

УДК 534.87

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДУЛЬНОЙ ВОЛНЫ ВЫСТРЕЛА ИЗ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ ПРИ ОДНОПОЗИЦИОННОМ ПРИЕМЕ

Р.В. БЫКОВ, С.Р. ГЕЙСТЕР

Военная академия Республики Беларусь  
пр. Независимости 220, Минск, 220057, Беларусь

Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь  
Калиновского 4, Минск 220103, Беларусь

Поступила в редакцию 10 сентября 2012

Рассматривается процесс формирования дульной волны при выстреле из стрелкового оружия с учетом его особенностей. Определяются временная и спектральная структуры сигнала на выходе акустического приемника, осуществляющего прием дульной волны в дальней зоне.

*Ключевые слова:* дульная волна, спектр, корреляционная функция.

### Введение

Выстрел из основных видов оружия сопровождается сверхзвуковым истечением пороховых газов (ПГ) в переднюю полусферу на несколько десятков калибров – несколько десятков сантиметров для стрелкового оружия и несколько метров для артиллерийского вооружения. Процесс истечения ПГ заканчивается, когда давление за фронтом волны, образованной истекающими газами, сравнялось с давлением окружающей среды. Далее эта волна преобразуется в звуковую, которую называют дульной волной (ДВ), и распространяется со скоростью звука [1]. Звуковые волны формируют на выходе акустического приемника акустический сигнал (АС), соответствующий изменению во времени давления в точке приема.

В [1] предложен способ определения прямоугольных координат огневых точек в однопозиционной системе на основе измерения направлений и относительной задержки прихода фронтов ДВ и баллистической волны (БВ), сформированной пулей. Для автоматизации процессов обнаружения и измерения необходимы априорные сведения о временной и спектральной структурах сигналов [2], соответствующих ДВ, и помех, которые можно получить экспериментально.

### Обобщенная характеристика пространственной структуры ДВ

Процесс выстрела обычно делят на четыре периода [3, 4]: первый – предварительный; второй – первый пиродинамический; третий – второй пиродинамический; четвертый – последнее действие пороховых газов на пулю (снаряд) и ствол. Наибольший интерес для анализа временной и спектральной структур АС представляет период последствия, когда пуля (снаряд) вылетела из канала ствола и в передней полусфере от ствола формируется ДВ. В этом периоде давление газов нарастает за несколько микросекунд в соответствии со скоростью (до нескольких тысяч м/с) истечения ПГ из канала ствола и затем за несколько миллисекунд спадает по закону, близкому к экспоненциальному.

Начальное давление во фронте ДВ и длительность его спада зависят от множества факторов, основными из которых являются: калибр оружия; масса, плотность и вид порохового заряда; длина ствола; параметры атмосферы в момент выстрела. Соответственно, временная структура АС выстрела для различных типов оружия и его модификаций будет различной. Ствол оружия может быть открытым (см. рис. 2, а) или иметь надульное приспособление (см. рис. 2, б). Надульные приспособления (НП) изменяют (см. рис. 1) направление и скорость истечения ПГ [5], что ведет к изменениям структуры сигнала на выходе акустического приемника.

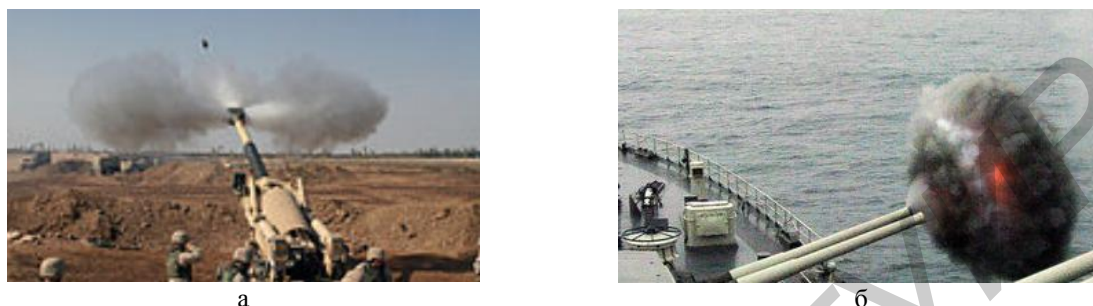


Рис. 1. Фотографии расширения ПГ на выходе из канала ствола артиллерийских систем: а – при наличии компенсатора; б – без компенсатора

Процесс формирования ДВ можно охарактеризовать (см. рис. 2) следующими фазами: первая – при выходе пули из ствола и переходе в НП высокоскоростной поток газов, обогая и опережая пулю (снаряд), вытекает через боковые щели и пулевой канал НП. Длительность фазы определяется эмпирическим выражением:

$$t_{v\_1} \approx \begin{cases} l_{np} - l_p / V_p, & \text{при } l_{np} \geq l_p; \\ 0, & \text{при } l_{np} < l_p, \end{cases} \quad (1)$$

где  $V_p$  – дульная скорость полета пули;  $l_{np}$  – длина НП;  $l_p$  – длина пули.

Вторая – после запираия пулей пулевого канала НП, когда поток газов вытекает только через боковые щели НП. Если длина пулевого канала меньше длины пули, то длительность фазы определяется выражением:

$$t_{v\_2} \approx l_p / V_p. \quad (2)$$

Третья – после выхода пули из НП поток газов, потеряв значительную часть энергии, вытекает через щели (отверстия) и пулевой канал НП до момента, когда давление возле НП сравняется с давлением окружающей среды. Длительность этой фазы существенно превышает суммарную длительность двух первых фаз и составляет несколько миллисекунд [4].

Если надульное приспособление отсутствует, то после покидания пулей ствола поток газов вытекает только через пулевой канал.

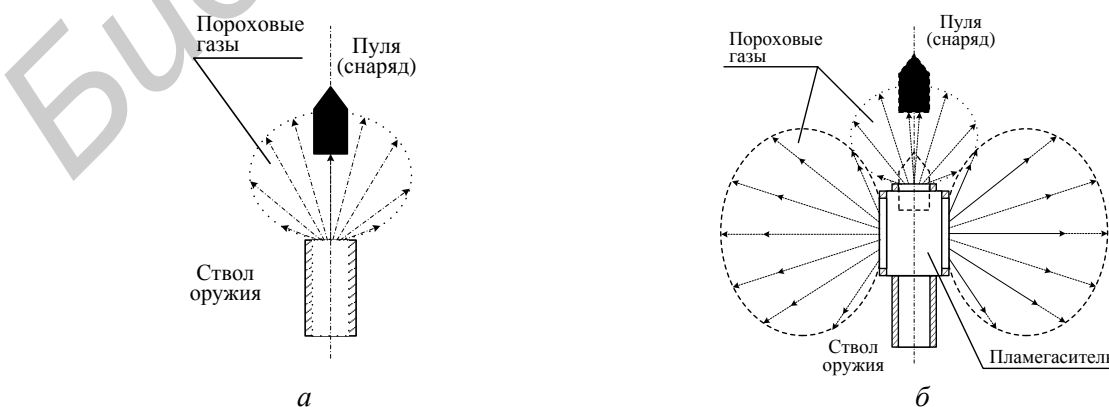


Рис. 2. Направление расширения пороховых газов на выходе канала ствола: а – при открытом стволе; б – при наличии НП в виде пламегасителя

Из (1) и (2) следует, что для большинства типов современного огнестрельного оружия, у которых дульная скорость пули – сотни м/с, а длины НП и пули – сантиметры, длительность первой и второй фаз составляет единицы – десятки микросекунд.

### Результаты экспериментальных исследований ДВ стрелкового оружия

Экспериментальные исследования выполнялись с помощью измерительного комплекса, обеспечивавшего прием и преобразование звуковых волн в электрические сигналы, представление их в цифровом виде с частотой дискретизации во времени  $F_d = 48$  кГц и хранение. Преобразование волны в электрический сигнал осуществлялось с помощью микрофона, установленного на расстоянии 190 м от линии огня. Температура воздуха в ходе эксперимента была равна  $2^\circ\text{C}$ . Размещение комплекса и исследуемых образцов оружия представлено на рис. 3, где  $\alpha_{s1} = -10^\circ$ ,  $\alpha_{s2} = 30^\circ$  и  $\alpha_{s3} = 60^\circ$ .

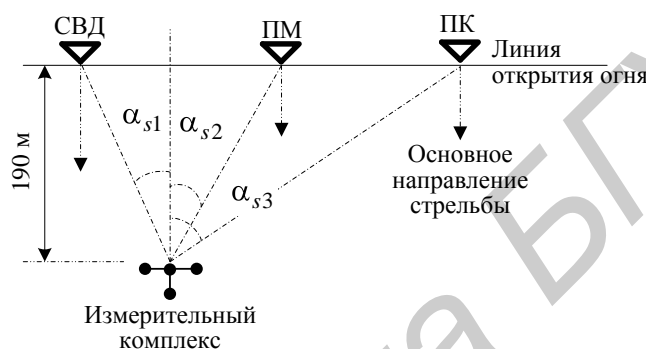


Рис. 3. Схема размещения комплекса и оружия

Зарегистрированы сигналы 30 выстрелов из стрелкового оружия: 10 из снайперской винтовки Драгунова (СВД) калибра 7,62 мм, 10 из пулемета Калашникова (ПК) калибра 7,62 мм, 10 из пистолета Макарова (ПМ) калибра 9 мм, причем СВД и ПК имели схожие характеристики (длина ствола, калибр, начальная скорость пули, пламегаситель). На основе временных структур сигналов (см. рис. 4) получены нормированные автокорреляционные функции (АКФ) АС при размере окна анализа  $T_0 = 0,05$  с (см. рис. 5) и модули усредненных АКФ (см. рис. 6); нормированные энергетические спектры (НЭС) АС выстрелов (см. рис. 7) и усредненные НЭС (см. рис. 8) для каждого типа оружия.

Усредненные АКФ (см. рис. 6) получены в виде  $\overline{A \tau} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L A \tau, l$ , где

$A \tau, l = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} u_l(t) u_l(t - \tau) dt$  – АКФ  $l$ -го АС ( $l = \overline{1, L}$ ), которая в дискретном виде может быть

получена как  $A_{h,l} = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D u_{d,l} - M_l \quad u_{d+h-H/2,l} - M_l$ ;  $L=10$  – число исследуемых выстрелов;

$\tau$  – время рассогласования;  $D = T_0 F_d$  – число дискретных отсчетов в окне анализа длительностью  $T_0$ ;  $h = \overline{1, H}$  – текущий номер дискретного сдвига по времени;  $H$  – общее число сдвигов;  $M_l$  – математическое ожидание (МОЖ) для  $l$ -го АС.

Энергетический спектр АС получен путем быстрого преобразования Фурье от обрабатываемой последовательности с числом точек  $N_{FFT} = 8192$ . Для снижения влияния помех анализируемый фрагмент АС ограничивался длительностью выстрела и располагался в центре обрабатываемой последовательности, а остальные позиции заполнялись нулями. Анализируемый фрагмент имел значение 1,5 мс (72 отсчета) для выстрелов из ПК и 15 мс (720 отсчетов) для

СВД и ПМ. Формирование усредненного НЭС осуществлялось в виде  $\overline{S f} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L S f, l$ , где  $S f, l$  – НЭС  $l$ -го АС, который в дискретном виде представлялся как  $S_{n,l} = S(n\Delta F, l)$ , причем  $\Delta F = F_d / N_{FFT}$ , а  $n = \overline{1, N_{FFT}}$  – номер отсчета.

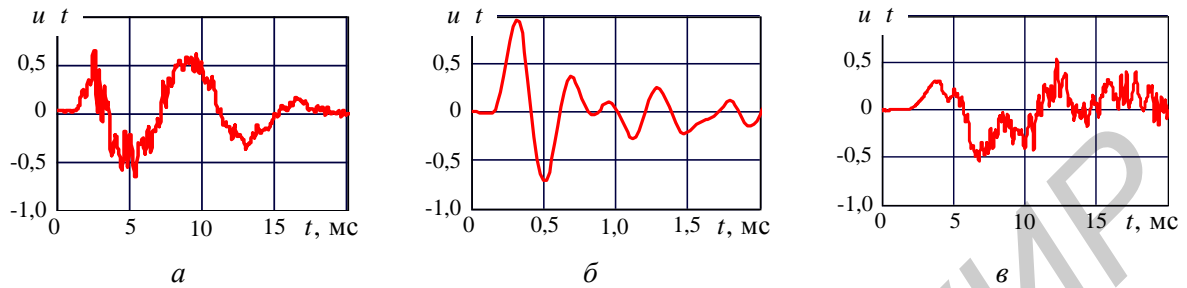


Рис. 4. Временные структуры АС выстрелов из: СВД (а); ПК (б); ПМ (в)

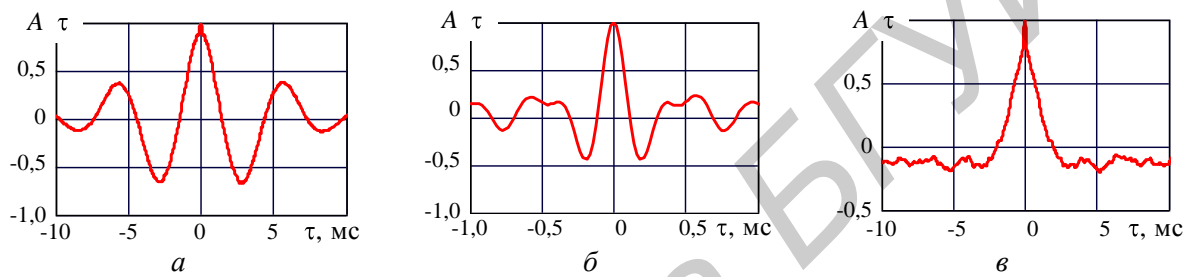


Рис. 5. Корреляционные функции АС выстрелов из: СВД (а); ПК (б); ПМ (в)

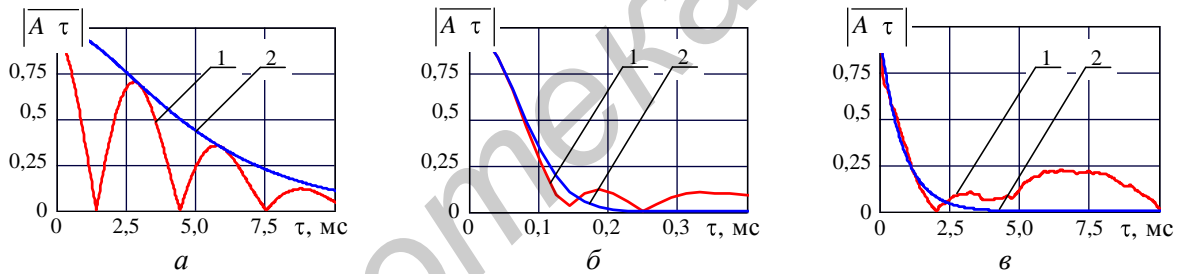


Рис. 6. Усредненные АКФ АС выстрелов из: СВД (а); ПК (б); ПМ (в)

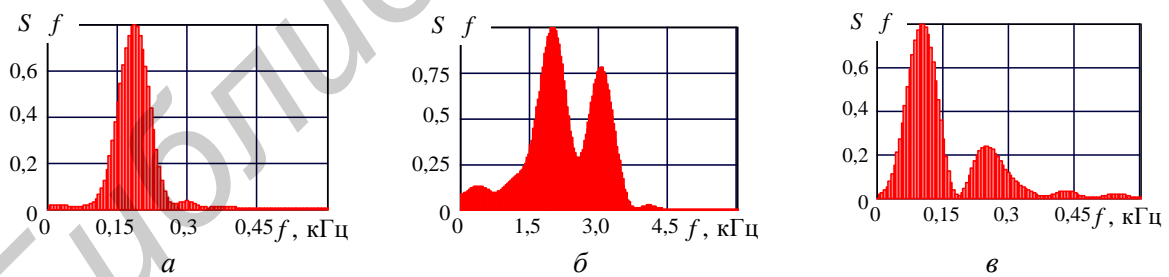


Рис. 7. Спектральные структуры АС выстрелов из: СВД (а); ПК (б); ПМ (в)

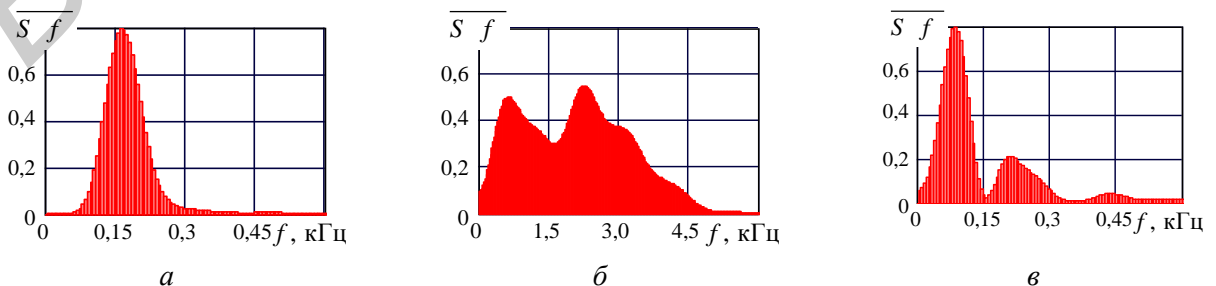


Рис. 8. Усредненные спектральные структуры АС выстрелов из: СВД (а); ПК (б); ПМ (в)

Для оценки корреляционных связей между сигналами выстрелов из оружия одного типа использован коэффициент взаимной корреляции флуктуаций:

$$r_{l,k} = \frac{\sum_{d=1}^D u_{d,l} - M_l \quad u_{d,k} - M_k}{\sqrt{\sum_{d=1}^D u_{d,l} - M_l^2 \quad \sum_{d=1}^D u_{d,k} - M_k^2}},$$

где  $u_{d,l}$  –  $d$ -й дискретный отсчет  $l$  ( $k$ )-го АС,  $l = \overline{1, L}$ ,  $k = \overline{1, L}$ ;  $M_l$  ( $M_k$ ) – МОЖ  $l$  ( $k$ )-го АС.

Оценки коэффициентов взаимной корреляции флуктуаций сигналов выстрелов однотипного стрелкового оружия представлены в таблице.

**Коэффициенты взаимной корреляции флуктуаций сигналов выстрелов  $r_{lk}$**

$k \setminus l$	СВД					ПК					ПМ				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1,000	0,954	0,942	0,941	0,937	1,000	0,524	0,343	0,485	0,389	1,000	0,692	0,476	0,517	0,527
2	0,954	1,000	0,924	0,936	0,937	0,524	1,000	0,549	0,469	0,376	0,692	1,000	0,446	0,485	0,611
3	0,942	0,924	1,000	0,916	0,912	0,343	0,549	1,000	0,407	0,336	0,476	0,446	1,000	0,459	0,394
4	0,941	0,936	0,916	1,000	0,930	0,485	0,469	0,407	1,000	0,567	0,517	0,485	0,459	1,000	0,554
5	0,937	0,937	0,912	0,930	1,000	0,389	0,376	0,336	0,567	1,000	0,527	0,611	0,394	0,554	1,000

### Анализ результатов экспериментальных исследований

Анализ временной структуры показал следующее:

– дульная волна для оружия, имеющего пламегаситель, состоит из двух составляющих: волна от боковых щелей пламегасителя и волна от выхода пулевого канала пламегасителя. Акустические поля этих составляющих имеют разную пространственную направленность (см. рис. 2, б) – максимум поля газов, выходящих из боковых щелей пламегасителя, направлен перпендикулярно ориентации ствола, а максимум поля газов, выходящих через выход пулевого канала пламегасителя, направлен вдоль ориентации ствола;

– давление во фронте дульной волны от боковых щелей пламегасителя существенно (в данном эксперименте – не менее чем в 2 раза) превышает давление во фронте дульной волны от выхода пулевого канала пламегасителя (см. рис. 4, а и 4, б);

– время формирования фронта и длительность АС, соответствующего дульной волне от боковых щелей пламегасителя, меньше соответствующих параметров дульной волны от выхода пулевого канала пламегасителя. В данном эксперименте их соотношение примерно 1/10.

Анализ автокорреляционных функций сигналов выстрелов показал следующее:

– огибающая модуля усредненной нормированной АКФ для АС, соответствующего дульной волне от выхода пулевого канала пламегасителя (в эксперименте – выстрелы из СВД), может быть аппроксимирована экспоненциально-параболической кривой вида  $A_a \tau = 1 + 2|\tau|/\tau_{s\_SVD} \exp -2|\tau|/\tau_{s\_SVD}$ , где  $\tau_{s\_SVD}$  – время корреляции АС выстрела из СВД, которое в эксперименте имело значение около 5 мс;

– основной лепесток усредненной АКФ для АС, соответствующего дульной волне от боковых щелей пламегасителя (в эксперименте – выстрелы из ПК), может быть аппроксимирован экспоненциальной кривой вида  $A_a \tau = \exp -0,25\pi \tau^2/\tau_{s\_PK}^2$ , где  $\tau_{s\_PK}$  – время корреляции АС выстрела из ПК, которое в эксперименте имело значение около 87 мкс;

– основной лепесток усредненной АКФ выстрелов из ПМ, в котором не было направляющего приспособления (дульная волна формировалась при выходе пули из канала ствола) может быть аппроксимирован экспоненциальной кривой вида  $A_a \tau = \exp -|\tau|/\tau_{s\_PM}$ , где  $\tau_{s\_PM}$  – время корреляции АС при выстреле из ПМ, которое в эксперименте имело значение около 8 мс.

Анализ энергетических спектров сигналов выстрелов показал следующее:

– принятые сигналы, соответствующие дульной волне (для двух ее составляющих) выстрелов из стрелкового оружия, при приеме со сравнительно небольших расстояний (сотни метров) являются широкополосными и сверхширокополосными, так как их ширина спектра сопоставима с частотой колебаний;

– ширина спектра принятых сигналов, соответствующих дульной волне от боковых щелей пламегасителя, примерно в 10 раз превышает ширину спектра сигналов, соответствующих дульной волне от выхода пулевого канала пламегасителя или ствола при отсутствии НП.

Анализ корреляционных связей сигналов выстрелов показал, что наиболее стабильными по своей структуре являются низкочастотные принятые сигналы, соответствующие дульной волне от выхода пулевого канала ствола или пламегасителя.

### **Заключение**

Во-первых, дульная волна для оружия, имеющего пламегаситель, состоит из двух составляющих – волны от боковых щелей пламегасителя и волны от пулевого канала пламегасителя. Акустические поля этих составляющих имеют разную пространственную направленность – максимум поля от боковых щелей пламегасителя направлен перпендикулярно ориентации ствола, а максимум поля от выхода пулевого канала пламегасителя направлен вдоль ориентации ствола. Во-вторых, дульная волна от боковых щелей пламегасителя состоит из высокочастотных составляющих и будет более интенсивно затухать при распространении в воздухе, чем дульная волна от выхода пулевого канала пламегасителя или ствола при отсутствии НП. В-третьих, дульные волны, сформированные пороховыми газами при выходе пули из ствола или пулевого канала пламегасителя при его наличии, имеют схожие временные структуры и временные параметры для оружия разных типов, например, для снайперской винтовки Драгунова и пистолета Макарова. В-четвертых, результаты исследования корреляционных функций флуктуаций сигналов выстрелов являются основой для разработки оптимальных устройств обнаружения и измерения координат огневых точек. В этих устройствах целесообразно использовать анализ в частотном диапазоне (0...5) кГц. Особенности спектров и корреляции АС выстрелов могут быть использованы для оценки калибра и селекции сигналов выстрелов от различных огневых точек.

## **RESULTS OF THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF SMALL ARMS MUZZLE SHOT WAVE IN A CASE OF MONOSTATIC RECEPTION**

R.V. BYKOV, S.R. HEISTER

### **Abstract**

The process of muzzle shot wave formation is considered taking into account features of small arms. Temporal and spectral structures of output signal of acoustic receiver that implements shot wave reception in a far field zone is determined.

### **Список литературы**

1. *Быков Р.В., Гейстер С.Р.* / Наука и военная безопасность. 2011. №4. С.50–53.
2. *Охрименко А.Е., Олейников О.А.* Теоретические основы радиолокации. Минск, 1976.
3. *Горохов М.С.* Внутренняя баллистика ствольных систем. М., 1985.
4. *Беневольский С.В., Бурлов В.В., Казаковцев В.П.* Баллистика: Учебник. Пенза, 2005.
5. *Кулагин В.И., Черезов В.И.* Газодинамика автоматического оружия. М., 1985.
6. *Быков Р.В., Дзеки А.М., Гейстер С.Р.* // Вестн. Воен. акад. Республики Беларусь. 2005. № 4(17). С. 67–75.