

УДК 519.63

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИБОРА МАЛОШУМНОЙ СТРЕЛЬБЫ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. Л. БУЧАРСКИЙ, канд. техн. наук, **К. Ю. ДОБРИНСКАЯ**, инж., **В. В. СЕРБИН**, канд. техн. наук,
А. В. СИЧЕВОЙ, д-р техн. наук (Днепропетровский нац. ун-т им. О. Гончара)

Приведены результаты проектирования прибора малошумной стрельбы методами численного моделирования. Построена конечно-разностная модель течения пороховых газов в полости прибора малошумной стрельбы. Предложена методика определения оптимальной формы проточной части.

Наведено результати проектування приладу малошумної стрільби методами числового моделювання. Побудовано кінцево-різницеву модель витікання порохових газів у порожнині приладу малошумної стрільби. Запропоновано методикку визначення оптимальної форми проточної частини.

Results of designing of the device for low-noise shooting by methods of numeric at modeling are presented. Finite difference model of the powder gases flow in cavity of the low-noise device of shooting was built. Methodology for determining optimum shape of the flow part was suggested.

Устройства для глушения звука выстрела существуют достаточно давно. Приборы малошумной стрельбы нашли широкое применение в годы развития спецслужб и остаются актуальными по сей день.

Физически звук выстрела объясняется высоким давлением пороховых газов на дульном срезе ствола, во много раз превышающим давление окружающего воздуха: давление пороховых газов у дульного среза ствола стрелкового оружия соответствует десяткам мегапаскалей. Расширение пороховых газов после вылета пули из ствола и образование ударной волны перед пулей при ее сверхзвуковой скорости и производит шумовой эффект. Таким образом, к основным источникам звука можно отнести головную ударную волну, которая генерируется снарядом и дульную волну, создаваемую пороховыми газами, идущими вслед за пулей. Из изложенного выше становится очевидным, что при проектировании прибора малошумной стрельбы конструкция должна быть такой, чтобы интенсивность этих волн была ниже, чем без прибора.

Существует достаточно большое количество работ, посвященных исследованию процессов в приборах малошумной стрельбы [1, 2].

Однако везде моделирование процессов в приборах рассматривалось без учета движения снаряда в полости прибора.

Цель настоящей работы — проектирование прибора малошумной стрельбы методами численного моделирования с учетом движения снаряда цилиндрической формы.

Все дальнейшие рассуждения относятся к многокамерному прибору малошумной стрельбы расширительного типа.

Модель течения газа в приборе малошумной стрельбы. При построении модели были использованы следующие допущения:

1) процессы горения в канале ствола завершены до вылета пули;

2) характеристики рабочего тела (пороховых газов) подчиняются уравнению состояния идеального газа;

3) течение пороховых газов в устройстве считается двумерным и описывается системой нестационарных двумерных уравнений газовой динамики в осесимметричной постановке;

4) при этом можно пренебречь вязкой диссипацией по сравнению с рассеянием энергии в ударных волнах.

С учетом сделанных допущений за основу построения модели процессов в приборе малошумной стрельбы была взята система урав-

© В. Л. БУЧАРСКИЙ, К. Ю. ДОБРИНСКАЯ, В. В. СЕРБИН, А. В. СИЧЕВОЙ, 2009

нений Эйлера динамики невязкого сжимаемого газа:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\partial B}{\partial r} = -\frac{1}{r} F_0,$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho v u \\ H u \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v \\ p + \rho u^2 \\ H v \end{bmatrix}, \quad F_0 = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v \\ \rho v^2 \\ H v \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где ρ , u , v , p — соответственно плотность, компоненты скорости и давление рабочего тела; $E = \rho \left(\varepsilon + u^2/2 \right)$ — полная энергия газа в единице объема; $H = E + p$ — полная энтальпия единицы массы рабочего тела; $\varepsilon = C_v T = p / (k - 1) \rho$ — удельная внутренняя энергия.

Система уравнений (1) рассматривалась в безразмерной форме. Параметры потока обезразмеривались по параметрам невозмущенного газа.

Расчетная область, схематично представленная на рис. 1, включает полость устройства

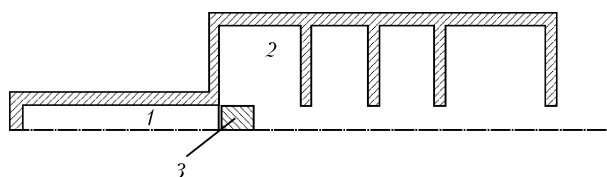


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 — канал ствола; 2 — полость прибора малошумной стрельбы; 3 — снаряд

ва малошумной стрельбы и канал ствола. Это позволило отойти от постановки начальных условий дозвукового вдува на входе в прибор малошумной стрельбы.

Начальные параметры газа в расчетной области задавали следующим образом

1. Параметры газа в канале ствола получены из решения основной задачи внутренней баллистики [3]. При этом

$$p_1 = -5624,86 \cdot z^2 + 583, \quad u_1 = 12,6 \cdot z,$$

$$\rho_1 = \frac{p_{\text{дн}}}{(T_1 R)}.$$

2. В полости прибора малошумной стрельбы начальные параметры газа приняты равными параметрам невозмущенного газа при нормальных условиях $p_2 = 1$, $v_2 = 0$, $u_2 = 0$, $\rho_2 = 1$.

На твердой стенке и на оси ставились граничные условия непротекания:

$$v_{\perp} = 0, \quad \partial f / \partial n = 0, \quad f = (p, \rho, v_{\parallel}, E),$$

где v_{\parallel} — касательная к стенке, составляющая скорости; v_{\perp} — составляющая скорости, направленная по нормали к стенке.

На выходной границе ставились условия свободного истечения: $\partial F / \partial n = 0$.

Система (1) состоит из неоднородных дифференциальных уравнений в частных производных. Аналитическое решение данной системы уравнений вызывает определенные трудности, поэтому ее решали с помощью численных методов. Для аппроксимации данной системы выбрана явная, условно устойчивая схема Лакса первого порядка точности [4]:

$$\frac{\Omega_{ij}^{n+1} - (\Omega_{i,j+1}^n + \Omega_{i,j-1}^n + \Omega_{i+1,j}^n + \Omega_{i-1,j}^n) / 4}{\Delta t} +$$

$$+ \frac{A_{i+1,j}^n - A_{i-1,j}^n}{2\Delta z} + \frac{B_{i,j+1}^n - B_{i,j-1}^n}{2\Delta r} = \frac{1}{r} F_{ij}^n, \quad (2)$$

где Δt — шаг по времени; Δz , Δr — шаг соответственно по продольной и поперечной координате z , r ; i , j — номера узлов сетки соответственно по продольной и поперечной координате z , r ; n — номер временного слоя; Ω_{ij}^{n+1} — значение вектора-столбца Ω в соответствующем узле сетки.

Пример дискретизации расчетной области представлен на рис. 2.

Перемещение снаряда в разностной модели учитывали путем перестройки расчетной сетки с помощью перемещения ячеек, соответствующих снаряду, согласно его закону движения

$$m \ddot{x}(t) = \Delta P, \quad (3)$$

где m — масса снаряда, кг; $x(t)$ — перемещение снаряда, м; ΔP — сила, обусловленная перепадом давления, на правом и левом торцах снаряда, Н.

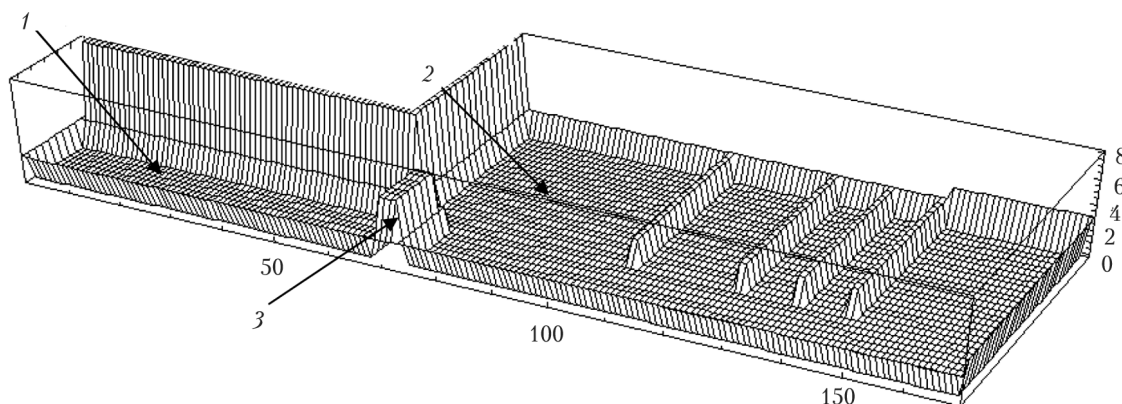


Рис. 2. Пример дискретизации расчетной области: 1 — канал ствола; 2 — полость прибора маломощной стрельбы; 3 — снаряд

При перестроении расчетной сетки учитывали изменение параметров газа в заснарядном пространстве и перед пулей в соответствии с законами адиабатического расширения и сжатия.

Шаг по времени определяли из условия устойчивости конечно-разностной схемы (2) — условия Куранта–Фридрихса–Леви:

$$v = \frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq 1, \quad (4)$$

где v — число Куранта; c — скорость звука; Δx — шаг по пространственной координате.

Изолинии давления в разные моменты времени для одной из рассчитанных конструкций полости прибора маломощной стрельбы представлены на рис. 3.

Очевидно, что, изначально расширяясь, газ начинает истекать из канала ствола, при этом формируется ударная волна (рис. 3, *a*). Перед снарядом заметно формирование головной волны. Пороховые газы расширяются при достаточно высоких параметрах, поэтому в начале процесса истечения распространяются быстрее, чем движется снаряд, но уже на рис. 3, *б* видно, что в результате резкого увеличения свободного объема мощная волна сжатия пороховых газов теряет часть энергии и пуля в силу своей начальной сверхзвуковой скорости движется несколько быстрее формирующегося фронта волны пороховых газов. Из рис. 3, *a–д* видно, что давление, характерное для головной волны перед снарядом, существенно меньше, чем на фронте волны

сжатия пороховых газов. Поэтому на рис. 3, *e* представлена головная ударная волна, образующаяся перед пулей, и волна разрежения, которую можно наблюдать за снарядом. Ос-

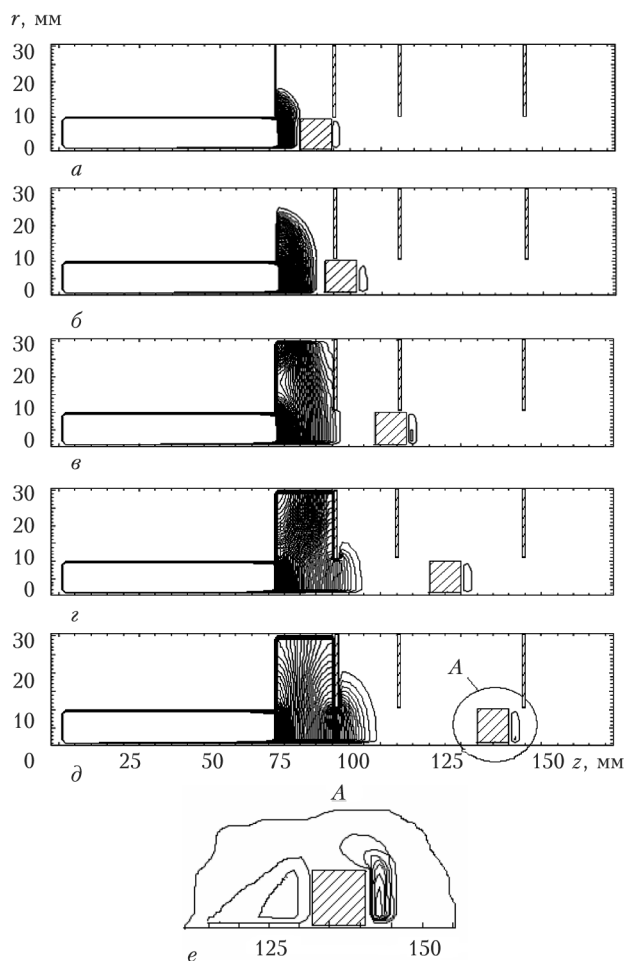


Рис. 3. Пример картины течения газа в устройстве (*a–e* см. в тексте)

новное звуковое воздействие определяется ударной волной, создаваемой пороховыми газами. На представленной картине течения наблюдается явление дифракции при прохождении этой волны через отверстие в перегородке в полости прибора малошумной стрельбы (рис. 3, σ - δ). Очевидно, что волна, сталкиваясь с препятствием, теряет часть своей энергии и далее проходит уже с меньшей интенсивностью. При этом также формируется отраженная от перегородки волна, направленная в сторону канала ствола. Картина аналогично повторяется при прохождении волны сжатия через отверстия в других перегородках. За счет этих процессов в полости прибора малошумной стрельбы интенсивность головной волны падает и соответственно давление на выходе из прибора становится меньше, чем на входе. Таким образом, построенная модель не противоречит действительным физическим процессам.

Проектирование проточной части прибора малошумной стрельбы. Для получения оптимальной конструкции прибора многократно решали прямую задачу определения параметров газа в полости прибора с изменением конфигурации проточной части. В качестве оптимизируемых параметров были выбраны количество перегородок, их внутренний диаметр и расстояние между ними. Критерием оптимизации выступал уровень звука на выходе из прибора N (дБ), который определяли в логарифмических единицах — децибелах и рассчитывали по формуле

$$N = 20 \operatorname{Log}_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right), \quad (5)$$

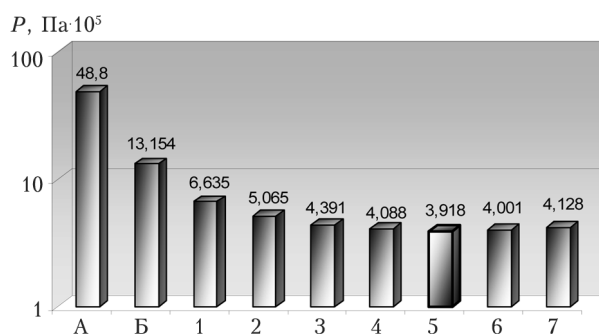


Рис. 4. Изменение давления на выходе из прибора в зависимости от количества перегородок

где P_1 — звуковое давление, Па; P_0 — базовое значение звукового давления, равное $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Для определения оптимальной конструкции проточной части использовали метод независимых переменных. Изначально определяли оптимальное положение и диаметр первой перегородки. Таковым являлось положение перегородки, при котором давление на выходе из прибора будет наименьшим. Оптимум определяли методом половинного деления с изменением диаметра отверстия. Таким образом, определено положение и диаметр отверстия первой перегородки, при которых давление на выходе из прибора малошумной стрельбы — минимальное.

При определении оптимального положения и диаметра отверстий второй перегородки в полости прибора учитывали геометрию и расположение предыдущих перегородок. Аналогично определяли оптимальные положения и диаметры отверстий последующих перегородок.

В ходе определения положений перегородок, обеспечивающих минимальное давление на выходе из прибора, выявлена следующая закономерность. Диаметры отверстий перегородок, обуславливающих оптимальную форму проточной части, являлись минимальными. Это легко можно объяснить тем, что распространяющаяся волна сжатия теряет энергию именно за счет внезапных сужений и расширений потока, которые максимальны при наименьших диаметрах отверстий. Поэтому принято решение дальнейшую оптимизацию проточной части проводить для перегородок с минимальным диаметром отверстий.

Все давления, полученные в результате многократного решения прямой задачи, были затабулированы.

На рис. 4 представлено изменение давления на выходе из прибора малошумной стрельбы при оптимальной конструкции для каждого количества перегородок.

Давления на выходе из прибора на рис. 4 показаны с использованием логарифмической шкалы. Значения А и Б соответствуют давлению при выстреле без прибора малошумной стрельбы и конструкции прибора без перегородок. Очевидно, что минимальному значению давления на выходе из прибора мало-

шумной стрельбы соответствует конструкция с пятью перегородками. Следует также заметить, что при увеличении количества перегородок давление на выходе из прибора начинает расти и приводит к загромождению проточной части прибора. В пределе при бесконечном количестве перегородок прибор малошумной стрельбы вырождается в удлинение ствола, при котором давление на выходе будет порядка давления без использования прибора малошумной стрельбы.

Динамика изменения уровня шума при отсутствии прибора малошумной стрельбы и при различном количестве перегородок представлена на рис. 5. Из рисунка видно, что наименьший уровень шума соответствует оптимальной конструкции с пятью перегородками. Уровень шума в 52 дБ можно сравнить с уровнем звука при выстреле из пневматической винтовки, что для огнестрельного малошумного оружия вполне приемлемо.

Таким образом, в работе построена конечно-разностная модель течения в полости прибора малошумной стрельбы, с использованием которой проведена оптимизация формы проточной части прибора. По результатам проведенной оптимизации был спроектирован

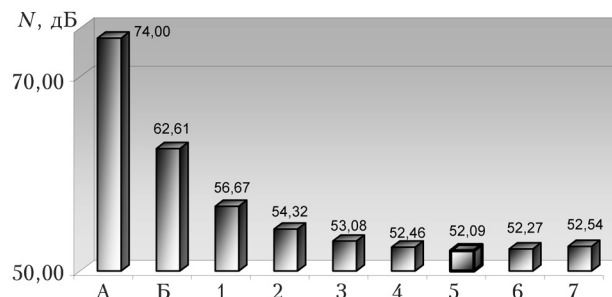


Рис. 5. Изменение уровня шума в зависимости от количества перегородок

прибор малошумной стрельбы, обеспечивающий звук выстрела в 52,09 дБ, что на 22,91 дБ меньше, чем при выстреле без прибора малошумной стрельбы. 🎯

1. *Математическое моделирование газодинамического процесса работы прибора снижения уровня звука выстрела* / Н. А. Коновалов, Ю. А. Кваша, А. Д. Кулик и др. // Техн. механика. — 1999. — № 1. — С. 13–17.
2. *Математическая модель и методика расчета процесса заполнения газом камер прибора снижения уровня звука выстрела с учетом наполнителей* / Ю. А. Кваша, Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, А. Д. Скорик // Там же. — 2005. — № 2. — С. 137–146.
3. *Проектирование ракетных и ствольных систем* / Под ред. Б. В. Орлова. — М.: Машиностроение, 1974. — 828 с.
4. *Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т.: Пер. с англ.* — М.: Мир, 1990. — Т. 1. — 384 с.

8-11 September 2009
ExCeL London UK
www.dsei.co.uk

Defence Systems & Equipment International Exhibition 2009
The world's most prestigious defence exhibition

The world's largest **fully integrated** international **defence exhibition** bringing together senior international visitors and military influencers in an **optimal business environment**.

DSEi 8-11 September 2009. ExCeL, London, UK, E16 1XL

Международная выставка оборонных систем и военной техники 2009
8-11 сентября 2009 г., Выставочный центр, Лондон, Великобритания