

Г.А. ПОЛЯКОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРОВ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ЗВУКА ВЫСТРЕЛА СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

Рассмотрены теоретические и прикладные аспекты разработки прибора снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ) камерного типа и особенности проектирования ПСУЗВ для автоматического оружия малошумного боя. Обобщены материалы по методическому обеспечению расчета характеристик процесса в расширительных камерах ПСУЗВ. Приведены сведения по опыту конструкторской разработки и экспериментальной отработки ПСУЗВ.

Розглянуті теоретичні і прикладні аспекти розробки приладу зниження рівня звуку пострілу (ПЗРЗП) камерного типу і особливості проектування ПЗРЗП для автоматичної зброї малошумного бою. Узагальнені матеріали щодо методичного забезпечення розрахунку характеристик процесу в розширювальних камерах ПЗРЗП. Приведені дані про досвід конструкторської розробки і експериментального відпрацювання ПЗРЗП.

Theoretical and applied aspects of the development of chamber-type sound suppressors (PSUZV) and features of the PSUZV design for automatic sound-suppressing weapon are considered. Data on methodical support of calculations of process characteristics through the PSUZV expansion chambers are generalized. Information about experience in development effort and experimental development is reported.

Введение, постановка проблемы

Автомат (штурмовая винтовка) – распространенный вид ручного огнестрельного оружия, находящегося на вооружении современных армий и спецподразделений силовых ведомств, постоянно развиваемый и совершенствуемый.

Особенности автоматического оружия требуют специфических подходов к проектированию, изготовлению, отработке и эксплуатации всех его элементов в частности прибора снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ). Следует заметить, что в настоящее время термин «бесшумное» (Silenced) или «глушитель» (Muffler) заменяется термином «прибор снижения звука выстрела» (The device of reduction in a sound of a shot).

Самые первые эффективные «приборы бесшумной и беспламенной стрельбы» были разработаны в виде многокамерных глушителей расширительного типа и представляли собой надульные насадки на стандартное оружие [1]. Позже был разработан глушитель, составляющий единое целое с конструкцией оружия – интегрированный [1]. Конструкции стрелковых комплексов (автомат + глушитель) постоянно совершенствуются, отслеживая изменения в применяемых боеприпасах, технологии, материаловедении и используя новейшие достижения аэрогазотермодинамики и техники экспериментов.

Значительным недостатком образцов малошумного стрелкового оружия первых поколений были относительно низкие по сравнению с оружием общевойскового назначения боевые служебно-эксплуатационные характеристики: прицельная дальность стрельбы, убойное и пробивное действие пули, габаритно-массовые характеристики. Существовавшие образцы малошумного оружия не могли в полной мере заменить стандартное общевойсковое оружие. В новых образцах малошумного оружия наибольшее распространение получили надульные многокамерные ПСУЗВ расширительного типа [1]. Ими оснащены автоматные комплексы, состоящие на вооружении армейских и полицейских подразделений во всем мире. Приоритет в использовании короткоствольного малошумного оружия принадлежит германским спецслужбам, массовое же использование винтовок с ПСУЗВ впервые было обеспечено в СССР, а пистолетов-пулеметов – в Великобритании.

Выбор конструкции ПСУЗВ в основном определяется следующими харак-

© Г.А. Поляков 2010

теристиками: акустическими (уровнем шумоглушения); массо-габаритными; аэродинамическими (потерями дульного давления).

Уровень звука, порождаемого пороховыми газами, прорывающимися через зазор между пулей и стенками ствола, достигает 125 дБ, а газами, движущимися за пулей и обгоняющими ее – до 135 дБ. Давление и температура пороховых газов у дульного среза составляют 20 – 45 МПа и 1000 – 2000 °С.

Снижение уровня звука на 20 – 30 дБ означает ослабление уровня звукового давления до 1/100 и 1/1000 уровня источника звука, соответственно. Однако, поскольку кривая чувствительности уха также имеет логарифмический характер, снижение энергии звука до одной сотой доли его прежнего значения лишь наполовину снижает слышимый звук. Так, в рекламе немецкого глушителя АWC для пистолета ASP-9 указывается, что уровень звука при его использовании не превышает 33 дБ, т.е. не более, чем при закрытии двери комфортабельного автомобиля.

Оружие считается малозумным, если уровень звука выстрела не превышает этого показателя в образцах, использующих пневматический принцип стрельбы (трудноразличим на дальности 50 м).

Опыт разработки многокамерных глушителей шума выхлопа, в частности двигателей внутреннего сгорания, позволяет сделать основные выводы относительно эффективности конструктивных факторов при шумоглушении:

- эффективное заглушение достигается применением элементов с перфорацией (трубок, диафрагм и др.);
- с увеличением площади перфорации и длины пути, проходимого выхлопными газами, заглушение растет;
- поворот потока газов (перед выходом из глушителя) увеличивает его заглушение;
- для снижения низкочастотных составляющих шума выхлопа двигателя внутреннего сгорания необходимо увеличивать объем глушителя, для снижения средне- и высокочастотных – увеличивать площадь перфорации в элементах глушителя.

Методология борьбы с шумом включает следующие основные составляющие:

- теоретические исследования;
- выявление и разделение источников шума;
- проектирование и разработка приборного оборудования и испытательных установок;
- выявление механизмов генерирования шума;
- разработка технических решений по снижению шума;
- изготовление и отработка конструкции глушителя;
- сертификационные испытания.

Основными проблемами при проектировании и отработке ПСУЗВ являются объективное представление о процессах, происходящих в его камерах, взаимозависимости их параметров, выбор метода расчета его характеристик, четкое представление о порядке изготовления и отработки новой конструкции ПСУЗВ.

Несмотря на появившиеся в последнее время публикации по проектированию ПСУЗВ для автоматического оружия (например, [1]), остается открытым вопрос о комплексном подходе к разработке ПСУЗВ для малозумного автоматического оружия с большой скорострельностью и продолжительно-

стью работы в автоматическом режиме. Основная проблема заключается в необходимости учета существенной нестационарности процессов в камерах, в отличие от ПСУЗВ, предназначенных для одиночных выстрелов. Этот фактор является ключевым для создания ПСУЗВ автоматического стрелкового оружия с приемлемыми акустическими характеристиками.

Представленные материалы обобщают опыт создания таких ПСУЗВ. Обсуждаются методические подходы к расчету их геометрических характеристик, даются практические рекомендации по выбору рациональных конструкций многокамерных ПСУЗВ, подготовке экспериментальной базы и проведению их отработки и сертификации.

1. Методическое обеспечение проектирования ПСУЗВ для автоматического стрелкового оружия

Вычислительная модель, используемая при расчете нестационарного течения пороховых газов в камерах ПСУЗВ [2 – 7], базируется на системе дифференциальных уравнений газовой динамики для невязкого сжимаемого газа с переменной удельной теплоемкостью. В общем виде для многофазного потока газа эта система записывается следующим образом:

$$\frac{\partial J \cdot Q}{\partial t} + \frac{\partial J \cdot F}{\partial \xi} + \frac{\partial J \cdot G}{\partial \eta} + J \cdot H = 0, \quad (1)$$

где векторы потока имеют вид:

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho \alpha_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \rho \alpha_{NS-1} \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho u U + \xi_x p \\ \rho v U + \xi_y p \\ U(\rho E + p) \\ \rho \alpha_1 U \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \rho \alpha_{NS-1} U \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho u V + \eta_x p \\ \rho v V + \eta_y p \\ V(\rho E + p) \\ \rho \alpha_1 V \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \rho \alpha_{NS-1} V \end{bmatrix}; \quad H = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v \\ \rho v^2 \\ v(\rho E + p) \\ \rho \alpha_1 v \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \rho \alpha_{NS-1} v \end{bmatrix}.$$

Зависимая переменная α_i является массовой долей i -й частицы от массы общего количества NS частиц потока. При этом для массы NS частиц вводится полная величина плотности соотношением:

$$\rho = \sum_{i=1}^{NS} \rho_i \alpha_i. \quad (2)$$

Для осесимметричного ПСУЗВ система уравнений записывается в осесимметричной форме. При этом трехмерность течения может учитываться элементом H .

Якобиан и контравариантные скорости определяются выражениями:

$$J = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi, \quad (3)$$

$$U = \xi_x u + \xi_y v, \quad (4)$$

$$V = \eta_x u + \eta_y v . \quad (5)$$

Уравнение состояния вводится выражением:

$$p = \rho R_u T \sum_{i=1}^{NS} \frac{\alpha_i}{M_i} . \quad (6)$$

Температура потока определяется из уравнения сохранения энергии:

$$e = \sum \alpha_i h_i - \frac{p}{\rho} , \quad (7)$$

$$h_i = h_{f_i}^0 + \int_{T_R}^T c_{p_i} \cdot dT , \quad (8)$$

где $h_{f_i}^0, T_R$ – исходные энтальпия и температура частицы.

Удельная теплоемкость c_{p_i} для каждой частицы в каждой ячейке в каждый момент времени считается известной функцией от температуры. В первом приближении эта функция может считаться линейной.

При решении задачи влияние снаряда обычно учитывается с допущением о его постоянной скорости. Ячейки, которые содержат снаряд, идентифицируются, и вводится дополнительный член, учитывающий соответствующее объемное изменение потока. При этом применяются условия непроницаемости на поверхности снаряда и стенках камер ПСУЗВ.

Различные подходы к численному решению системы (например, [1, 4 – 9]), приводят к примерно одинаковым результатам при определении характеристик потока в камерах ПСУЗВ, поэтому при расчете его характеристик можно использовать любой из указанных подходов в зависимости от наличия исходной вычислительной базы и квалификации вычислителя.

Для повышения эффективности звукопоглощения отдельные камеры ПСУЗВ могут наполняться хладагентом. В качестве хладагента чаще всего используются пористые материалы из металлической сетки, стружки, минерального, базальтового волокна или минеральной ваты. Пористые материалы наиболее эффективны при глушении звуковых колебаний низких частот. Для увеличения звукопоглощения в области низких частот звукопоглотитель необходимо крепить не вплотную к жесткой отражающей поверхности, а на определенном расстоянии от нее. При выборе материала поглотителя необходимо учитывать условия его работы в полости ПСУЗВ: высокие быстротемняющиеся температуры, вибрации, высокие динамические нагрузки. Наиболее подходящими в качестве наполнителей следует считать мелкоячеистую сетку из нержавеющей стали, тонкую стальную проволоку-путанку, пористую медь.

При расчете многокамерного ПСУЗВ с частичным заполнением камер хладагентом система уравнений модифицируется следующим образом. Моделирование процесса производится с использованием уравнений сохранения [10] в интегральном виде, записанных для каждой камеры ПСУЗВ:

– сохранения массы

$$\iiint_W \frac{\partial \rho}{\partial t} dW + \iint_S \rho V_n dS = 0, \quad (9)$$

– сохранения энергии (без учета потока тепла через ограничивающую поверхность и работы сил трения):

$$\iiint_W \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} dW + \iint_S \rho E V_n dS = - \iint_S \rho V_n dS, \quad (10)$$

где W – объем газа; S – поверхность, ограничивающая объем W ; V_n – проекция вектора скорости газа на направление внешней нормали к элементу поверхности dS ; E – сумма внутренней и кинетической энергии единицы массы газа.

Наполнитель в камерах учитывается при записи уравнения сохранения энергии путем учета потока тепла, проходящего через поверхность наполнителя:

$$\iiint_W \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} dW + \iint_S \rho E V_n \cdot d\bar{S} = - \iint_S \rho V_n \cdot d\bar{S} - \iint_S q_n \cdot d\bar{S}, \quad (11)$$

где q_n – проекция вектора потока тепла, проходящего через единицу поверхности наполнителя, на направление внешней нормали к элементу поверхности $d\bar{S}$; \bar{S} – площадь поверхности наполнителя.

Изменение температуры наполнителя в единицу времени учитывается соотношением:

$$\bar{c} m \frac{d\bar{T}}{dt} = \iint_S q_n \cdot d\bar{S}, \quad (12)$$

где \bar{c} – удельная теплоемкость наполнителя; \bar{m} – масса наполнителя; \bar{T} – температура наполнителя.

Поток тепла, проходящего через поверхность наполнителя, можно определять по приближенному соотношению [10]:

$$\iint_S q_n \cdot d\bar{S} = \xi \bar{V} \cdot \bar{S} \cdot (T - \bar{T}), \quad (13)$$

где ξ – эмпирический поправочный коэффициент, определяемый типом проволочной сетки наполнителя; $\bar{V} = \frac{G}{\rho W^{2/3}}$ – осредненная по объему W (камеры с наполнителем) скорость; G – расход газа, поступающего в объем W ; T – температура газа, поступающего в объем с наполнителем; \bar{T} – температура наполнителя; $\bar{S} = 2\pi \frac{d_g}{l_g} S_g$ – поверхность проволочной сетки наполнителя; S_g – площадь сетки; l_g – размер ячеек сетки; d_g – диаметр проволоки; ρ_g – плотность материала проволоки.

На основании уравнений (11), (12) получается система дифференциальных уравнений для определения параметров процесса: $\rho(t)$, $V(t)$, $W(t)$, $x(t)$,

$T(t)$, $\overline{T(t)}$, $p(t)$. В качестве начальных условий в первой камере принимаются параметры газа в стволе и скорость снаряда в момент входа в ПСУЗВ, в остальных камерах – атмосферные условия.

Эффективность понижения уровня звукового давления при работе ПСУЗВ оценивается с использованием соотношения [1]:

$$E = 20 \lg \frac{p_1(t^*)}{p_1(0)} \text{ дБ}, \quad (14)$$

где $p_1(t^*)$ – давление газа в первой камере в момент вылета снаряда из глушителя; $p_1(0)$ – баллистическое давление газа в канале ствола в момент входа снаряда в глушитель.

При проектировании ПСУЗВ с наполнителем его эффективность определяется соотношением [1]:

$$E = 10 \lg \left\{ \left[\frac{\rho_1(0)}{\rho_1(t^*)} \right]^2 \left[\frac{V_1(0)}{V_1(t^*)} \right]^3 \frac{S_b}{S_1} \right\}, \quad (15)$$

где $\rho_1(0)$ – плотность газа в канале ствола при входе снаряда в ПСУЗВ; $\rho_1(t^*)$ – плотность газа в первой камере при вылете снаряда из ПСУЗВ; $V_1(0)$ – скорость газа в канале ствола при входе снаряда в ПСУЗВ; $V_1(t^*)$ – скорость газа в первой камере при вылете снаряда из ПСУЗВ; S_1 – площадь поперечного сечения первой камеры; S_b – площадь поперечного сечения снаряда.

Ниже приводятся результаты расчетов температуры и давления в камерах ПСУЗВ-30Н для автомата Калашникова АК-74, изображенном на рис. 1 (здесь: 1 – переднее дно ПСУЗВ; 2 – перегородки камер; 3 – корпус; 4 – перепускные отверстия в центральной трубке; 5 – наполнитель) для следующих исходных данных:

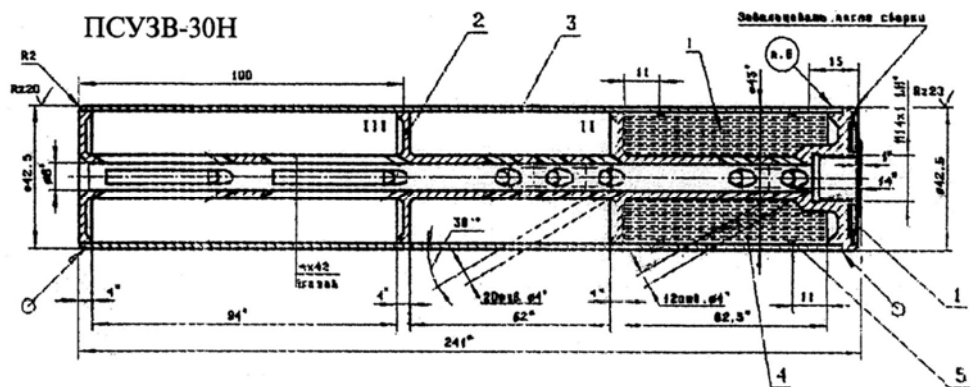


Рис. 1

- калибр оружия – 5,45 мм ;
- длина хода нарезов ствола до среза – 415 мм ;

- давление газов на срезе ствола – 40 МПа ;
- температура газов на срезе ствола – 1800 К ;
- газовая постоянная – 340 Дж/кг · К ;
- показатель адиабаты пороховых газов – 1,225 ;
- скорость пули на срезе ствола – 900 м/с ;
- масса пули – 3,45 г ;
- длина центрального канала ПСУЗВ (считая от среза) – 226 мм ;
- диаметр центрального канала – 8,0 мм ;
- число камер, кроме центрального канала – 3 ;
- объемы камер, начиная от среза [мм³] – 70325, 71230, 108745 ;
- площадь сетки наполнителя – 856,8 см².

При расчете были сделаны следующие допущения:

- параметры газа в каждой камере, включая камеру «ствол – центральная трубка», в каждый момент времени одинаковы во всем объеме камеры;
- процессы горения остатков пороха завершаются в канале ствола;
- процесс в камерах подчиняется уравнению состояния идеального газа;
- скорость пули в камере считается постоянной ($V_k = \text{const}$);
- при прохождении камер скорость пули увеличивается на $\Delta V_k = \text{const}$.

При таких допущениях система уравнений для каждой камеры записывается в виде [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp}{dt} = \frac{\gamma RT_0}{V} \dot{G}_0 - \frac{\gamma RT}{V} \dot{G}_k - \frac{p}{V} \frac{dW}{dt} \\ \frac{dp}{dt} = \frac{1}{V} (\dot{G}_0 - \dot{G}_k) - \frac{\rho}{V} \frac{dW}{dt} \\ p = \rho RT \\ \frac{dW}{dt} = VS \end{array} \right. , \quad (16)$$

где p – давление газа в камере; T – температура газа в камере; T_0 – температура газа на входе в камеру; γ – показатель адиабаты газа; V – скорость движения границ элементарного объема W – объем камеры; S – поперечная площадь камеры.

Секундные массовые расходы газа, поступающего в камеру и истекающего из нее, определяются по соотношениям:

$$\dot{G}_0 = \mu F \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} p_1 \rho_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \text{ при } \frac{p_2}{p_1} \geq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (17)$$

$$\dot{G}_\gamma = \mu F \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} p_1 \rho_1} \text{ при } \frac{p_2}{p_1} < \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

где F – площадь отверстия истечения; μ – коэффициент расхода; ρ – плотность газа в камере; ρ_1 – плотность газа на входе в отверстие; p_2, p_1 – противодавление газа в отверстии.

Решение системы (16) формулировалось как задача Коши с начальными условиями вида: $p_{t=0} = p_0, T_{t=0} = T_0, W_{t=0} = W_0$.

При интегрировании дифференциальных уравнений использовался метод Рунге–Кутты третьего порядка.

Недостатком изложенной методики, ограничивающим ее точность, является предположение о постоянстве параметров потока во всем объеме каждой камеры прибора [10]. В то же время камеры могут иметь значительную длину и содержать различные внутренние конструктивные элементы, например шнек. На рис. 2 изображена конструктивная схема ПСУЗВ со шнеком, где 1 – корпус ПСУЗВ; 2 – центральная трубка; 3 – перепускные отверстия, соединяющие полость центральной трубки с камерами 4; 5 – шнек.

Для таких конструктивных схем ПСУЗВ методика расчета была модифицирована следующим образом.

Длинные камеры ПСУЗВ, а также камеры, содержащие внутренние конструктивные части (перегородки, наполнитель и др.), разбиваются на последовательно расположенные элементы. При этом учитывается перетекание газа через границы между элементами. При разбиении камеры на несколько элементов дополнительно задаются каналы площадью S , соединяющие эти элементы и равные:

$$S = \pi(R^2 - r^2),$$

где R, r – соответственно радиусы корпуса (1) и втулки (2) проточной части камеры.

Если в данной камере расположен шнек, то площади указанных каналов с учетом перетекания газа вдоль лопасти шнека вычисляются по соотношению:

$$S = s_{ш}(R - r),$$

где $s_{ш}$ – шаг винтовой линии лопасти шнека.

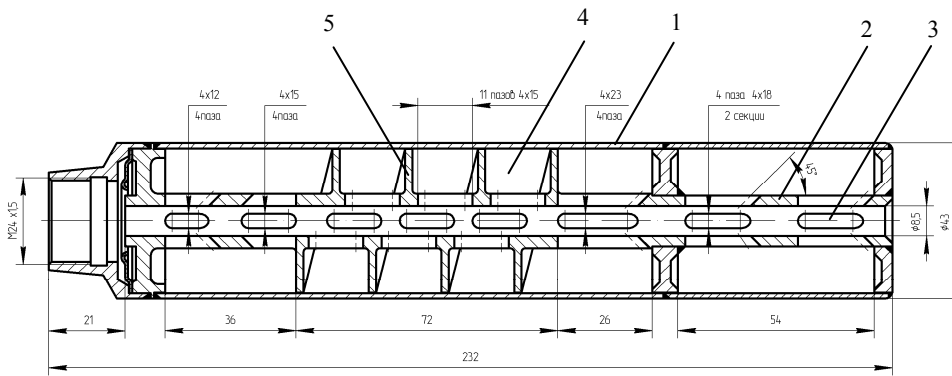


Рис. 2

Подобным образом учитываются различные возможные конструктивные элементы камер ПСУЗВ. Модифицированная методика позволяет на начальном этапе проектирования ПСУЗВ с конструкцией, содержащей элементы различной формы, определить в первом приближении основные параметры в полости ПСУЗВ и эффективность снижения уровня звука выстрела.

2. Результаты расчетных и экспериментальных исследований ПСУЗВ

На рис. 3, 4 приведены результаты расчетов давления и температуры газа в камерах ПСУЗВ-30Н в зависимости от расстояния L и L_c до среза ствола. Здесь L – текущая координата по оси ПСУЗВ; L_c – координаты донного среза снаряда, обозначенные на графике пунктирными линиями.

На рис. 5 приведены изменения давления и температуры в пятикамерном ПСУЗВ для автомата калибра 7,62 мм.

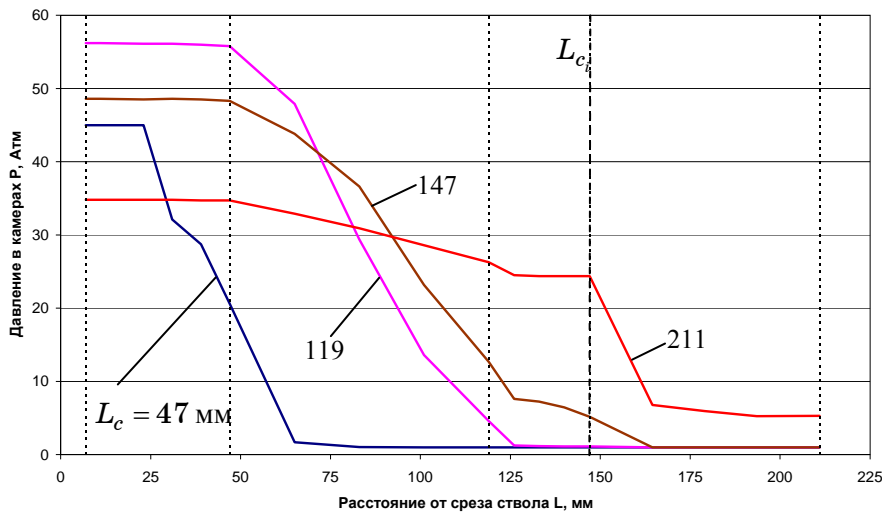


Рис. 3

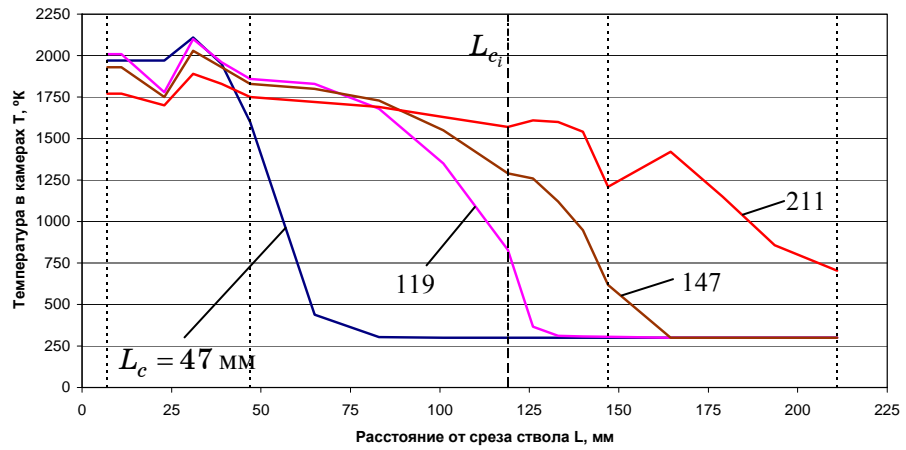


Рис. 4

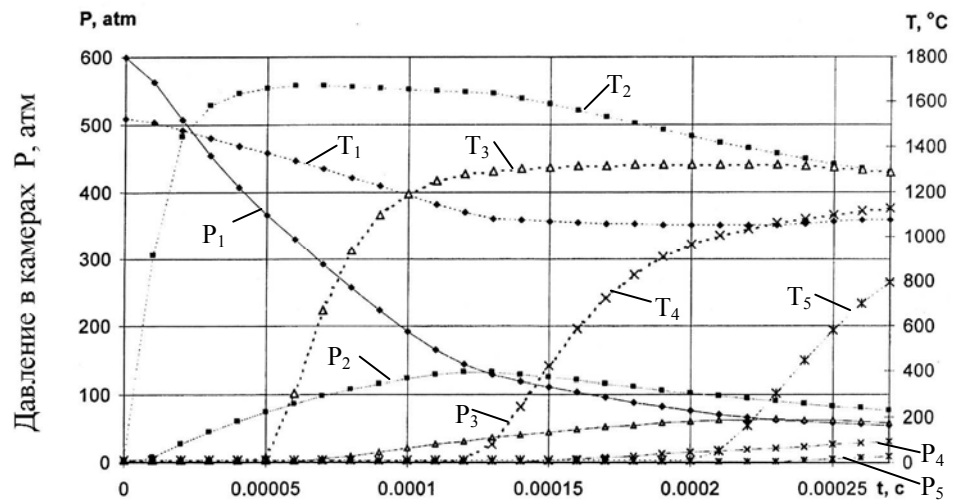
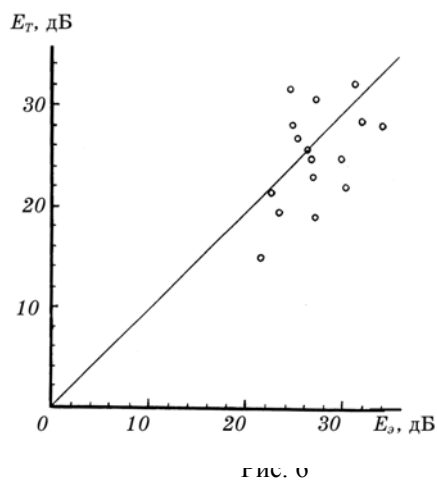


Рис. 5

Как видно из графиков на рис. 3 и 4, давление и температура в камерах падают с увеличением расстояния от дульного среза ствола. Давление в первой камере (p_1) падает по времени до установившейся величины в момент вылета снаряда из ПСУЗВ (рис. 5) [12]. В последующих камерах давление монотонно возрастает. Температура в первой камере падает, в последующих – возрастает по времени до установившегося значения на момент вылета.

Разработанный метод дает хорошие результаты при расчете эффективности глушения звука выстрела для различных конструкций ПСУЗВ. На рис. 6 приведено сопоставление расчетных значений эффективности снижения уровня звука выстрела (E_T) и экспериментальных данных ($E_{\text{э}}$) для 16 вариантов конструкции ПСУЗВ. Каждая точка на графике соответствует одному из испытанных ПСУЗВ. Абсцисса точки соответствует экспериментальному

значению эффективности глушения звука выстрела. Расстояние по вертикали от экспериментальной точки до биссектрисы угла между координатными осями составляет разницу между теоретическим и экспериментальным значениями эффективности. Сравнение расчетов и экспериментов показало, что указанная разница не превышает 15 %.



На рис. 7 показан график, зависимости тянущего усилия F , действующего со стороны ПСУЗВ на оружие в процессе движения снаряда в камерах. Зависимость демонстрирует возникновение знакопеременного тянущего усилия в течение около $5 \cdot 10^{-3}$ с, что влияет на динамику движения оружия малой массы и на точность стрельбы из такого оружия.

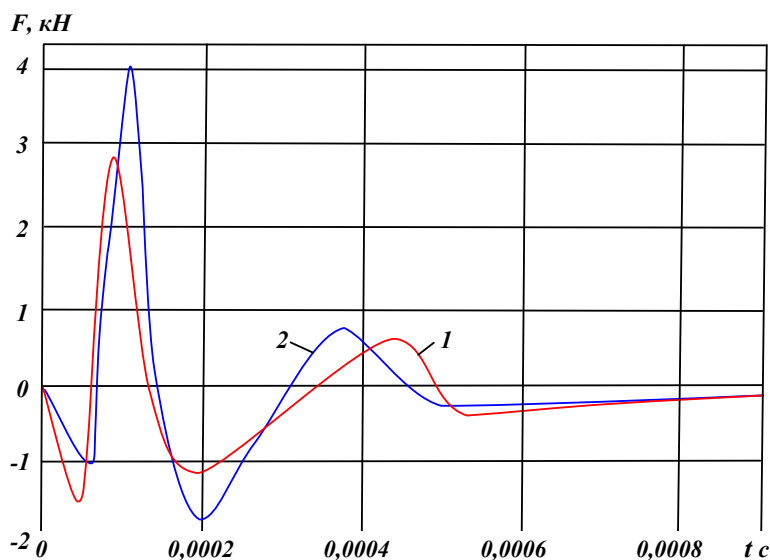


Рис. 7

Для исследования влияния наполнителя камер на эффективность глушения звука выстрела был изготовлен и испытан трехкамерный ПСУЗВ типа

ПБС-ИТМ-5 (разработки Института технической механики НАН Украины и НКА Украины) с намоткой на центральную трубку нескольких слоев сетки из нержавеющей стали (рис. 8). В экспериментах исследовались спектральные характеристики звука выстрела автомата АКС-74У с ПБС-ИТМ-5. Эффективность снижения звука выстрела определялась как разница экспериментальных значений уровня звука выстрела:

$$\Delta L = L - L_{\Gamma} ,$$

где L – уровень звука выстрела без ПСУЗВ; L_{Γ} – с ПСУЗВ.

Ниже приведены спектральные характеристики звука выстрела испытанного на полигоне автомата АКС-74У без ПСУЗВ (рис. 9), с ПБС-ИТМ-5 без наполнителя (рис. 10) и с наполнителем (рис. 11).

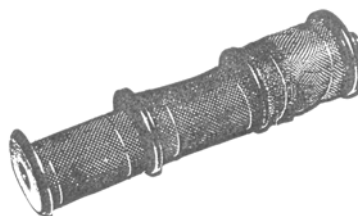


Рис. 8

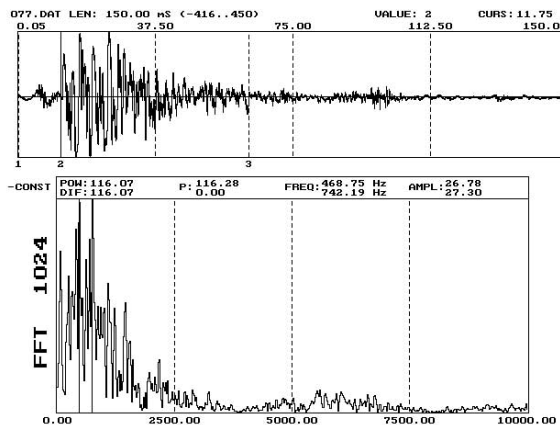


Рис. 9

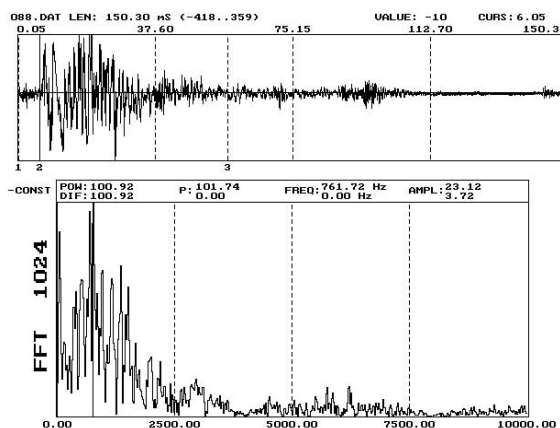


Рис. 10

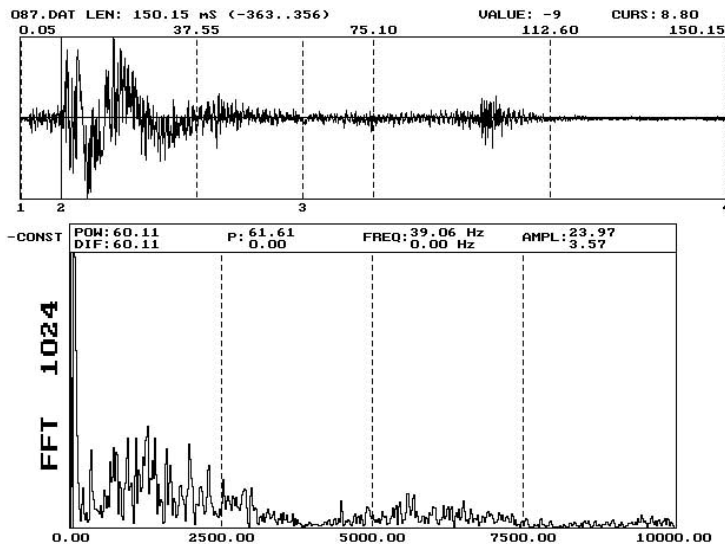


Рис. 11

Анализ полученных при испытаниях спектральных характеристик подтвердил расчетные данные о снижении уровня звукового давления (на 2 – 4 дБА), в основном в области низких звуковых частот.

В [1] приведен оригинальный подход к расчету основных характеристик многокамерного ПСУЗВ расширительного типа. Полагается, что эффективность глушителя повышается при последовательном расположении нескольких камер, разделенных перегородками с отверстиями, соосными стволу. При этом рассчитывается его внутренняя газодинамика с учетом того, что при использовании фигурных перегородок сложного профиля в его корпусе создаются поворот потока газа, противопотоки и турбулентные завихрения. Частицы газа, соударяясь, быстро теряют при этом свою энергию.

Из новейших разработок в этой области следует отметить ПСУЗВ к винтовке снайперской специальной (ВСС) «Винторез». В этом оружии ПСУЗВ интегрирован (но не составляет одно целое) со стволом и содержит завихрители потока газов. Пороховые газы попадают в полость ПСУЗВ через ряд веерообразных отверстий в стенке ствола. В расширительной камере происходит сброс давления, затем газы разделяются на противопотоки и окончательно охлаждаются. Известны и более ранние разработки, например [12, 13].

При проектировании ПСУЗВ возникает необходимость определения звукообразования от ПСУЗВ реактивного типа и со звукопоглощающими включениями. С помощью пакета прикладных программ [11, 14], был проведен вычислительный эксперимент для широкого класса неоднородностей в полости многокамерных ПСУЗВ реактивного и поглощающего типов для стрелкового оружия.

Декомпозиционный подход [11, 14] базируется на математической модели процессов звукообразования в системе ствол – ПСУЗВ – неограниченная среда:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L^{-1}T^{11} & L^{-1}T^{12} \\ M^{-1}NT^{21} & M^{-1}NT^{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

где A , B – векторы, компонентами которых являются коэффициенты рядов разложения акустического поля по собственным функциям шарового акустического волновода; T – матрица передачи; L , M , N – матрицы с элементами

$$L_{kn} = \int_{S_2} P_n \left(r, \frac{\pi}{2}, \alpha \right)^{\rho_{z^*}} v_{k(2)}(r, \alpha) d^{\rho} S_2,$$

$$M_{kn} = \int_{S_2} v_{n(2)} \left(r, \frac{\pi}{2}, \alpha \right) p_{k(1)}(r, \alpha) d^{\rho} S_1,$$

$$N_{kn} = \int_{S_2} v_{n(2)}(r, \alpha) p_{k(1)}(r, \alpha) d^{\rho} S_2,$$

здесь p – избыточное давление, r , θ , α – сферические координаты; S_2 – входное сечение ПСУЗВ; S_1 – входное сечение полусферы воловода; v – вектор скорости частиц газа; a_1 , b_1 – векторы, компонентами которых являются коэффициенты рядов Фурье разложения акустического поля на входном сечении S_2 по собственным функциям круглого акустического волновода (ствола):

$$a_{k(1)}(n\omega) = iA_{0m} \frac{2\pi\Gamma_{0m}(n\omega)R J_1(\chi_{0m}R)}{\omega\rho_0\tau(\alpha + in\omega)\chi_{0m}} (1 - \exp(-(\alpha + in\omega)\tau)) p_1,$$

$$b_{k(1)}(n\omega) = A_{0m} \frac{2\pi R J_1(\chi_{0m}R)}{\tau(\beta + in\omega)\chi_{0m}} (1 - \exp(-(\beta + in\omega)\tau)) v_1^z,$$

здесь $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; $k = \{0, m\}$; $J_1(\chi_{0m}R)$ – функция Бесселя 1-го порядка; $\chi_{0m} = \alpha_{0m}/R$, α_{0m} – корни уравнения $J_1(x) = 0$; Γ_{0m} – постоянные распространения собственных волн в круглом акустическом волноводе; R – радиус акустического волновода (ствола); $A_{0m} = \sqrt{\frac{2\omega\rho_0}{i\Gamma_{0m}(n\omega)R^2(J_0^2(\chi_{0m}R) + J_1^2(\chi_{0m}R))}}$ – коэффициенты нормировки.

Входными параметрами для математической модели являются: давление p_1 и скорость частиц газа v_1 в стволе (на бесконечно малом расстоянии от сечения S_1); длительности τ_α , τ_β импульсов p_1 и v_1 . Параметры α и β на уровне 0,25 длительности импульсов τ_α и τ_β определяются следующим образом:

$$\alpha = -\frac{1}{\tau_\alpha} \ln 0,25 \quad \beta = -\frac{1}{\tau_\beta} \ln 0,25.$$

На рис. 12 [11] показаны результаты расчета зависимости интенсивности звука от угла наклона диафрагм в ПСУЗВ.

Результаты математического моделирования получены с учетом числа временных гармоник, равного 150, и числа пространственных гармоник, равного 100. Геометрия поверхности диафрагм ПСУЗВ аппроксимировалась ступенчатой моделью; число ступенек – 45. Дальнейшее расширение базиса временных и пространственных гармоник и увеличение числа ступенек практически не изменяло результатов математического моделирования.

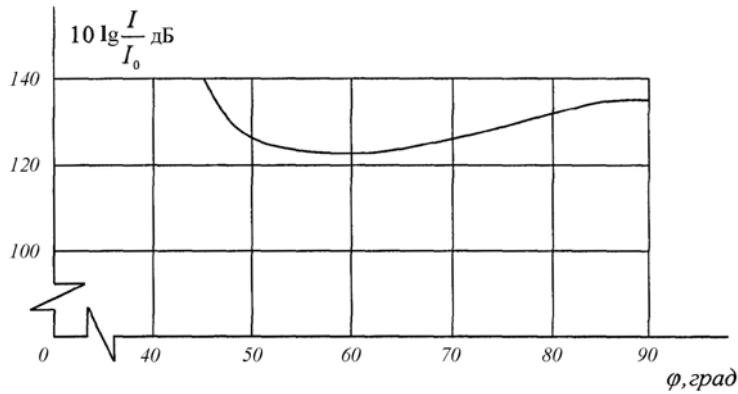


Рис. 12

Из графика (рис. 12) следует, что оптимальные значения угла φ наклона диафрагмы составляют $54 \div 65^\circ$. При этих углах интенсивность звука (в точке наблюдения) наименьшая.

На рис. 13 [11] приведено сравнение результатов математического моделирования с натурным экспериментом. Сравнение результатов показало вполне удовлетворительное их совпадение, свидетельствующее об эффективности математической модели звукообразования [14] для проектных разработок ПСУЗВ.

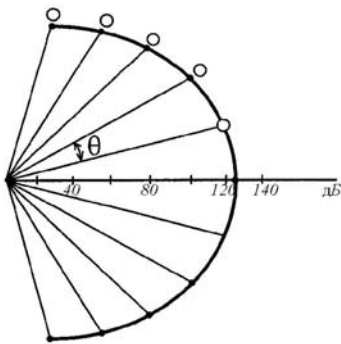


Рис. 13

Этот программно-моделирующий комплекс позволяет проводить вычислительный эксперимент при проектировании ПСУЗВ с широким диапазоном структур неоднородностей в его полости.

На рис. 14 показана расчетная зависимость [11] интенсивности звука от длины L звукопоглощающего включения. Для выбранной конструкции ПСУЗВ наименьшая интенсивность звука наблюдалась при длине звукопоглощающего включения, равной 60 – 80 мм.

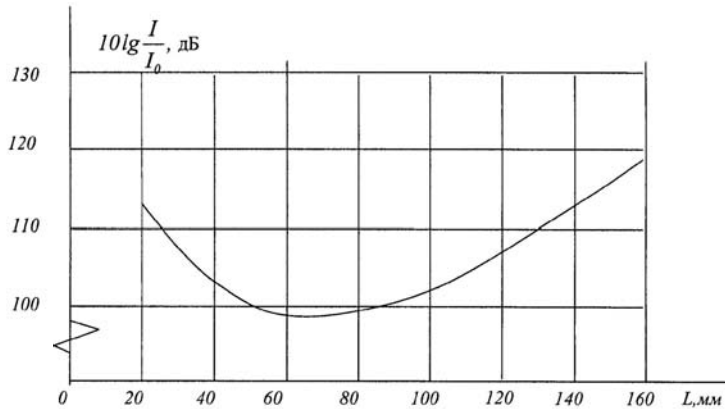


Рис. 14

Результаты численных исследований с использованием методических подходов [11, 14] показали, что интенсивность звука от ПСУЗВ со звукопоглощающим включением на 20 – 24 дБ ниже интенсивности звука конструкций без наполнителя.

3. Особенности конструкторской отработки ПСУЗВ

Основные требования, предъявляемые к разрабатываемым конструкциям ПСУЗВ, отражаются в технических условиях (ТУ). При отработке ПСУЗВ серии ПБС-ИТМ для автоматов Калашникова были разработаны ТУ [15], в которых сформулированы следующие требования к эффективности и массогабаритным показателям:

- эффективность снижения уровня звукового давления $\Delta L \geq 30$ дБА;
- удерживающий от развинчивания момент узла стыковки-расстыковки $M_{уд} \geq 7 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- радиальное биение выходного отверстия канала относительно оси ствола оружия $\Delta r \leq 0,3$ мм;
- масса ПСУЗВ $M_{г} \leq 0,75$ кг;
- наружный диаметр $d \leq 43$ мм;
- длина $l \leq 240$ мм.

Перед проведением отработки ПСУЗВ разрабатывается, согласуется и утверждается Программа [16] и Методика [17] проведения исследования экспериментальных образцов.

Реальные значения эффективности снижения уровня звука выстрела разработанного ПСУЗВ определяются при натурных испытаниях [18]. Сравнительный анализ полученных экспериментальных результатов является базой для выбора направления совершенствования конструкций.

В качестве иллюстрации порядка разработки и отработки ПСУЗВ ниже приводятся результаты проведенных ИТМ НАНУ и НКАУ и предприятием «Тактические системы» испытаний ПСУЗВ для оружия калибра 5,45 мм и 5,6 мм [18]. При выстреле патронами, дающими дозвуковую скорость вылета пули, все ПСУЗВ имеют удовлетворяющую техническому заданию эффективность уменьшения звука выстрела.

Результаты испытаний ПСУЗВ показали преимущества большого объема полости его корпуса. Наименее эффективным оказался ПСУЗВ со средним объемом и конусными рассекателями, ограничивающими камеры. При больших паузах между выстрелами эффективность у разных ПСУЗВ менялась по-разному, причем проявлялся эффект повышения уровня звука при первом выстреле через ПСУЗВ. Подтверждено явление повышения уровня звука выстрела с увеличением интервала времени между выстрелами, что связано, по-видимому, с дополнительным выделением энергии при сгорании кислорода в «проветренной» полости ПСУЗВ.

Из полученных результатов испытаний следует, что для снижения уровня звука выстрела оружия калибра 5,6 мм эффективны ПСУЗВ достаточной простой конструкции. Для оружия большего калибра со штатным боеприпасом при сохранении требований по массогабаритным характеристикам, с целью обеспечения высокой эффективности снижения уровня звука выстрела требуется усложнение конструкции рассекателя ПСУЗВ.

Выполненные по различным методикам расчетные исследования течения пороховых газов в полости ПСУЗВ и результаты испытаний позволили выявить ряд закономерностей, присущих многократному расширению потока пороховых газов в камерах. В частности, было установлено следующее:

- характеристики газового потока в полости ПСУЗВ определяются параметрами пороховых газов на дульном срезе ствола, геометрическими характеристиками камер, конструктивными и кинематическими

- характеристиками снаряда, зазором между снарядом и диафрагмами, разделяющими камеры;
- влияние процесса установления течения на процесс формирования потока в каждой последующей камере существенно увеличивается при уменьшении размеров предыдущей камеры;
 - наличие снаряда в потоке приводит к его торможению в центральной части и образованию отраженной от дна снаряда ударной волны, которая, действуя на диафрагмы камер, увеличивает тянущее усилие ПСУЗВ на оружие и тормозит поток в камерах;
 - наибольшим тепловым нагрузкам у многокамерного ПСУЗВ подвергается первая камера;
 - максимальные значения давления наблюдаются в первой камере на поверхности диафрагмы – в местах ее сочленения с оболочкой и вблизи снарядного входа в диафрагму;
 - в камерах образуются вихри, массовая скорость потока в которых существенно меньше скорости на оси потока, что приводит к интенсификации процесса догорания пороховых газов в камерах и уменьшению поперечного сечения центральной части потока;
 - процесс установления течения в объеме ПСУЗВ приводит к возникновению нестационарных ударных волн, давление на фронте которых соизмеримо с давлением в потоке, а также зон разрежения, давление в которых ниже атмосферного; эти ударные волны обуславливают пульсирующий характер изменения давления в камерах, причем наиболее существенные пульсации возникают в первой камере, где интенсивность потока максимальна;
 - пульсации давления в полости ПСУЗВ могут создавать дополнительный шум пороховых газов;
 - наличие снаряда в потоке пороховых газов приводит к увеличению максимальных значений давления в режиме установления течения и к большему динамическому воздействию на оружие со стороны ПСУЗВ;
 - режим установления течения приводит к возникновению знакопеременного тянущего усилия, действующего со стороны ПСУЗВ на оружие в процессе движения снаряда в камерах, что влияет на динамику движения оружия малой массы и на точность стрельбы из такого оружия;
 - количество перегородок в полости ПСУЗВ не должно превышать пяти; при этом отмечается наибольшая эффективность снижения уровня звука выстрела.

1. Коновалов Н. А. Ручное огнестрельное оружие бесшумного боя / Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, А. Д. Скорик и др. – Днепропетровск : ИТМ. – 2008. – 304 с.
2. Keith Hudson M. CFD Approach to firearms sound suppressor design / M. Keith Hudson, C. Luchini, J. Keith Clutter, W. Shyy // AIAA Paper 96-3020.
3. Коновалов Н. А. Математическое моделирование газодинамического процесса работы прибора снижения уровня звука выстрела / Н. А. Коновалов, Ю. А. Кваша и др. // Техническая механика. – 1999. – №1. – С. 13 – 17.
4. Коновалов Н. А. Математическая модель и методика расчета процесса заполнения газом камер прибора снижения уровня звука выстрела с учетом наполнителей / Н. А. Коновалов, Ю. А. Кваша, О. В. Пилипенко, А. Д. Скорик // Техническая механика. – 2005. – №2. – С. 137 – 146.
5. Бучарский В. Л. Проектирование прибора малошумной стрельбы методами численного моделирования / В. Л. Бучарский, К. Ю. Добринская, В. В. Сербин, А. В. Сичевой // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2009. – №2. – С. 3 – 7.

6. Терехин А. С. Снижение аэродинамического шума при помощи комбинированных глушителей / А. С. Терехин, В. И. Яхонтов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Изд. МВТУ им. Баумана. – 1984. – №4. – С. 37 – 40.
7. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Абрамович Г. Н. – М. : Наука, 1976. – 888 с.
8. Clutter J. K. Study of Fast Transient Flow Phenomenon for Munition Application / J. K. Clutter, G. Abate, W. Shyy, C. Segal // AIAA Paper 96-0829.
9. Стрельников Г. А. Регулируемые сверхзвуковые сопла малой длины / Г. А. Стрельников. – Днепропетровск : Изд-во ДГУ, 1993. – 192 с.
10. Коновалов Н. А. Определение газодинамических характеристик и эффективности многокамерных приборов снижения уровня звука выстрела стрелкового оружия с рассекателями потока оружейных газов сложной формы / Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, Ю. А. Кваша, В. И. Коваленко, Е. О. Пугач, А. Д. Скорик // Техническая механика. – 2009. – №2. – С. 36 – 45.
11. Патент на изобретение 2376544 С2 РФ, МПК (2006.01) F41A 21/30. Глушитель реактивно-поглощающего типа для стрелкового оружия / И. И. Грачёв, О. А. Голованов, С. Н. Курков, А. И. Грачёв, В. В. Смогунов, Е. М. Устинов, В. И. Вареница, А. А. Тюмин, заявитель и патентообладатель Пензенский Артиллерийский Инженерный Институт, 2008101683/02, заявл. 15.01.2008 ; опубл. 20.12.2009, Бюл. № 35. – 8 с.
12. Carofano G. C. Blast Field Contouring Using Upstream Venting / Carofano G. C. // ARCCB-TR-93009, US Army Ammunition Research, Development and Engineering Center, March 1993.
13. Carofano G. C. A Note on the Blast Signature of a Cannon / Carofano G. C. // ARCCB-TR-92014, US Army Ammunition Research, Development and Engineering Center, March 1992.
14. Голованов О. А. Декомпозиционный подход к решению задач прикладной электродинамики и акустики с применением базовых элементов в виде автономных блоков / О. А. Голованов, Г. С. Макеева, А. И. Грачев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2006. – № 6 (27). – С. 55.
15. Приборы снижения уровня звука выстрела для автоматов и ручных пулеметов Калашникова. Технические условия. ТУ У 88.057.004-98.
16. Программа проведения исследований экспериментальных образцов приборов снижения уровня звука выстрела (ПСУЗВ) для автоматов Калашникова и их модернизаций ; ПИ-ПСУЗВ/АК-01-217. – Днепропетровск : ИТМ НАНУ и НКАУ, 1998. – 5 с.
17. Методика проведения исследований эффективности снижения уровня звука выстрела экспериментальными образцами приборов ПСУЗВ в стрелковом автоматическом оружии (автоматы Калашникова АК и АКМ) ; МИ-ПСУЗВ-7 / АК-01-217. – Днепропетровск : ИТМ НАНУ и НКАУ, 1998. – 7 с.
18. Коновалов Н. А. Сравнительные испытания глушителей звука выстрела различных конструкций на эффективность / Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, Г. А. Поляков, Е. О. Пугач, А. Д. Скорик, В. И. Коваленко // Техническая механика. – 2009. – № 3. – С. 132 – 140.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 06.10.10,
в окончательном варианте 11.10.10