

Формирование поправок к прицеливанию с помощью пассивного оптического измерителя скорости поперечного ветра

А.Л. Афанасьев¹, В.А. Банах¹, Д.А. Маракасов¹, В.А. Аксенов²,
Е.В. Шишкин², Ю.В. Пазий^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Сибирский филиал ФКУ НПО «Специальная техника и связь» МВД России,
630055, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 3

³Новосибирский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации
630114, г. Новосибирск, ул. Ключ-Камышенское Плато, 6/2

Поступила в редакцию 5.03.2018 г.

Представлены результаты статистического анализа экспериментальных данных, полученных во время полигонных испытаний пассивного оптического измерителя скорости ветра. В испытаниях оценивалась возможность применения измерителя для внесения поправок при прицеливании для коррекции ветрового сноса пули. В ходе экспериментов регистрировались массивы координат точек попадания и значений поперечной к линии прицеливания компоненты интегральной вдоль трассы скорости ветра; взаимно однозначное соответствие элементов массивов не устанавливалось. Предложен метод определения коэффициента линейной взаимосвязи для подобных массивов. Продемонстрировано, что учет поправок, сформированных на основе измерений ветра пассивным оптическим измерителем, ведет к уменьшению разброса точек попадания до значений, соответствующих стрелковым нормативам для лучших снайперов в условиях отсутствия ветра.

Ключевые слова: пассивный оптический измеритель, интегральная скорость ветра, ветровая поправка, некогерентный источник, корреляция изображений, акустический анемометр, турбулентность; *passive optical meter, integral wind speed, wind correction, incoherent source, image correlation, acoustic anemometer, turbulence.*

Введение

При стрельбе из снайперского оружия желательно добиваться поражения цели первым же выстрелом. Стрелковые нормативы характеризуют допустимый разброс точки попадания, например на трассе длиной 500 м для лучших снайперов значения срединных бокового и вертикального отклонений 10–11 см. Уже на достаточно коротких трассах (несколько сотен метров) поперечный ветер может сместить точку попадания на заметно большую величину, поэтому оперативный учет ветрового сноса является важной прикладной задачей, повышающей эффективность стрельбы. В статье представлены результаты экспериментальной проверки возможности оперативного определения поправок, компенсирующих влияние бокового ветра при стрельбе, пассивным оптическим методом.

* Алексей Леонидович Афанасьев (afanasiev@iao.ru); Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Дмитрий Анатольевич Маракасов (mda@iao.ru); Валерий Анатольевич Аксенов (duploduba@mail.ru); Егор Васильевич Шишкин (sibfilial@yandex.ru); Юрий Васильевич Пазий (uravpazyi@gmail.com).

1. Цели и методика эксперимента

Экспериментальная проверка возможности оперативного определения поправок, компенсирующих влияние бокового ветра при стрельбе, с помощью макета пассивного оптического измерителя (ПОИ) [1, 2] проведена в период с 28 по 30.09.2016 г. на территории испытательной станции Сибирского филиала ФКУ НПО «Специальная техника и связь» МВД России. Испытания преследовали две цели.

1. Определение принципиальной возможности использования методики дистанционного измерения скорости интегрального бокового ветра на основе корреляционного анализа бинокулярных видеоизображений для оперативного учета и ввода поправок на ветер при стрельбе из стрелкового оружия.

2. Оценка применимости макета ПОИ для дальнейшего проектирования систем автоматического учета поправок на ветер в стрелковых комплексах на примере снайперской винтовки Драгунова (СВД).

Для реализации поставленных целей применялся следующий алгоритм. Оценка скорости поперечного ветра и стрельба выполнялись по параллельным близко расположенным трассам (поперечный разнос 2–3 м) длиной 550 м. Прицеливание осуществлялось

без учета поправок на ветер. В моменты выстрелов фиксировались значения интегральной вдоль трассы скорости поперечного ветра, выдаваемые ПОИ в режиме реального времени. Поправки, которые компенсировали бы боковой снос пули, как и сама величина бокового сноса, рассчитывались из оценки ветра ПОИ и складывались с координатами точек попаданий соответствующих выстрелов. Для оценки точности стрельбы рассчитывались средние горизонтальные смещения точки попадания с учетом и без учета поправок, а также горизонтальное срединное отклонение точек попадания. Независимый контроль метеоусловий во время проведения испытаний проводился с помощью акустического метеокомплекса АМК-03.

2. Используемое оборудование и программное обеспечение

Стрельба проводилась из СВД патронами ЛПС калибром 7,62 мм. Расчет бокового сноса пули δx на трассе длиной 550 м выполнялся на основе табличных данных, приведенных в [3], по аппроксимационной формуле

$$\delta x(t) = K V_x(t). \quad (1)$$

Здесь V_x — поперечная компонента скорости ветра в момент выстрела t ; $K = 0,189$ с — коэффициент ветрового сноса для указанных длины трассы и патронов.

В экспериментах была использована мишень, освещенная естественным солнечным светом, в виде фанерного щита размером 1,5 × 3 м (рис. 1), расположенная на дальнем конце трассы. В центре мишени помещалась «контрольная точка», форма и размер которой достаточны для однообразного прицеливания из снайперского оружия. Для обеспечения работы пассивного оптического измерителя на мишень были нанесены дополнительные метки двух типов: 1 — черные квадраты 5 × 5 см на белом фоне; 2 — черная вертикальная полоса длиной 30 и шириной 5 см на белом фоне.

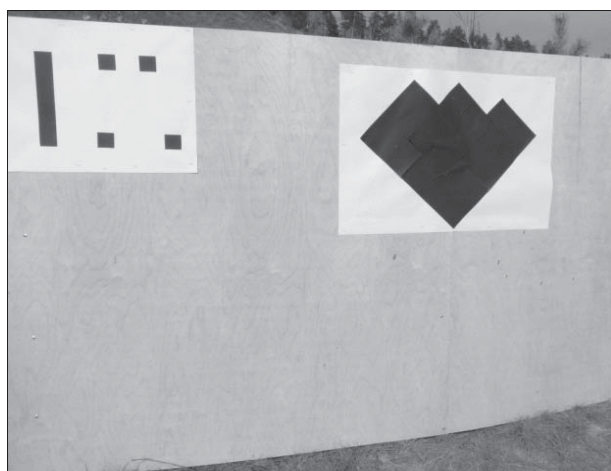


Рис. 1. Мишени для стрельбы (по центру щита) и для ПОИ (слева сверху)

Оптическая система ПОИ (рис. 2) включает в себя два оптических канала, каждый из которых состоит из диафрагмы, приемного объектива и видеокамеры МакоG 030-В. Наведение на удаленные объекты и взаимное разнесение каналов выполняются с помощью вертикальной и горизонтальной подвижек, а также поворотного устройства для вращения зрительных труб вокруг горизонтальной оси, поперечной к линии визирования. Диаметры диафрагм варьируются от 1 до 5 см, фокусное расстояние объективов составляет 25 см. Изображения формируются на приемных матрицах видеокамер (640 × 480 пикселей) в плоскости резкого изображения.

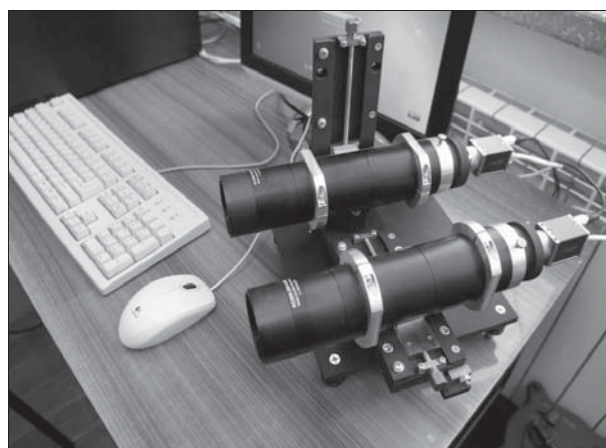


Рис. 2. Оптическая часть ПОИ

Пассивный оптический измеритель формирует стереоизображения удаленного неподвижного объекта с частотой 30–300 Гц и определяет интегральную поперечную скорость ветра в диапазоне 0,5–15 м/с на трассах длиной до 3000 м по контрастным неподвижным объектам при естественной освещенности.

Подготовка и сам процесс измерений выполняется с помощью программного обеспечения измерителя, в состав которого входят «Программа формирования бинокулярных видеоизображений» [4] и «Программа оценки усредненной вдоль трассы поперечной компоненты скорости ветра из статистики бинокулярных видеоизображений» [5]. Необходимое программное обеспечение: операционная система Windows XP SP3 или более поздних версий, Runtime-модули среды графического программирования NI LabView 10.0 и модули дополнительных компонент NI Visa, NI Vision Acquisition Software, NI Vision Development Module. Требования к компьютеру: ОЗУ 12 ГБ, CPU 3 GHz, поддерживает исполнение не менее 4 параллельных потоков операций; подключение 2 видеокамер МАКО G-030В и генератора синхросигнала через порты Gigabit Ethernet и USB соответственно.

Измерения ветра с помощью ПОИ выполняются в два этапа: настройка бинокулярных видеоизображений и собственно измерение поперечной компоненты скорости ветра.

Основной функцией программы настройки является формирование бинокулярных синхронизированных видеоизображений, что обеспечивается цик-

лической процедурой управления параметрами видеосъемки посредством ввода таких параметров, как частота кадров, горизонтальный и вертикальный размеры изображения, выдержка, с последующим отображением отснятых кадров на экране ПК в режиме реального времени.

Основными функциями программы измерения ветра являются:

- 1) регистрация синхронизированных бинокулярных изображений;
- 2) определение координат энергетических центров тяжести (ЭЦТ) выделенных блоков пикселей в изображениях;
- 3) вычисление взаимных корреляционных функций для горизонтальных смещений ЭЦТ;
- 4) получение оценок горизонтальной поперечной к трассе компоненты скорости ветра, выдача их на экран и сохранение на жесткий диск.

Все эти действия выполняются в режиме реального времени.

3. Результаты измерений

Эксперименты проводились в течение двух дней на открытой местности при температуре воздуха от +4 до +17 °С и атмосферном давлении от 748 до 751 мм рт. ст. Высотный профиль трассы представлен на рис. 3. Перепад высот на трассе составлял

~ 14 м; непосредственно за мишенью находился склон холма, что способствовало присутствию заметной (несколько метров в секунду) поперечной к трассе компоненты скорости ветра во время стрельбы.

Скорость ветра измерялась независимо ПОИ (интегральная вдоль трассы) и серийно выпускаемой акустической метеостанцией АМК-03, расположенной на оптической трассе на расстоянии 150 м (29.09) и 100 м (30.09.2016 г.) от позиции стрелка.

В первый день измерений оптическая часть ПОИ располагалась на открытом воздухе на массивном основании; на следующий день измеритель был установлен в закрытом помещении, при этом изображения мишени регистрировались через застекленное окно.

Стрельба велась сериями: 29.09 шесть серий по 5 выстрелов (серии А1–А6), 30.09 две серии из 20 (серия В) и 30 (серия С) выстрелов. В момент каждого выстрела оценивалась поперечная скорость ветра ПОИ: $V_j = V(t_j)$. По окончании каждой серии фиксировались координаты пробоев в мишени $\{X_j\}$; привязка конкретной точки попадания к значению ветра в момент выстрела внутри серии не проводилась. Массивы оценок скорости ветра $\{V_j\}$ и горизонтальных координат попаданий $\{X_j\}$ в каждой серии представлены в табл. 1. Горизонтальные смещения приведены в системе координат, центр которой совпадает с нижним углом мишени (точкой прицеливания).

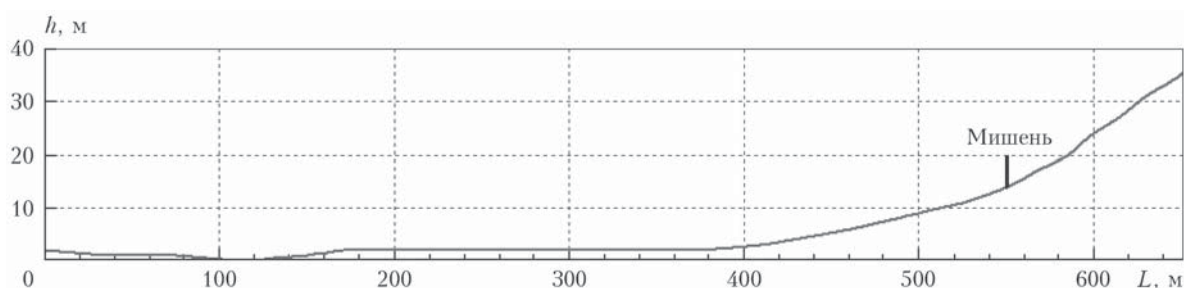


Рис. 3. Высотный профиль трассы

Скорости бокового ветра, зарегистрированные ПОИ в моменты выстрелов,
и горизонтальные координаты пробоя

Параметр	29.09.2016 г.					
	серия А1	серия А2	серия А3	серия А4	серия А5	серия А6
V, м/с	1,7	1,0	2,0	-0,7	сбой	-0,7
	1,8	1,4	1,7	-1,4	сбой	0,7
	1,7	0,6	2,2	-1,2	-1,3	-1,0
	1,2	0,7	4,1	-1,2	-2,3	-1,5
	сбой	1,5	2,0	-1,1	-1,2	-1,1
X, см	-5,8	27,5	21,0	-38,0	-31,2	-30,5
	-17,6	17,3	45,5	-19,0	-13,1	-2,1
	-14,4	8,5	18,6	-11,8	3,8	21,6
	2,9	35,6	20,5	-24,4	-1,2	24,6
	20,3	-6,0	44,0	-10,5	28,3	38,6
Параметр	30.09.2016 г.					
	серия В			серия С		
V, м/с	-2,2; -2,1; -2,7; -4,4; -3,0;			-2,6; -2,6; -2,9; -2,6; -3,3;		
	-3,0; -3,1; -2,8; -3,1; -3,0;			-2,9; -3,1; -2,6; -2,5; -2,3;		
	-2,7; -2,7; -3,2; -3,2; -3,0;			-2,0; -1,9; -1,8; -1,6; -1,6;		
	-2,0; -2,6; -2,6; -2,6; -3,2			-2,7; -1,7; -1,6; -1,8; -2,5;		
				-2,6; -2,5; -2,6; -2,7; -2,8;		
X, см	-78,0; -90,0; -60,5; -47,5; -39,7;			-92,0; -65,1; -33,5; -80,0; -80,6; -54,8;		
	-34,0; -31,0; -41,8; -18,6; -66,9;			-39,3; -31,0; -59,8; -27,7; -30,0; -20,0;		
	-59,3; -52,2; -47,2; -67,9; -36,4;			-20,3; -18,2; -15,7; -12,4; -3,5; -62,0;		
	-33,0; -63,0; -48,1; -17,2; -30,8			-39,8; -34,4; -32,0; -71,0; -67,1; -67,5;		
				-46,5; -36,9; -5,0; 20,1		

Сопоставление рядов значений скорости поперечного ветра, полученных с помощью акустической метеостанции АМК-03 и ПОИ, показывает качественное совпадение результатов измерений (рис. 4). Количественные расхождения связаны с тем, что оценка скорости ветра ПОИ – интегральная по всей трассе, а метеостанция измеряет локальную величину. Увеличение времени осреднения рядов значений скорости, уменьшающее влияние локальных и кратковременных порывов ветра, ведет к заметному улучшению совпадения оценок скорости поперечного ветра, выражающемуся в увеличении коэффициента корреляции и уменьшению среднеквадратического отклонения (СКО) (табл. 2).

Таблица 2

Статистические характеристики оценок бокового ветра за период с 14:20 до 17:24 29.09 и с 11:00 до 14:06 30.09.2016 г.

Время осреднения, с	Коэффициент корреляции	СКО, м/с
29.09.2016 г.		
16	0,56	1,52
30	0,62	1,32
120	0,69	1,10
300	0,71	1,08
30.09.2016 г.		
16	0,36	0,97
30	0,43	0,86
120	0,58	0,59
300	0,70	0,45

Имевшие место сбои ПОИ при измерении ветра могут быть вызваны одним из следующих факторов:

- появлением постороннего объекта на оптической трассе;
- появлением на участках трассы противоположно направленных потоков воздуха, что неизбежно происходит при переходе средней поперечной скорости через ноль;
- вибрацией макета, вызванной внешними факторами (звуками выстрелов, порывами ветра и т.п.).

Заметное уменьшение СКО оценок скорости при измерениях 30.09.2016 г. в закрытом павильоне позволяет предположить доминирующее влияние вибраций, в частности звуков выстрелов (на соседнем стенде проводились стрельбы из РПГ), в первый день испытаний.

4. Оценка коэффициента ветрового сноса по экспериментальным данным

Представим радиус-вектор точки попадания в виде суммы трех независимых слагаемых:

$$\mathbf{R} = K\mathbf{V} + \rho + \mathbf{R}_0. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{R} = \{X, Y\}$ – вектор координат точки попадания; $\mathbf{V} = \{V_x, V_y\}$ – поперечная к линии прицеливания интегральная скорость ветра в момент выстрела; $\rho = \{\xi, \zeta\}$ – случайное отклонение точки попадания за счет ошибок стрелка, девиаций характеристик боеприпасов, других неконтролируемых факторов;

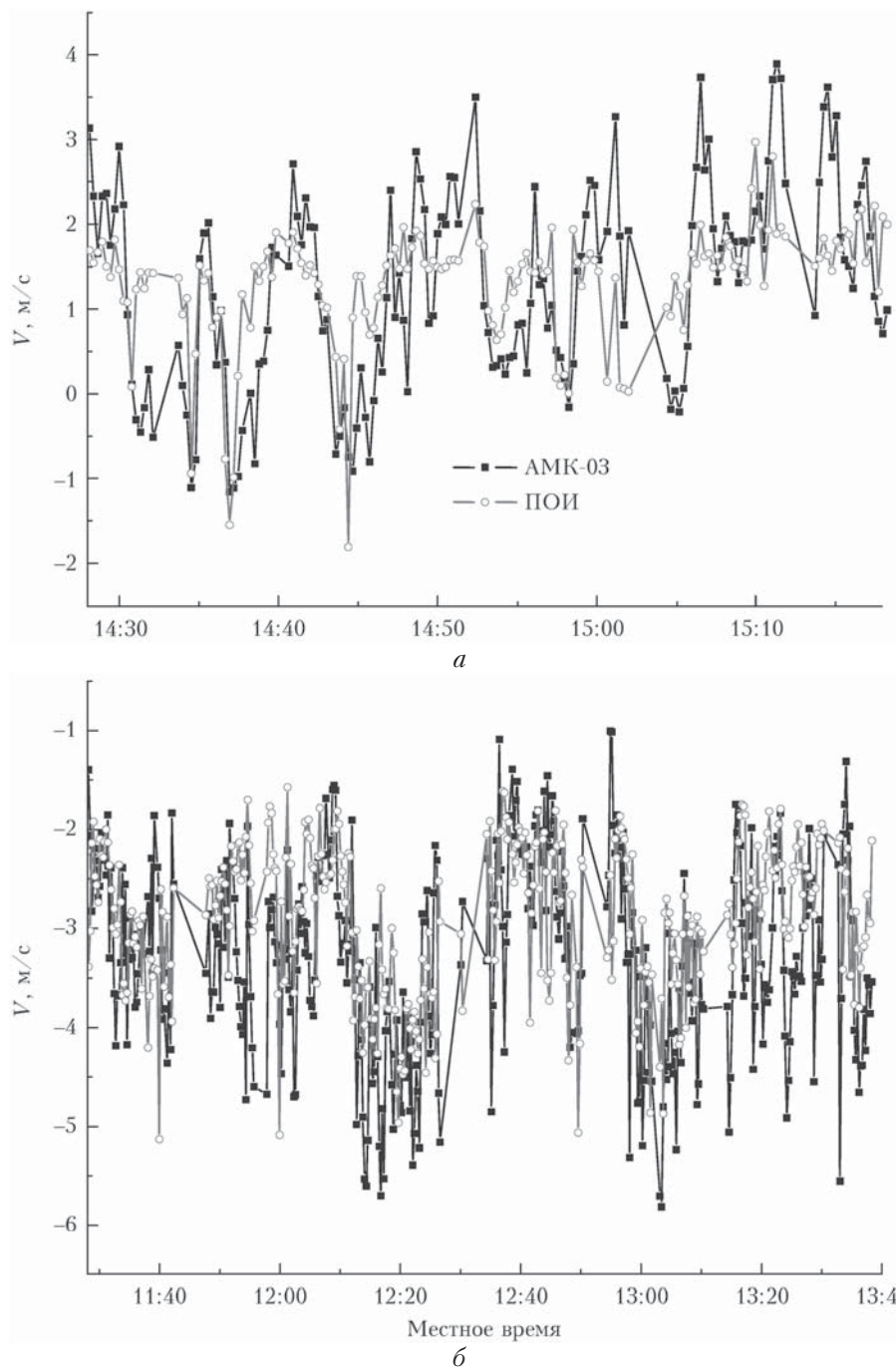


Рис. 4. Сравнение оценок скорости поперечного ветра независимыми измерителями 29.09 (а) и 30.09.2016 г. (б); время осреднения 16 с

$\mathbf{R}_0 = \{x_0, y_0\}$ – регулярное отклонение точки попадания за счет неточно выставленного прицела.

Для оценки эффективности применения ветровой поправки к прицеливанию в случае, когда экспериментальные данные позволяют для каждого выстрела установить взаимно однозначное соответствие координат точки попадания $\{X_j\}$ и поперечной скорости ветра V_{xj} , достаточно сравнить гистограммы для массивов зарегистрированных $\{X_j\}$ и скорректированных координат $\{X_j - KV_{xj}\}$. Сжатие «облака» точек попадания вокруг точки \mathbf{R}_0 (повышении куч-

ности) будет свидетельствовать об эффективности поправки, а уменьшение СКО является ее количественной характеристикой.

Когда точки попадания и оценки ветра сопоставлены не для каждого выстрела, а лишь для каждой серии выстрелов в целом, демонстрация возможности компенсации ветрового сноса становится нетривиальной задачей. Однако на основе таких данных можно оценить коэффициент ветрового сноса \tilde{K} , имевший место в данном эксперименте. Совпадение коэффициента \tilde{K} , найденного с использованием

ветровых данных ПОИ, с табличным значением K из [3] и будет свидетельствовать о возможности использования формулы (1) для оценки ветровой поправки на основе ветровых данных ПОИ.

Для оценки \bar{K} применим процедуру сортировки массивов $\{X_j\}$ и $\{V_{xj}\}$, упорядочив их элементы внутри серии так, чтобы большим значениям бокового ветра соответствовало большее отклонение горизонтальной координаты точки попадания. Отсортированные таким образом массивы $\{\hat{X}_j\}$ и $\{\hat{V}_{xj}\}$ будут зависимы. Характеризовать эту зависимость можно с помощью линейной аппроксимации

$$X(V_x) = K_s V_x + x_s, \quad (3)$$

которая обеспечивает минимум среднего квадрата отклонения по серии:

$$\frac{1}{N} \frac{\partial^2}{\partial K_s \partial x_s} \sum_{j=1}^N (\hat{X}_j - X(\hat{V}_{xj}))^2 = 0. \quad (4)$$

Очевидно, что в предположении малости вариаций случайных отклонений ξ параметры линейной связи в (3) будут совпадать с искомыми значениями из (2):

$$K_s = K, \quad x_s = x_0. \quad (5)$$

Увеличение СКО для случайной величины ξ приведет к возрастанию коэффициента K_s . Предполагая статистическую однородность и нормальный закон распределения для процессов V_x и ξ внутри серии, можно определить средний коэффициент K_s через отношение СКО независимых процессов V_x и ξ :

$$K_s^2 \approx K^2 + \frac{\sigma_\xi^2}{\sigma_V^2}. \quad (6)$$

Как показывают результаты численного моделирования, представленные на рис. 5, погрешность данного приближения уже для серий из 30 выстрелов не превосходит 2%. Таким образом, коэффициент бокового сноса возможно оценить и из неупорядо-

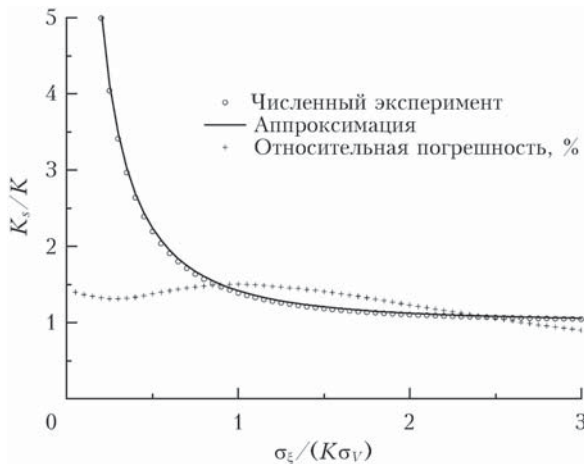


Рис. 5. Зависимость коэффициента линейной аппроксимации сортированных массивов от соотношения СКО скорости ветра и случайной ошибки стрелка

ченных массивов оценок скорости ветра и координат точек попадания при достаточном числе независимых испытаний.

В рассматриваемом эксперименте только две длинные серии (В, С) могут считаться статистически однородными, поскольку в серии А заметно менялся средний ветер. При наличии всего двух независимых выборок применение осредненной формулы (6) может привести к заметным ошибкам.

Искать оценку для коэффициента ветрового сноса будем, предполагая одинаковым закон распределения компонент случайной ошибки $\rho = \{\xi, \zeta\}$. Вычислим дисперсию его горизонтальной компоненты по экспериментально зарегистрированным вертикальным смещениям, влияние ветра на которые незначительно:

$$\sigma_\xi^2 \approx \sigma_\zeta^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \left[\zeta_j - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \zeta_m \right]^2 = 558,8 \text{ см}^2. \quad (7)$$

Здесь суммирование проводится по всем выстрелам за весь период испытаний.

Любому наперед заданному значению коэффициента ветрового сноса K_0 сопоставим оценку коэффициента линейной связи упорядоченных массивов \bar{K} по следующему алгоритму.

1. Генерируем выборку нормального случайного процесса ξ с нулевым средним и дисперсией (7). Длина выборки равна числу выстрелов в серии.

2. Вычисляем горизонтальные координаты точек попадания

$$X_j = K_0 V_{xj} + \xi_j, \quad (8)$$

используя зарегистрированные в данной серии оценки скорости ветра ПОИ.

3. Применяем для массивов $\{X_j\}$ и $\{V_{xj}\}$ процедуру упорядочивания и определяем коэффициент линейной связи K_s из соотношений (3), (4).

Повторяем предыдущие пункты достаточное число раз и находим среднее значение \bar{K}_s для серии. Численное моделирование показывает, что для серий из 20–30 выстрелов достаточно $M = 10000$ независимых повторений, что обеспечивает ошибку определения \bar{K}_s менее 1%.

Варьируя значения K_0 , добиваемся минимума среднего квадрата отклонения коэффициентов $\bar{K}_{sB,C}(K_0)$ от найденных по зарегистрированным в соответствующей серии координат точек попадания $K_{s1,2}$:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial K_0} = 0,$$

$$\Psi = \frac{1}{2} [(\bar{K}_{sB}(K_0) - K_{sB})^2 + (\bar{K}_{sC}(K_0) - K_{sC})^2]. \quad (9)$$

Значение K_0 , при котором это произойдет, и будет оценкой коэффициента ветрового сноса \bar{K} .

Зависимость выражения в квадратных скобках в (9) от K_0 представлена на рис. 6. Видно, что функция имеет выраженный минимум при $K_0 \approx 0,165$ с,

что весьма близко к табличному значению $K = 0,189$ с для данной дистанции и используемого оружия.

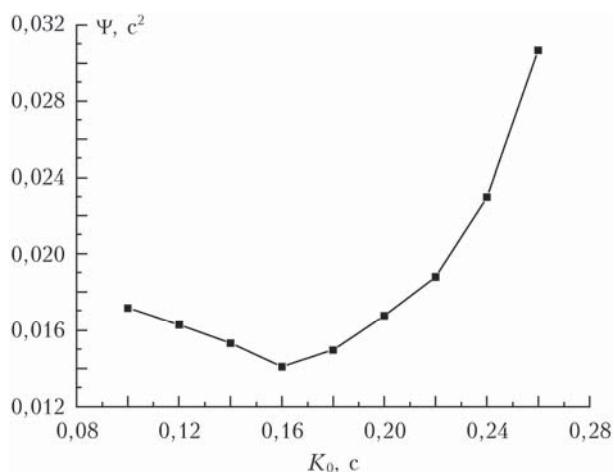


Рис. 6. Зависимость среднего квадрата отклонения Ψ от заданного при моделировании коэффициента ветрового сноса K_0

Близость полученного и табличного коэффициентов подтверждает, что значения поперечного ветра, измеренные ПОИ, могут быть использованы для расчета бокового сноса пули по формуле (1) и выработки упреждающей ветровой поправки к прицеливанию.

5. Формирование поправок и анализ возможностей компенсации бокового сноса

Оценку влияния ветра на горизонтальный снос пули дает сопоставление усредненных по всем выстрелам смещений точки попадания без учета ($\langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j = -26,03$ см) и с учетом ($\langle \chi \rangle = \langle X \rangle - \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N V_{jx} = 2,69$ см) ветрового сноса. Если регулярное горизонтальное смещение точек попадания обусловлено только ветровым сносом, то его учет должен привести к устремлению $\langle \chi \rangle$ к нулю при достаточно большом числе выстрелов.

Для проверки этого предположения были рассчитаны средние по сериям горизонтальные смещения точки попадания без учета ($\langle X \rangle_P = \frac{1}{N_P} \sum_{j=1}^{N_P} X_j$)

и с учетом ($\langle \chi \rangle_P = \langle X \rangle_P - \frac{K}{N_P} \sum_{j=1}^{N_P} V_{jx}$) ветрового сноса для каждой серии $P = \{A1-A6, A, B, C\}$, а также срединное отклонение Vb , которое определяется как

$$Vb_X = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum (X_j - \langle X \rangle_P)^2}{N_P - 1}}$$

где суммирование проводится по всем N_P выстре-

лам серии P . Для коротких серий 29.09.2016 г. $N_{A1-A6} = 5$, для серии C и совокупности всех выстрелов 29.09.2016 г. (серия A) $N_{A, C} = 30$ и для серии B $N_B = 20$. Результаты представлены в табл. 3. Отсутствие однозначного соответствия между значениями ветра и координатой точки попадания для каждого выстрела внутри серии не позволяет определить СКО с учетом ветрового сноса.

Таблица 3

Статистические характеристики горизонтальных смещений без учета и с учетом ветровой поправки

Серия	$\langle X \rangle, см$	$Vb_X, см$	$\langle \chi \rangle, см$
A1	-2,9	10,1	-33,1
A2	16,6	10,9	-3,0
A3	29,9	9,1	-15,4
A4	-20,7	7,5	0,5
A5	-4,3	12,8	26,0
A6	8,9	16,9	22,5
A	4,6	15,3	-2,1
B	-48,1	12,8	5,8
C	-43,0	17,9	0,8
За весь период испытаний	-26,0	22,1	2,7

Разброс усредненных по сериям из 5 выстрелов (A1–A6) смещений составляет около полуметра как с учетом (59,1 см), так и без учета (50,6 см) ветровой поправки. Однако для более длинных серий – 30 выстрелов 29.09 (серия A) и 20 и 30 выстрелов 30.09.2016 г. (серии B и C) – разброс средних значений без учета ветра составляет те же полметра (52,7 см), а при компенсации ветрового сноса на основе измерений ПОИ падает почти на порядок (7,9 см). Таким образом, учет ветрового сноса при оценке средней точки попадания (СТП) по достаточно длинной серии ведет к значительному уменьшению разброса оценок по сравнению с оценками СТП без учета ветра. На рис. 7 показаны положения точек попадания в трех длинных сериях, СТП для каждой серии и в целом за весь период испытаний с учетом и без учета ветровой поправки. Видно, что после компенсации ветрового сноса все СТП расположены внутри окружности радиусом 10,3 см с центром в начале координат. Отметим также, что горизонтальный разброс СТП до компенсации заметно выше вертикального. После учета бокового ветра горизонтальный и вертикальный разбросы оказываются близкими и, по-видимому, определяются не связанными с ветром случайными факторами. Это подтверждает возможность компенсации бокового сноса пули при внесении поправок на основе оценки бокового ветра ПОИ.

Отметим, что срединные отклонения Vb_X , рассчитанные по коротким сериям, оказываются меньше, чем Vb_X , рассчитанные по длинным сериям. Более того, Vb_X для серий A1–A5 не превосходят значения для лучших снайперов (~13 см) [3], в то время как Vb_X для длинных серий в среднем заметно выше. Причиной этого являются значительные вариации (до 7 м/с) бокового ветра во время измерений.

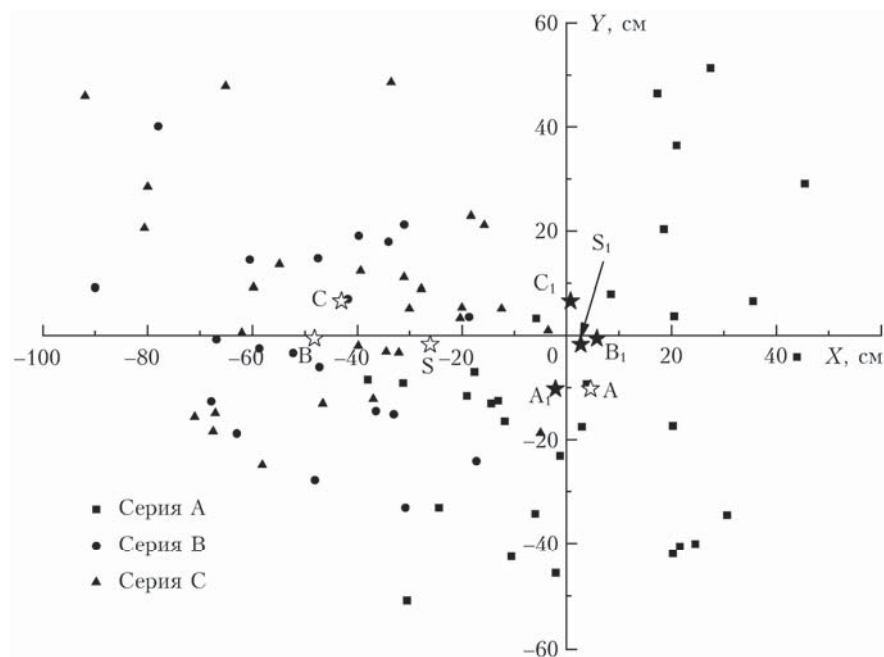


Рис. 7. Смещение СТП при компенсации ветрового сноса по измерениям ПОИ. СТП без компенсации (А, В, С – по сериям, S – по всем выстрелам) обозначены белыми звездочками, СТП с компенсацией (с нижним индексом 1) – черными звездочками

В коротких же сериях изменения ветра и, следовательно, бокового сноса пули были заметно меньше. Особенность серии А6 состоит в том, что ветер был ориентирован почти вдоль линии стрельбы, был порывистым и менял знак, что увеличивало разброс точек попадания.

Значительные изменения ветра за время испытаний позволяют сделать оценку качества компенсации ветрового сноса на основе оценки бокового ветра ПОИ по осредненным по длинным сериям значениям $\langle \chi \rangle_p$. В силу статистической независимости случайных смещений $\rho = \{\xi, \zeta\}$ в отдельных выстрелах срединные отклонения (как и СКО) для осредненного по сериям смещения СТП обратно пропорциональны $\sqrt{N_p}$, где N_p – длина серии. Для трех длинных серий примем $\sqrt{N_p} \approx 5$, что дает оценку срединного отклонения для серии из одного выстрела $Vb_\chi \approx 11$ см. Итак, после компенсации ветрового сноса срединное отклонение горизонтального смещения СТП также оказывается меньше табличного значения для лучших снайперов из [3].

Таким образом, учет поправок на боковой ветер уменьшает горизонтальный разброс точек попадания до величин, близких к разбросу за счет случайных факторов, не связанных с боковым ветром.

Заключение

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы и рекомендации.

Программное обеспечение измерителя позволяет проводить оценку бокового ветра в режиме реального времени по смещениям бинокулярных изображений контрастных объектов на трассе длиной 550 м.

Оценки поперечного ветра с помощью ПОИ согласуются с данными независимых измерений аку-

стической метеостанцией как по средним значениям, так и по характеру изменений во времени.

Коэффициент пропорциональности между боковым сносом пули и горизонтальной компонентой поперечного ветра, оцененный по результатам измерений, соответствует его табличному значению (с относительной ошибкой менее 15%), что демонстрирует возможность использования ветровых оценок ПОИ для оперативного внесения поправок при прицеливании.

Учет оценки бокового ветра, полученной с помощью ПОИ, уменьшает разброс точек попадания примерно в 2 раза, что может при практической реализации существенно повысить вероятность поражения целей с первого выстрела при стрельбе из СВД.

Для определения области применения метода ПОИ целесообразно провести эксперименты с использованием других типов стрелкового оружия, для которых имеет большое значение влияние бокового ветра.

1. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А. Сравнительные оценки скорости поперечного ветра из оптических и акустических измерений в приземном слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 8. С. 651–657; Afanasiev A.L., Banakh V.A., Marakasov D.A. Comparative assessments of the crosswind speed from optical and acoustic measurements in the surface air layer // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 43–48.
2. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Гордеев Е.В., Маракасов Д.А., Сухарев А.А., Фалиц А.В. Верификация корреляционного пассивного оптического измерителя поперечной скорости ветра в экспериментах с доплеровским ветровым лидаром // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 8. С. 657–663; Afanasiev A.L., Banakh V.A., Gordeev E.V., Marakasov D.A., Sukha-

- rev A.A., Falits A.V.* Verification of a passive correlation optical crosswind velocity meter in experiments with a Doppler wind lidar // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 574–580.
3. *Таблицы* стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибров 5,45 и 7,62 мм. М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1977. 265 с.
 4. *Маракасов Д.А.* Программа формирования бинокулярных видеоизображений «Video config» // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016660679 от 20.09.2016. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
 5. *Маракасов Д.А.* Программа оценки усредненной вдоль трассы поперечной компоненты скорости ветра из статистики бинокулярных видеоизображений «WERT» // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016619618 от 24.08.2016. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).

A.L. Afanasiev, V.A. Banakh, D.A. Marakosov, V.A. Aksenov, E.V. Shishkin, Yu.V. Pazyi. **Determination of corrections to aiming using a passive optical crosswind speed meter.**

The results of the statistical analysis of experimental data obtained during the polygon tests of a passive optical wind speed meter are presented. During the tests, a possibility of using the device for aiming correcting to compensate the wind shift of bullets was evaluated. During the experiments, the arrays of the coordinates of the impact points and the values of the component of the wind speed averaged over the line of sight were recorded; the one-to-one correspondence of the elements of the arrays was not established. A method for determining the coefficient of linear interrelation for such arrays is proposed. It is shown that taking into account the corrections formed on the basis of wind measurements by a passive optical meter decreases the spread of the impact points to values corresponding to shooting standards for the best snipers in the absence of wind.