследствие движения пули v_b и порохового заряда:

$$I_b = \frac{m_b}{g} \left(1 + \frac{v_g}{2g} n_\omega v_0 \right) v_0,$$

где m_b – масса пули; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $v_g = 1275 \text{ м/с}$ – скорость истечения газов из канала ствола; $n_\omega = (8-10) \cdot 10^{-6} \text{ кг/Дж}$ – коэффициент использования порохового заряда; v_0 – начальная скорость пули, м/с.

Примерные соотношения между начальной скоростью пули, ее весом и величиной импульса отдачи представлены в источнике [6].

Энергия отдачи E_{rec} характеризуется степенью воздействия оружия на стрелка после выстрела:

$$E_{rec} = \frac{g}{2m_{weap}} I_b^2,$$

где m_{weap} – масса оружия.

При выстреле возможно три варианта удержания оружия в положении: лежа, сидя или стоя. Рассмотрим наименее устойчивый случай – положение стоя с удержанием оружия и прицела на вытянутых руках. При средней массе тела стрелка 70 кг вес его рук составляет примерно 5,7 % ($m_h = 4$ кг) от общей массы тела. Тогда для обеспечения устойчивости при стрельбе необходимо выполнение условия:

$$g_{act} = \frac{a_b \cdot m_b}{m_{weap} + 2 \cdot m_h} < g_{lim},$$

где $a_b = \frac{v_0^2}{2\ell}$ – ускорение пули, ℓ – длина ствола оружия; g_{lim} – предельно допустимое значение перегрузки (возможность удержания оружия в руках). В таблице 2 представлены результаты расчетов фактических значений перегрузки g_{act} для различных моделей стрелкового оружия, на которых возможна установка оптического прицела марки DNS-1. Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении калибра патрона, а также длины ствола оружия фактическое значение перегрузки существенно снижается и, как следствие, уменьшается воздействие ударных нагрузок на элементы крепления оптического прицела. Кроме того, в процессе проведения расчетов на прочность закладывается коэффициент запаса уровне $k = 1,5-2$, что обеспечивает дополнительную надежность изделия в ходе эксплуатации.

Таблица 2/Table 2

Основные характеристики стрелкового оружия и боеприпасов

Main characteristics of small arms and ammunition

Тип и модель оружия Type and model of weapons	Размеры патрона (калибр×длина), мм Dimensions of the cartridge (gauge×length), mm	Масса пули m_b , грамм Bullet weight m_b , grams	Масса оружия m_{weap} , грамм Mass of weapons m_{weap} , gram	Длина ствола оружия ℓ , мм Length of the barrel of the weapon ℓ , mm	Начальная скорость пули v_0 , м/с Initial velocity of the bullet v_0 , m/s	Длительность импульса (время выстрела) t , мс Pulse width (shot time) t , ms	Фактическое значение перегрузки g_{act} Actual overload value g_{act}
АКМ-74	5,45×39	3,56...3,62	3300	372	870...910	0,9	35
АК-74У	5,45×39	3,20...3,23	2700	207	300...303	0,6	42
ПП-19 Бизон-2 Bison-2	9×18	6,1	2700	230	320	0,7	13
РПКН	7,62×39	8,2	5000	590	745	1,0	30

В программном пакете *SolidWorks* выполнено 3D-моделирование конструкции оптического прицела DNS-1 в двух модификациях элементов крепления. В программном пакете *Solid Simulation* проведен комплекс численных исследований на ударную устойчивость и вибропрочность оптического прицела при воздействии различного рода знакопеременных нагрузок. Критерием оценки устойчивости конструкции являлось соблюдение условия

$\sigma_v \geq \sigma_y$. Оценка предельно допустимой величины воздействия деформаций σ_v осуществлялась по анализу напряжений фон Мизеса возникающих в материале корпуса прицела, изготовленного из сплава алюминия с магнием и медью и дополнительно подвергнутого термообработке. Для материала Д16Т напряжение при относительном растяжении 0,2 % составляет 28 кг/мм² и напряжения смятия при относительной деформации 0,2 % – 35 кг/мм².

В варианте «исполнение 1» оптический прицел условно фиксировался по трем отверстиям $\varnothing 4,1$ мм для закрепления заклепками в направляющей боковой планке на ствольной коробке. В варианте «исполнение 2» оптический прицел закрепляли сверху на планке *Picatinny rail* по двум отверстиям $\varnothing 4,1$ мм. Направление действия ударного ускорения совпадало с оптической осью прицела. Расчет проводили для АК74 с учетом заложенного коэффициента запаса $k = 2$, величина ускорения задавалась на уровне 80 g.

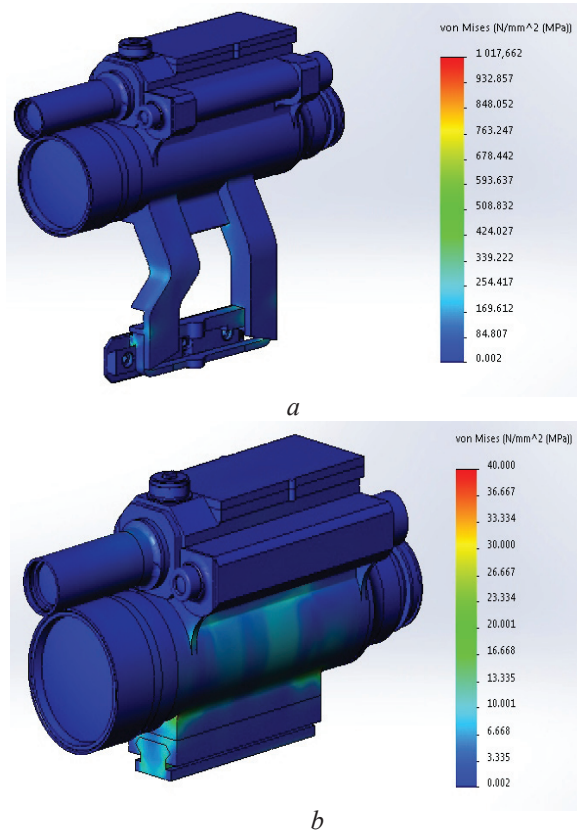


Рисунок 2 – Эпюры распределения напряжений деформации фон Мизеса для варианта исполнения оптического прицела с механизмом крепления: «ласточкин хвост» (a) и планка *Picatinny rail* (b)

Figure 2 – Diagrams of von Mises strain strain distribution for the version of the optical sight with the fastening mechanism: «dovetail» (a) and «Picatinny rail» (b)

Как видно из результатов моделирования, для варианта исполнения «ласточкин хвост» (рисунок 2a) локальными зонами концентрации нагрузок на уровне $\sigma_y = 1,76 \cdot 10^{-7}$ Н/м² являются отверстия для фиксации планки винтами и внешние ребра кронштейна, что объясняется смещением суммарного центра масс в верхнюю часть оптического прицела относительно механизма его крепления. В варианте конструкции планка *Picatinny rail* (рисунок 2b)

нагрузки составляют меньшую величину на уровне $\sigma_y = 1,2 \cdot 10^{-9}$ Н/м² и распределяются более равномерно с обеих сторон вдоль линии корпуса прицела и той его части в которой размещен механизм крепления.

Результирующие перемещения элементов конструкции прицела при расчете устойчивости для обоих случаев представлены на рисунке 3a и b. При креплении по направляющим «ласточкин хвост» максимальные перемещения $URES = 0,82$ мм характерны для крайних точек изделия на оправе окуляра, крышке корпуса обрачивающей системы и оправе телеобъектива дневного канала. При креплении по направляющим *Picatinny rail* максимальные деформации $URES = 0,074$ мм наблюдаются на оптической поверхности первой линзы объектива ночного канала. Сравнение указанных предельных параметров показывает, что во втором случае максимальные деформации на порядок ниже.

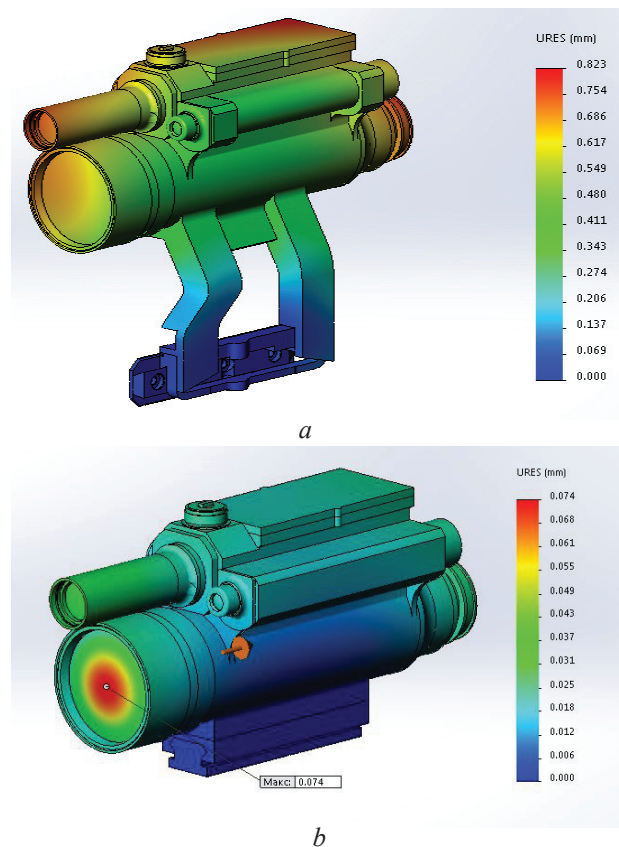


Рисунок 3 – Эпюры перемещения элементов прицела для варианта исполнения оптического прицела с механизмом крепления: «ласточкин хвост» (a) и планка *Picatinny rail* (b)

Figure 3 – Diagrams for moving the sight elements for the version of the optical sight with the fastening mechanism: «dovetail» (a) and «Picatinny rail» (b)

В целом оба варианта конструкции оптического прицела способны выдержать ударную нагрузку при указанных значениях, что подтверждается результатами проведенной серии лабораторных испытаний опытных образцов изделий на ударном стенде «ELSTAR-STM50». Прицелы подвергались воздействию 100 механических ударов в направлении оптической оси с ускорением 3000 м/с^2 (300 g) и длительностью импульса от 0,5 до 2,0 мс.

Определение баллистических параметров

Точность наводки оружия на цель определяется точностью расчета баллистической траектории движения пули и степенью воздействия внешних факторов среды. Для решения этой задачи осуществляют предварительный математический расчет значений по пристрелке оружия с учетом различных дистанций и углов стрельбы, а также скорости ветра. Полученные численные значения в виде поправок в последующем выставляются на механизме горизонтальной и вертикальной выверки оптического прицела. Цель работы заключалась в разработке портативной конструкции модуля баллистического вычислителя на основе расчетных данных полученных в ходе численных методов исследования в программных пакетах «Баллистический калькулятор 2.44» и *Ballistic Explorer Ver 6*.

В исходные данные были заложены параметры, учитывающие скорость v_w и направления ветра, а также наклонение оси визирования относительно линии горизонта ε .

Принцип работы баллистического калькулятора рассмотрим на примере расчета траектории движения пули от патрона 7Н10 калибром 5,45 мм для штурмовой винтовки АК-74Н с боковой планкой для установки ночного оптического прицела [7]. Исходными данными для расчета выступали следующие параметры: масса патрона – 3,43 г; начальная скорость пули $v_b = 880 \text{ м/с}$. Переменными данными являлась дистанция пристрелки АК-74Н, которая выбиралась $D = 100, 200$ и 300 м .

Пристрелка оптического прицела на дистанции 100 м обеспечивает наилучшую видимость прицельной сетки и мишени при фокусировке. На прицелах с отстройкой параллакса, на барабанчиках механизма выверки поправки вводится в угловых минутах соответствующих величине смещения (в см) на дальность дистанции $D = 50, 100, 200, 300, \dots, 1000 \text{ м}$.

Исходя из баллистических особенностей траектории движения, пуля на ближней дистанции 100–200 м имеет стабильные показания баллистики и на дистанции 300 м сохраняет эффективную энергию выстрела 657 Дж. С увеличением дистанции до 1000 м энергия уменьшается почти в 6 раз и составляет около 118 Дж.

На рисунке 4 представлены результаты расчета баллистики пули летящей до цели, установленной на дистанции 300 м без введения поправок. Исходя из величины превышения 53,2 см баллистический угол (бросания) практически не меняется и находится в пределах $0,2^\circ$.

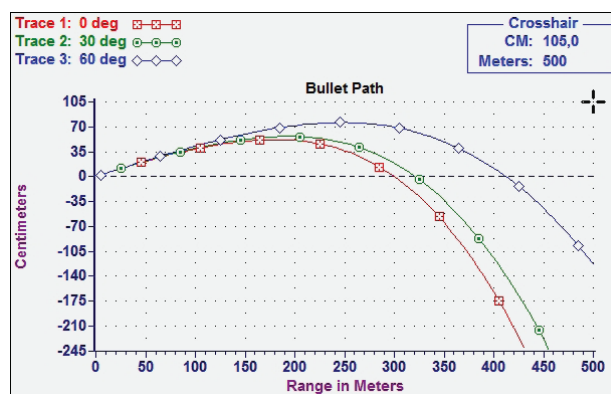


Рисунок 4 – Траектория пули на дистанции 300 м при наклонении оси визирования «без поправки»: пуля 1 при $\varepsilon = 0^\circ$ (красный); пуля 2 при $\varepsilon = 30^\circ$ (зеленый); пуля 3 при $\varepsilon = 60^\circ$ (синий)

Figure 4 – The trajectory of the bullet at a distance of 300 m when the axis of sight is tilted «without correction»: bullet 1 at $\varepsilon = 0^\circ$ (red); bullet 2 at $\varepsilon = 30^\circ$ (green); bullet 3 at $\varepsilon = 60^\circ$ (blue)

Из анализа полученных значений видно, что для дальних дистанций до 1000 м баллистический угол возрастает соответственно до 3° (рисунок 5).

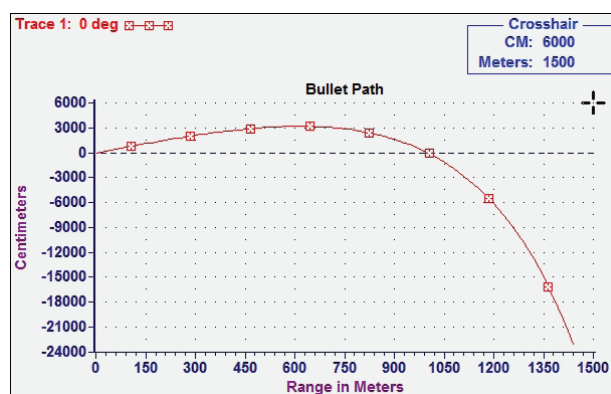
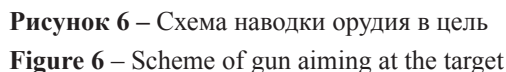


Рисунок 5 – Траектория движения пули на дистанции 1000 м при угле наклона ствола оружия 0 градусов

Figure 5 – The trajectory of the bullet movement at a distance of 1000 m with the angle of the weapon's trunk 0 degrees

Если пуля летит строго навстречу ветру направление [северное (12:00) – южное (06:00)], ее скорость уменьшается и пробоина в мишени будет расположена ниже. Если пуля летит попутно направлению ветра [южное (06:00) – северное (12:00)], ее скорость возрастает; для действия силы тяжести остается меньше времени, и пробоина в мишени будет расположена выше. Однако отклонение, связанное с этим компонентом вектора скорости ветра, можно игнорировать. Поскольку при скорости ветра 10 и 20 м/с это отклонение составляет только 0,5 и 1,0 угловую минуту. Выставить такие значения на оптическом прицеле *DNS-1* не представляется возможным, так как один щелчок механизма выверки обычного равен 1 угловой минуте, а максимальное значение 1,4 угловых минут соответствует скорости ветра 28 м/с, при котором объекты внешней среды уже становятся неустойчивыми. Компенсация этих отклонений всегда выполняется с помощью горизонтального механизма выверки, чтобы переместить вершину прицельного угольника сетки прицела направо, когда направление ветра (09:00→03:00), и налево, когда направление ветра (В→З) (рисунок 7).



В ходе исследований установлено, что скорость ветра в перпендикулярном направлении [западное (09:00) – восточное (03:00)] и наоборот [восточное (03:00) – западное (09:00)] оказывает существенное влияние на траекторию полета пули. Так, например, при спокойной силе ветра на уровне 2–4 м/с величина смещения пули на дистанции 100 м составит $z = 2,9$ см (1 клик), на 200 м – $z = 11,7$ см (2 клика), на 300 м – $z = 26,2$ см (3 клика). При порывистом ветре порядка 15–16 м/с эти показатели уже составят: на 100 м – $z = 11,6$ см (4 клика), на 200 м – $z = 46,6$ см (8 кликов), на 300 м – $z = 113,7$ см (13 кликов). В механизме выверки прицела *DNS-1* один клик маховика равен 1 угловой минуте, а общий

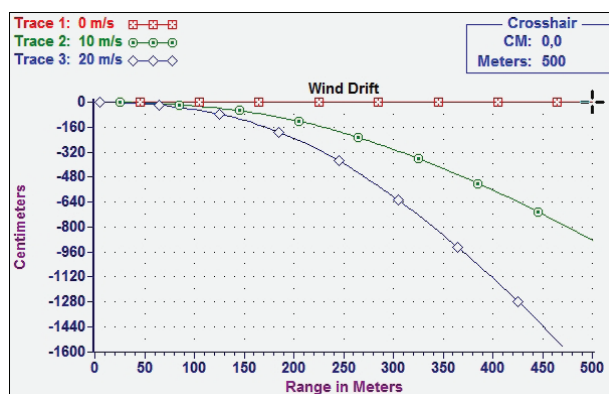


Figure 7 – The trajectory of the bullet to the target at a distance (300 m) with the wind drift «without correction» in the direction (09:00→03:00): bullet 1 at a wind speed of 0 m/s (red); bullet 2 at a wind speed of 10 m/s (green); bullet 3 at a wind speed of 20 m/s (blue)

Обычно диапазон выверки механизмов прицела составляет $\pm 1^\circ$ (или ± 60 угловых минут), поэтому нет возможности исправлять отклонения баллистической пути пули при дрейфе ветра при значении отклонения больше (60 угловых минут).

Методы измерения ветровой нагрузки

Скорость ветра оценивается в м/с по шкале Бофорта у поверхности земли на высоте 10 м. Традиционные методы измерения указанных параметров предусматривают беспроводное подключение автономных метеостанций типа *Kestrel*. Инновационными разработками являются внешние баллистические калькуляторы *Vampire Solo* от компании ЗАО «Инновационные оружейные технологии» (*IWT*), в которых ввод метеоданных о силе и направлении ветра, параметрах температуры окружающей среды, атмосферном давлении и влажности осуществляется ультразвуковым способом посредством беспроводного подключения [8].

Для измерения скорости ветра в конструкции разрабатываемого оптического прицела целесообразно использовать встроенный тепловой анемометр, отличающийся небольшими габаритными размерами и высокой чувствительностью. Принцип действия анемометра основан на увеличении тепловых потерь нагретого тела при увеличении скорости обдувающего более холодного газа. В качестве регистрирующего сенсора используется открытая тонкая металлическая проволока, нагреваемая выше температуры окружающей среды электрическим током.

Проволока изготавливается из металла с положительным температурным коэффициентом сопротивления. При установке в измерительном модуле оптического прицела *DNS-1* с открытым сквозным окном и контакте с проходящим воздушным потоком наиболее важным параметром является прочность на растяжение при максимальной скорости ветра. Оптимальным вариантом для практической реализации в данном случае является применение проволоки из вольфрама, обеспечивающей по сравнению с другими материалами (платина, родий, иридий и никель) наилучшую прочность на растяжение 250 N/cm² и теплопроводность 1,78 W/cm/K.

Односенсорный миниатюрный зонд проволока из вольфрамовой нити подвешен между двумя зубцами, нанесенными на электроизолирующую подложку. Ось зонда перпендикулярна направлению воздушного потока. Конвективный теплообмен Q между проволокой и внешней средой является функцией скорости ветра v_w :

$$Q = (T_w - T_0) \cdot A_w \cdot h = A + Bv_w^n,$$

где T_w и T_0 – соответственно температура на поверхности проволоки и проходящего воздушного потока; A_w – площадь поверхности проволоки; h – коэффициент теплопередачи материала проволоки; $n \approx 0,5$ – коэффициент скорости ветра; A и B – калибровочные константы.

Датчик скорости воздушного потока и датчик температуры образуют две противоположные ветви моста «Уитстона» (рисунок 8).

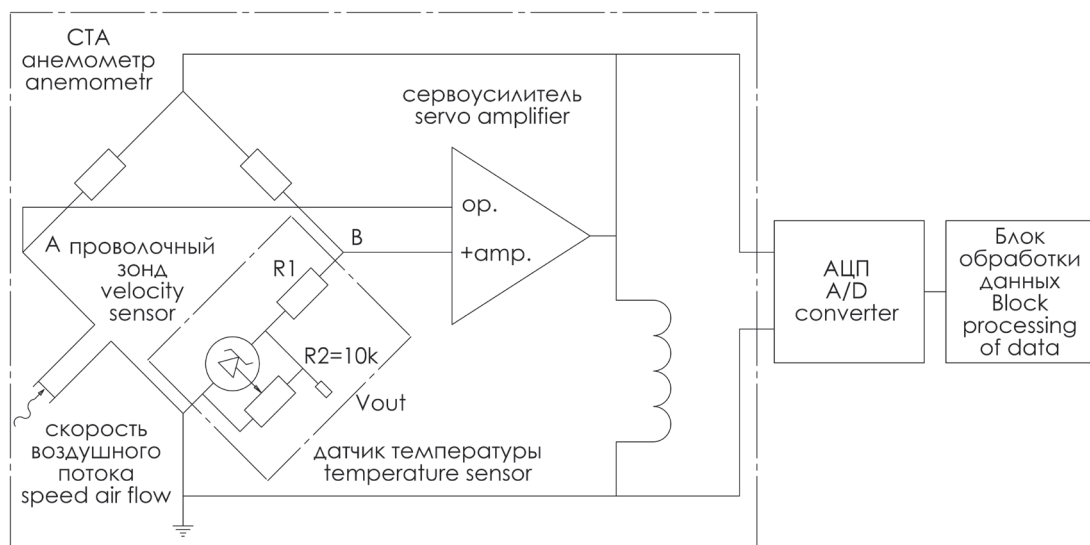


Рисунок 8 – Структурная схема анемометра на базе встроенного датчика температуры

Figure 8 – Structural diagram of an anemometer based on an integrated temperature sensor

Напряжение в точках *A* и *B* выравнивается посредством операционного сервоусилителя. Воздушный поток, проходящий через проволочный зонд, охлаждает датчик скорости и тем самым снижает его сопротивление. Операционный усилитель реагирует сразу же, подавая больше энергии на вершину моста, чтобы поддерживать равновесие напряжения в точках *A* и *B*. Таким образом, мощность, идущая в верхнюю часть моста, связана со скоростью потока воздуха, проходящего через датчик.

В конструкции оптического прицела *DNS-1* анемометр построен базе миниатюрного датчика *Dantec Dynamics* модели 55P11 [9, 10]. В программном пакете *SolidWorks* разработана 3D-модель измерительного узла и в расчетном модуле *Flow Simulation* выполнено моделирование распределения ветровой нагрузки.

В качестве постоянных параметров были заданы: давление 101325 Па (нормальное, СИ) и температура окружающей среды 293,2 К ($\approx 20^\circ\text{C}$). Направление действия ветра выбиралось по оси *Z* и соответствовало скорости -20 м/с [западное (09:00) – восточное (03:00)] и 20 м/с [восточное (03:00) – западное (09:00)]. Сила ветра задавалась дискретно, значения выбирались в середине диапазона по шкале Бофорта: 2 (легкий), 4 (слабый), 7 (умеренный), 12 (сильный), 20 (крепкий) м/с.

В интервале между двумя проволочными зондами (1,25 мм) с шагом 0,06 мм были размещены 20 сенсоров имитирующих длину вольфрамовой проволоки толщиной 5 мкм.

Для повышения точности измерения производилось наложение локальной сетки с минимальным шагом в плоскости размещения сенсоров. По итогам проведения расчетов проводилось усреднение значений скорости ветра с каждого сенсора. Проведена оптимизация формы сквозного окна и корпуса крепления анемометра. Наилучшим конструктивным исполнением являются размеры окна высотой 3,2 мм и шириной 3 мм и скругление кромок радиусом 0,3 мм.

На рисунке 9 представлено распределение полей скорости ветра при аэродинамической продувке узла анемометра со скоростью 20 м/с.

Результаты моделирования показали эффективность пропускания воздушного потока на уровне $20,55$ м/с, что соответствует среднему отклонению от заданного исходного параметра в $2,75\%$.

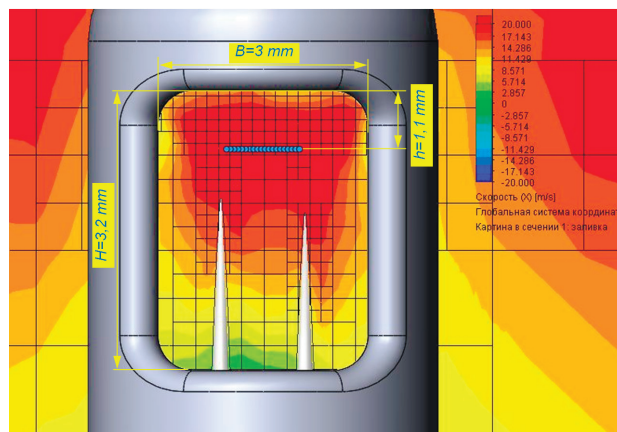


Рисунок 9 – Распределение полей скорости ветра при аэродинамической продувке узла анемометра со скоростью 20 м/с

Figure 9 – Distribution of wind speed fields during aerodynamic blowing of the anemometer assembly at a speed of 20 m/s

Методы измерения угла места цели

Измерение угловых характеристик объекта в пространственном расположении и нахождении его в статическом состоянии осуществляется посредством применения инклинометров на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС). Однако для динамически подвижных объектов показания датчика зависят также от величины ускорений. Поэтому в ряде случаев инклинометр входит в состав комплексных систем измерения, содержащих акселерометры и устройства обработки информации с датчиков. Так, например, в дорогостоящих автоматизированных тепловизионных прицельных комплексах *IWT DEMON* или тепловизионных насадках *IWT NANO* измерение угла места цели осуществляется посредством применения трехосевых гироскопов и акселерометров, установленных на внешнем баллистическом калькуляторе *VAMPIRE SOLO*. Стоимость таких изделий находится на уровне $\$12500$.

В оптическом прицеле *DNS-1* измерение угла места цели может быть реализовано посредством применения двухосевого датчика, определяющего положение оси прицела в плоскости *XOZ* (см. рисунок 6). Датчик включает пробную массу, к которой подсоединены подвижные электроды, расположенные между двумя неподвижными электродами. Уравновешивание системы обеспечивают пружинные элементы. Когда инклинометр находится строго в горизонтальном

положении, измеряемая емкость между всеми электродами является постоянной. При наклоне пробной массы на угол ε расстояние между подвижными и неподвижными электродами изменяется и датчик фиксирует результирующее значение емкости.

Наибольшая эффективность работы инклинометра проявляется на больших дистанциях,

когда расстояние ОБ до объекта составляет порядка $D = 1000$ м, а высота его размещения ВЦ может быть на уровне 3–6 м (см. рисунок 6). В этом случае угол места цели в среднем находится в пределах $\varepsilon = 0,1719^\circ - 0,3437^\circ (10' - 20')$. Наилучшей чувствительностью обладают датчики моделей *SCA830-D07* или *SCA61T-FA1H1G* (таблица 3).

Таблица 3/Table 3

Основные технические характеристики двухосевых инклинометров

The main technical characteristics of two-axis inclinometers

Наименование параметра Parameter name	SCA830-D07	SCA61T-FA1H1G
Диапазоны измерений Measuring ranges	$\pm 90^\circ$	$\pm 90^\circ$
Предел разрешения измерений Limit of measurement resolution	0,00179°	0,0025°
Напряжение питания Supply voltage	3,3 V	5 V
Стойкость к удару Resistance to shock	20000 g	20000 g
Монтаж SMD Mounting SMD	Да/yes	Нет/no
Габаритные размеры (Д×Ш×В) Overall dimensions (L×H×W)	7,6×3,3×8,6 mm	11,31×5,08×10,48 mm

Из двух рассмотренных вариантов предпочтительным является модель *SCA830-D07*, отличающаяся меньшими габаритными размерами и доступностью технологии поверхностного монтажа *SMD*. Один из вариантов схемы подключения и управления трехосевым инклинометром приведен в работе [11].

Средства визуализации измеренных входных и выходных параметров

Таким образом, баллистический вычислитель включает следующие измерительные модули:

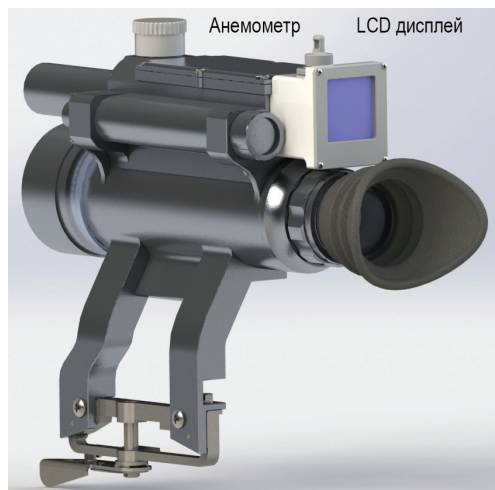
- анемометр *Dantec Dynamics* модели 55P11 – для измерения скорости v_w и направления ветра;
- инклинометр модели *SCA830-D07* – для измерения угла места цели ε ;
- счетчик выстрелов на базе пьезоэлектрического датчика модели *Murata PKGS-00LDPI-R* – для своевременного контроля количества оставшихся боеприпасов в оружии;
- метеостанцию в составе малогабаритного дат-

чика измерения относительной влажности воздуха и температуры модели *SHT21 Sensirion AG* и миниатюрный барометрический пьезорезистивный датчик измерения атмосферного давления модели *BMP280 Bosch Sensortec*;

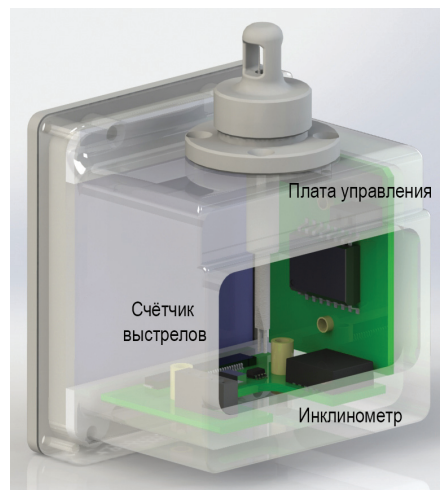
– экран отображения выходной информации модели 1.44" *TFT Serial SPI 128×128 LCD Display Module w/ST7735S* – для точного ввода значений вертикальных и горизонтальных поправок (по количеству кликов) в механизм выверки;

– блок управления и синхронизации параметров на базе микроконтроллеров *ATmega328P* и *Sitronix ST7735S*.

Вариант компоновки измерительного модуля обработки данных как составной части оптического прицела *DNS-1* представлен на рисунке 10. Модуль размещается над окуляром на уровне выходного зрачка. При транспортировке входное окно анемометра закрывается защитным колпачком для предотвращения попадания внутрь посторонних предметов и повреждения проводочного зонда датчика.



a



b

Рисунок 10 – Вариант установки баллистического вычислителя на оптическом прицеле *DNS-1* (a) и внутренняя компоновка измерительных модулей (b)

Figure 10 – The option of installing a ballistic calculator on the optical sight of *DNS-1* (a) and the internal arrangement of the measuring modules (b)

На *LCD* экране отображаются измеренные значения: температуры, атмосферного давления, относительной влажности; скорости ветра v_w и соответствующая ему величина вносимых горизонтальных поправок в кликах на дистанциях 100, 200 и 300 м; измеренное значение угла места цели ε в градусах и соответствующая ему величина вносимых вертикальных поправок в кликах на тех же дистанциях; общее N_{total} и оставшееся N_{rem} количество патронов в магазине оружия (рисунок 11).

T=20°C	P=101 325 Pa	RH=8%
(9→3)	V_w = 10 м/с	ε = 20°10'
D₁₀₀:	n_h = 8 кл.	n_v = 0 кл.
D₂₀₀:	n_h = 20 кл.	n_v = 0 кл.
D₃₀₀:	n_h = 34 кл.	n_v = 1 кл.
N_{total}	30 bullet	
N_{rem.}	20 bullet	

Рисунок 11 – Последовательность отображения выходных данных на экране баллистического вычислителя

Figure 11 – Sequence of output data display on ballistic computer screen

Задача снайпера в конечном итоге сводится к выставлению необходимых значений вертикальных и горизонтальных поправок на бараба-

нах механизмов выверки оптического прицела с учетом выбранной дистанции стрельбы.

Закключение

Рассмотрены различные методы повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела посредством анализа степени влияния внешних факторов среды, определяющих траекторию полета пули и точность ее попадания в цель.

Проведена оценка жесткости и устойчивости конструкции двухканального дневно-ночного оптического прицела модели *DNS-1* в двух модификациях элементов крепления на ствольной коробке оружия: по направляющей «ласточкин хвост» и на планке «Пикатинни». В варианте конструкции планка *Picatinny rail* нагрузки составляют меньшую величину и распределяются более равномерно с обеих сторон вдоль линии корпуса прицела.

Проведены расчеты траектории движения пули от патрона 7Н10 калибром 5,45 мм для штурмовой винтовки АК-74Н на дистанциях 300 и 1000 м. Установлено, что на дистанции 300 м и величине превышения 53,2 см баллистический угол (бросания) практически не меняется и находится в пределах 0,2°. Для сверхдальних дистанций до 1000 м баллистический угол возрастает до 3°.

В ходе исследований установлено, что скорость ветра в перпендикулярном направлении направлению выстрела на несколько порядков (до 60 раз) оказывает более существенное влияние на траекторию полета пули по сравнению с попутным или встречным направлением ветра.

Предложен метод измерения ветровой нагрузки с применением теплового анемометра на базе миниатюрного датчика *Dantec Dynamics* модели 55P11. В программном расчетном модуле «*Flow Simulation*» выполнено моделирование ветровой нагрузки и получены распределения полей скорости ветра при аэродинамической продувке узла анемометра в диапазоне от 2 до 20 м/с. Выполнена оптимизация конструкции корпуса анемометра, обеспечившая среднее отклонение заданного воздушного потока от измеренного значения не более 1,5 %.

Предложен метод измерения угла места цели с применением акселерометра на базе двухосевого датчика модели *SCA830-D07*, обеспечивающего точность измерений в пределах 0,00179°. Выполнена общая компоновка баллистического вычислителя интегрированного в оптический прицел *DNS-1*.

Представленные в статье результаты исследований показывают возможность достижения первого этапа по разработке комплексной автоматизированной системы управления огнем для стрелкового оружия. Применение видеоконтрольных устройств для оценки положения потенциальных целей и динамики изменения внешних условий, приемников спутниковой навигации и радиомодемов *WMAN*, устройств для дистанционной активации боя, а также самообучающейся интеллектуальной системы принятия решений позволит в дальнейшем разработать полностью автономную систему управления огнем без участия снайпера.

Список использованных источников

1. Способ стрельбы боевой машины с закрытых позиций по ненаблюдаемой цели и система управления огнем для ее осуществления / ГУП «Конструкторское бюро приборостроения» (г. Тула); И.А. Матвеев, Л.А. Богданова, П.В., Тюрин П.Ю. Миронов, В.А. Малыхин, Л.М. Швец, Н.И. Хохлов, И.В. Степаничев. – Патент RU 2 444 693 C2. – Заявлено: 11.01.2010. – Опубликовано 10.03.2012. – Бюл. № 7.

2. Шипунов, А.Г. Концепция идеального оружия. Вооружение и военная техника / А.Г. Шипунов

[и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 6. – С. 183–195.

3. Teledyne Awarded 25 Million Dollars to Lead in the Development of the Extreme Accuracy Tasked Ordnance (EXACTO) System Teledyne Technologies. Available at: <http://www.defense.gov/contract.aspx?contractid=4377> (accessed 15.10.2010).

4. Boyd, B. Precision guided firearms: disruptive small arms technology / B. Boyd, J. Lupher // Proc. SPIE, Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VII. – 2013. – Vol. 8736.

5. Леонов, М.Б. Концептуальная модель охранной системы видеонаблюдения с модулем упреждения опасности / М.Б. Леонов, В.Н. Назаров // ИЗВ. ВУЗОВ. Приборостроение. – 2015. – № 5. – С. 380–384.

6. Данилин, Г.А. Основы проектирования патронов к стрелковому оружию : учебник / Г.А. Данилин, В.П. Огородников, А.Б. Заволокин; Балтийский государственный технический университет. – СПб., 2005. – 374 с.

7. Коломийцев, Л.В. Патроны к стрелковому оружию / Л.В. Коломийцев, И.С. Собакар, В.Т. Никитюк, В.В. Сомов. – Харьков, 2003. – 336 с.

8. Испытания внешнего баллистического калькулятора VAMPIRE SOLO. ЗАО «Инновационные оружейные технологии» (IWT). Available at: <http://inwetechn.ru/publikaciya-1/> (accessed 23.03.2018).

9. Finn E. Jorgensen. How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide. DANTEC Dynamics / Finn E. Jorgensen. – 2002. – 73 p.

10. Carlos Cesar Aparecido Eguti. Development of a basic circuit of a hot-wire anemometer / Carlos Cesar Aparecido Eguti, Edson Del Rio Vieira // Proceedings of the 10o Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT 2004 – ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 29 – Dec. 03, 2004. – 9 p.

11. SCA830-D07 1-AXIS INCLINOMETER WITH DIGITAL SPI INTERFACE. Data Sheet. Murata Electronics Oy. Doc. # 82 823 00 D. – 5 p. www.murata.com.

References

1. Matveyev I.A., Bogdanova L.A., Tyurin P.V., Mironov P.Yu., Malykhin V.A., Shvets L.M., Khokhlov N.I., Stepanichev I.V. *Sposob strel'by boevoi mashiny s zakrytykh pozitsii po nenablyudaemoi tseli i sistema upravleniya ognem dlya ee osushchestvleniya* [The method of shooting a combat vehicle from closed positions for an unobserved target and a fire control system for its implementation]. Patent RF 2 444 693 C2 State Unitary Enterprise «Design Bureau of Instrument Engineering» (Tula). Declared: 11.01.2010. Posted on 10.03.2012. Bul. no. 7.

2. Shipunov A.G., Ignatov A.V., Kuznetsov V.M.,

Gudkov N.V., Ryndin M.V., Tanaev V.P., Dixhev A.I. [The concept of an ideal weapon. Armament and military equipment]. *Proceedings of Tula State University. Technical science*, 2014, is. 6, pp. 183–195 (in Russian).

3. Teledyne Awarded 25 Million Dollars to Lead in the Development of the Extreme Accuracy Tasked Ordnance (EXACTO) System Teledyne Technologies. Available at: <http://www.defense.gov/contract.aspx?contractid=4377> (accessed 15.10.2010).

4. Boyd B., Lupher J. Precision guided firearms: disruptive small arms technology. *Proc. SPIE, Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VII*, 2013, vol. 8736.

5. Leonov M.B., Nazarov V.N. [The conceptual model of the security system of video surveillance with the module of anticipation of danger]. *IZV. VUZOV. Priboroostroenie* [IZV. HIGH SCHOOL. Instrument making], 2015, no. 5, pp. 380–384 (in Russian).

6. Danilin G.A., Ogorodnikov V.P., Zavolokin A.B. *Osnovy proektirovaniya patronov k strelkovomu oruzhiyu* [Basics of designing cartridges for small arms. Textbook],

Baltic State Technical University, St. Petersburg, 2005, 374 p. (in Russian).

7. Kolomiitsev L.V., Sobakar I.S., Nikityuk V.T., Somov V.V. *Patrony k strelkovomu oruzhiyu* [Cartridges for small arms]. Kharkiv, 2003, 336 p. (in Russian).

8. Testing of an external ballistic calculator VAMPIRE SOLO. CJSC «Innovative Weapons Technologies»(IWT). Available at: <http://inwetechn.ru/publikaciya-1/> (accessed 23.03.2018).

9. Finn E. Jorgensen. How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide. DANTEC Dynamics, 2002, 73 p.

10. Carlos Cesar Aparecido Eguti, Edson Del Rio Vieira. Development of a basic circuit of a hot-wire anemometer. *Proceedings of the 10o Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT 2004 – ABCM*, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 29 – Dec. 03, 2004, 9 p.

11. SCA830-D07 1-AXIS INCLINOMETER WITH DIGITAL SPI INTERFACE. Data Sheet. Murata Electronics Oy. Doc. # 82 823 00 D, 5 p. Available at: www.murata.com.