

Баллистическая бикалиберная установка с деформируемым поршнем

© Н.В. Быков, В.В. Зеленцов, А.С. Карнейчик

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрен принцип работы цилиндроконической баллистической установки с деформируемым поршнем, обеспечивающей высокие скорости метаемых тел. Термогазодинамические процессы описаны на основе квазиодномерных газодинамических уравнений, решаемых численно на подвижной сетке методом Годунова. Установлено, что использование данных баллистических установок позволяет увеличить дульную скорость более чем в 1,5 раза.

Ключевые слова: внутренняя баллистика, цилиндроконические стволы, высокоскоростное метание, схема Годунова.

Введение. Попытки использования конических стволов для повышения начальной скорости снаряда артиллерийских орудий предпринимались еще с конца XIX в., когда немецкий инженер Г. Герлих предложил винтовку с коническим стволом, дульная скорость которой значительно превышала аналоги того времени [1]. На протяжении XX в. предлагались различные конструкции стволов с коническими элементами, в частности в Германии был разработан цилиндроконический ствол, в котором снаряд первоначально разгонялся на цилиндрическом участке диаметром 75 мм по классической артиллерийской схеме, затем благодаря специальной юбочной конструкции проходил конус и переходил в цилиндр уже меньшего диаметра (55 мм). Как было показано в работе [1], в данном случае имеется не столько реальный прирост скорости, сколько возможность достижения той же скорости при более короткой длине ствола, что аналогично идее использования подкалиберных снарядов.

В действительности же имеется возможность более полного использования конического канала для разгона снаряда. Это обеспечивается за счет способности пластических материалов при уменьшении диаметра трубы увеличивать свою скорость. Таким образом, если метаемая сборка состоит не только из тяжелого поражающего элемента, но также включает деформируемый поршень, отделенный от метательного заряда инерционным поддоном, то возможно достижение более высоких скоростей, обеспечиваемых классическими схемами метания. Похожий эффект, наблюдаемый при выстреле из

двухступенчатой легкогазовой пушки с тяжелым поршнем (гидродинамический эффект [2]), заключается в том, что тяжелый поршень при попадании в переходный конус между двумя областями создает волну сжатия, которая распространяется в среде легкого газа и придает дополнительный импульс разгоняемому телу.

Принципиальные схемы устройства легкогазовой и цилиндроконической баллистических установок приведены на рис. 1. Отсутствие камеры с легким газом в цилиндроконической установке позволяет более полно использовать длину ствола, а также значительно упростить процесс эксплуатации самой установки. Поскольку в цилиндроконическом стволе метаемый снаряд при прохождении конического участка переходит из большого калибра в меньший, такие стволы также называют бикалиберными.

Рассмотрим подробно принцип действия описываемой баллистической установки. В первом цилиндрическом участке (разгонная часть) вся сборка (метаемый элемент, пластиковый поршень и инерционный поддон) движется как единое целое до входа в конический участок, где она достигает некоторой скорости $v_{вх}$. Движение сборки до этого момента определяется решением классической прямой задачи внутренней баллистики в газодинамической постановке [3, 4]. При прохождении сборки через конический канал происходит перераспределение скоростей, в результате которого передняя часть пластикового поршня и метаваемый элемент получают приращение скорости, задняя же часть пластикового поршня замедляется. После выхода из конического канала сборка проходит второй цилиндрический участок, который имеет в основном направляющую функцию. Следует отметить положительную роль инерционного поддона при экспериментальном исследовании периода промежуточной баллистики: поскольку он движется медленнее метаемого элемента, он отсекает пороховые газы, которые при классическом метании проходят дульный срез сразу же за метаемым телом.

Для описания внутрибаллистических процессов в цилиндроконических стволах в данной работе применен квазиодномерный газодинамический подход,

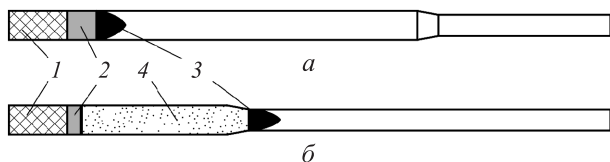


Рис. 1. Принципиальные схемы цилиндроконической (а) и легкогазовой (б) установок:

- 1 — метательный заряд; 2 — пластиковый поршень;
3 — метаемое тело (снаряд); 4 — легкий газ

использованный ранее при расчете внутренней баллистики различных систем высокоскоростного метания [5–7], в том числе и бикалиберных систем. В отличие от более ранних работ, в

которых для численного решения уравнений термогазодинамики использовалась схема Неймана «крест» и описание движения газопороховой смеси в массовых лагранжевых координатах, в настоящей работе применяется метод Годунова на подвижной эйлеровой сетке.

Математическая модель выстрела из бикалиберной установки. Для математического описания термогазодинамических процессов в бикалиберной баллистической установке используется система квазиодномерных газодинамических уравнений, состоящих из уравнений сохранения массы, импульса и энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u S) &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u S) + \frac{\partial}{\partial x}((p + \rho u^2)S) &= p \frac{\partial S}{\partial x}; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho e S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u(e + p/\rho)S) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где u , ρ , p , e — скорость, плотность, давление и удельная внутренняя энергия газопороховой смеси соответственно; S — площадь поперечного сечения канала; x , t — пространственная координата и время. К системе уравнений (1) добавляются уравнения, описывающие горение пороха:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho Sz) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Sz) &= \frac{\rho Sp}{I_k}; \\ \psi &= kz(1 + \lambda z + \mu z^2); \\ e &= \frac{p}{k-1} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1-\psi}{\delta} - \alpha\psi \right) + (1-\psi) \frac{f}{k-1}, \end{aligned} \quad (2)$$

где z , ψ — относительные толщина и объем сгоревшего пороха; k , λ , μ — коэффициенты, характеризующие форму порохового зерна; f , δ — сила и плотность пороха; k — показатель адиабаты пороховых газов; I_k — импульс конца горения пороха; α — собственный объем молекул газа (коволум). Первое уравнение в системе (2) описывает перенос частиц пороха газовым потоком, второе — представляет собой запись геометрического закона горения, третье — является уравнением состояния газопороховой смеси, которое при $\psi = 1$ (условие полного сгорания пороха) переходит в известное уравнение Абе-ля [1].

Учитывая значительный уровень давления, достигаемого в коническом канале при выстреле, будем считать, что пластический поршень ведет себя как идеальная сжимаемая жидкость, уравнение состояния которой имеет вид [8, 9]

$$p = B\rho \frac{\rho - \rho_0}{(C\rho_0 - \rho)^2}, \quad (3)$$

где ρ_0 — начальная плотность; B, C — эмпирические константы, характеризующие свойства конкретного материала. В качестве материала пластического поршня могут быть использованы, в частности, полиэтилен высокого давления, парафин, полиуретанопласт, а также различные жидкости.

Система уравнений (1) — (3) дополняется граничными условиями: на левой границе задается условие непротекания, на правой — условие движения снаряда

$$\frac{dv_{pr}}{dt} = \frac{p_{pr}S - R}{m_{pr}}, \quad (4)$$

где $R_p = \rho / \rho_0$ — степень сжатия материала; m_{pr}, v_{pr} — масса и скорость снаряда; p_{pr} — давление на дно снаряда; R — сила сопротивления движению снаряда.

В момент времени $t = 0$ предполагается, что весь пороховой заряд воспламенен (условие начала горения пороха), т. е. $p = 5$ МПа, $z = 0$, $\psi = 0$, $v_{pr} = 0$.

Численный метод решения задачи. Особенностью задачи является наличие движущейся правой границы области, поэтому для ее численного решения удобно использовать численные схемы на подвижных сетках [4, 10]. Запишем систему уравнений (1) — (2) в безразмерном векторном виде:

$$\frac{\partial(\bar{\mathbf{q}}\bar{S})}{\partial\tau} + \frac{\partial(\bar{\mathbf{f}}\bar{S})}{\partial\xi} = \bar{\mathbf{h}};$$

$$\bar{\mathbf{q}} = \{\bar{\rho}, \bar{\rho}\bar{u}, \bar{\rho}\bar{e}, \bar{\rho}\bar{z}\}; \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{f}} = \{\bar{\rho}\bar{u}, \bar{p} + \bar{\rho}\bar{u}^2, \bar{u}(\bar{\rho}\bar{e} + \bar{p}), \bar{\rho}\bar{u}\bar{z}\};$$

$$\bar{\mathbf{h}} = \{0, \bar{p} \partial\bar{S} / \partial\xi, 0, \bar{\rho}\bar{S}\bar{p} / \bar{I}_k\}.$$

В системе уравнений (5) приведены безразмерные величины: $\tau = t\sqrt{f} / d_{in}$ — время; $\xi = x / d_{in}$ — координата; $\bar{S} = 4S / \pi d_{in}^2$ — площадь поперечного сечения; $\bar{u} = u / \sqrt{f}$ — скорость потока; $\bar{\rho} = \rho / \Delta$ — плотность газопороховой смеси; $\bar{p} = p / (f\Delta)$ — давление; $\bar{e} = e / f$ — удельная внутренняя энергия; $\bar{I}_k = I_k / (d_{in}\sqrt{f}\Delta)$ — импульс пороха, где d_{in} — диаметр (калибр) первого цилиндрического участка.

Введем пространственную разностную сетку с узлами ξ_0^n, \dots, ξ_M^n . Нижние индексы $0, \dots, M$ — номера узлов пространственной сетки, верхний индекс n — номер шага по времени. Пусть точка с координатой ξ_0 принадлежит дну канала, а ξ_M — дну снаряда. Тогда при движении снаряда каждый узел разностной сетки движется со скоростью $v_i^n = (\xi_i^{n+1} - \xi_i^n) / \Delta\tau^n$, где $\Delta\tau^n$ — шаг по времени. Проинтегрировав уравнения (5) по разностной ячейке, можно получить для этого случая разностную схему Годунова на подвижной сетке (черточки над безразмерными величинами опущены):

$$(\mathbf{qS})_{i+1/2}^{n+1} = (\mathbf{qS})_{i+1/2}^n - \frac{\Delta\tau^n}{\Delta\xi_i^n} \left([(\mathbf{f} - \mathbf{qv})S]_{i+1}^n - [(\mathbf{f} - \mathbf{qv})S]_i^n \right) + \Delta\tau^n h. \quad (4)$$

Величины с полуцелым индексом соответствуют значениям внутри ячейки, с целым индексом — потоку через границы ячеек. Поскольку задача о распаде разрыва для газопороховой смеси не имеет простого аналитического решения, как в случае идеального газа, для определения потоков через границы ячеек используется метод AUSM (Advection Upstream Splitting Method) [11]. Рассмотренная численная схема является монотонной и имеет первый порядок точности по пространственной координате и времени.

Результаты расчетов характеристик цилиндроконических стволов. Рассмотрим модельную установку с тремя вариантами сменных конических насадок (см. таблицу). Диаметр первого цилиндрического участка (рис. 2) этой установки 23 мм, приведенная длина зарядной камеры 250 мм, длина пути снаряда в канале ствола до входа в конус 1050 мм. Масса метаемого тела 30 г. Деформируемый поршень из полиэтилена высокого давления имеет длину 150 мм. Параметры метательного заряда: импульс $I_k = 0,33$ МПа·с; плотность заряжения $\Delta = 800$ кг/м³; сила пороха $f = 1,018$ МДж/кг.

На рис. 3 приведены зависимости скорости метаемого снаряда от пройденного пути для трех различных конических насадок. Виден характерный подъем скорости, соответствующий прохождению де-

формируемого поршня через конический канал. Причем чем меньше выходной диаметр, тем выше дульная скорость.

Таблица 1

Параметры и характеристики конических насадок

№ п/п	d_{out} , мм	L_{cn} , мм	L_{out} , мм	$v_{пр}$, м/с	p_{max} , МПа
1	14	80	120	1 512	1 437
2	16	100	100	1 422	762
3	18	100	100	1 308	403

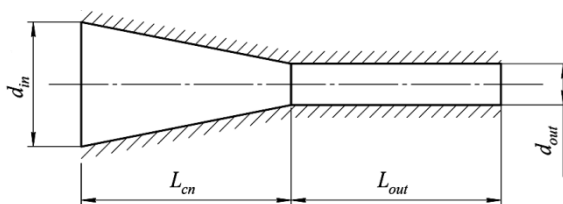


Рис. 2. Расчетная схема конической насадки: d_{out} — выходной диаметр; L_{cn} , L_{out} — длины конического и цилиндрического участков

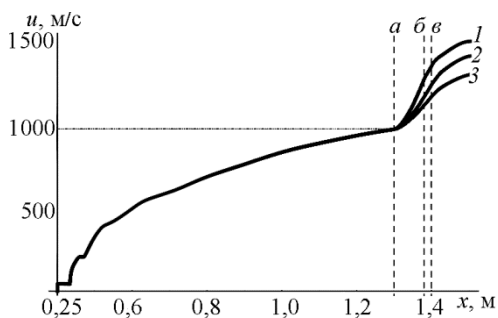


Рис. 3. Зависимость скорости u снаряда от координаты x для трех вариантов (1–3) конических насадок (соответственно номерам в таблице). Точка a отвечает началу конического участка, b — концу конического участка для насадки 1, v — концу конического участка для насадок 2 и 3

На рис. 4 изображены кривые давления на дно канала ствола и на дно снаряда (метаемого тела). Видно, что пик давления в коническом канале по мере уменьшения выходного диаметра значительно слабее.

Методика оптимизации геометрии конической насадки. Как следует из приведенных результатов, для различных конических насадок, имеется закономерность, которая заключается в том, что при уменьшении выходного диаметра или длины конического канала дульная скорость снаряда возрастает. Но в то же время возрастает и пиковое давление внутри конического канала, что является нежелательным. Поэтому возникает обратная задача нахождения оптимальных геометрических параметров конической насадки. Перед поста-

новкой обратной задачи следует учесть особенности, связанные с назначением устройства. При использовании цилиндрикоконической установки в качестве лабораторной следует обеспечить максимально возможную дульную скорость метаемого элемента. Кроме того, в отличие от образцов вооружения лабораторная установка не обязательно требует повышенной живучести. Таким образом, задача заключается в том, чтобы подобрать выходной диаметр и длину конического участка так чтобы при определенных ограничениях на максимальное давление в конусе достигалась максимально возможная дульная скорость.

На рис. 5 приведены диаграммы максимального давления в коническом канале и дульной скорости в зависимости от двух параметров: длины L_{cn} конического участка и выходного диаметра d_{out} конической насадки. Эти диаграммы получены многократным решением прямой задачи. Задавая на диаграмме давлений (рис. 5, а) максимально допустимый уровень давления и определяя таким образом параметрическую кривую $p(L_{cn}, d_{out}) = const$, можно определить значения геометрических параметров из диаграммы дульных скоростей (рис. 5, б).

На рис. 6 приведены диаграммы для определения геометрических параметров конической насадки при максимальном давлении в кони-

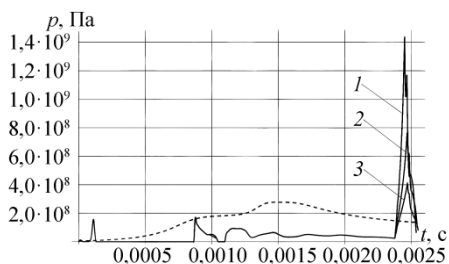


Рис. 4. Кривые давления на дно канала (пунктирная кривая одна и та же для всех насадок) и на дно снаряда (сплошная) для трех различных конических насадок (1–3)

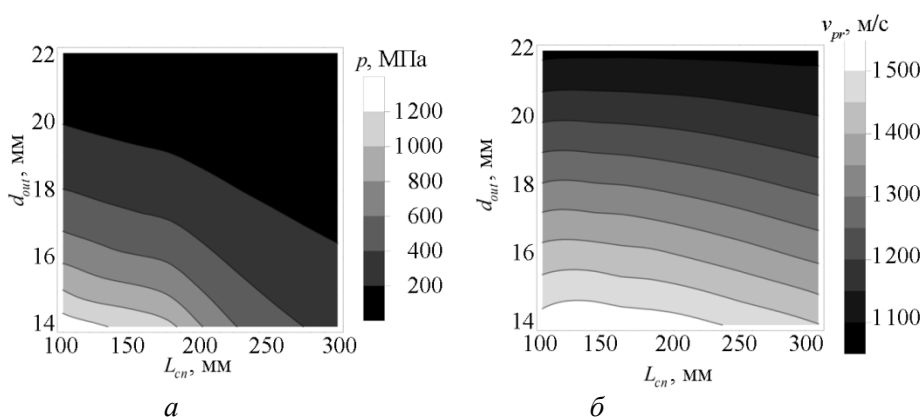


Рис. 5. Диаграммы максимального давления в коническом канале (а) и дульной скорости (б) в зависимости от длины конического участка и выходного диаметра конической насадки

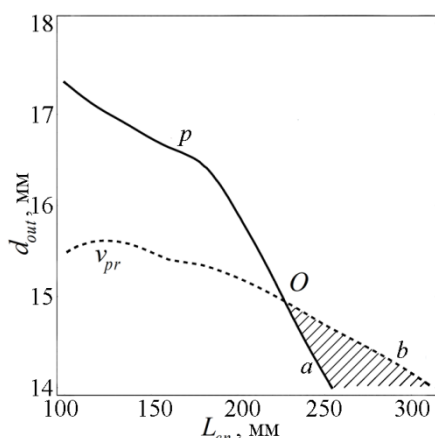


Рис. 6. Диаграмма для определения оптимальных геометрических характеристик конической насадки при $p = 500$ МПа и $v_{pr} = 1\,450$ м/с

руемыми элементами снарядов обеспечивает повышение дульной скорости метаемого элемента более чем в 1,5 раза по сравнению со схемами классического порохового метания. Рассматриваемая конструкция установки позволяет получать дульные скорости в диапазоне 1 500...3 000 м/с [5 – 7]. При этом наиболее существенным недостатком цилиндроконических стволов является высокий пиковый уровень давления внутри конического канала, который должен приводить к его высокому износу. Этот недостаток, однако, можно устранить путем использования сменных конических насадок различной длины и с разными выходными диаметрами, получая при этом целый спектр выходных скоростей для заданного состава метаемой сборки и условий заряжания.

Использование цилиндроконических стволов в качестве сравнительно недорогого лабораторного средства для аэробаллистических исследований дает возможность имитировать процессы высокоскоростного соударения тел. В частности, это позволит обрабатывать средства защиты от космического мусора, который часто представляет собой компактные частицы, летящие с высокой скоростью. Следует также отметить потенциальную возможность использования конической насадки вместе с деформируемыми поршнями для увеличения дульной скорости легкогазовых установок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-08-31408 мол_а).

ческом канале 500 МПа и требуемой дульной скорости не менее 1450 м/с. Принятым условиям удовлетворяет заштрихованная область. При этом на участке *Ob* сохраняется заданная скорость при минимальном давлении, а на участке *Oa* скорость принимает максимально возможное значение при предельно допустимом уровне давления в коническом канале.

Заключение. Проведенный анализ показывает, что использование цилиндроконических стволов в совокупности с деформи-

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Серебряков М.Е. *Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет*. Москва, Оборонгиз, 1962, 703 с.
- [2] Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н. *Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях*. Москва, Наука, 1974, 344 с.
- [3] Станюкович К.П., ред. *Газодинамические основы внутренней баллистики*. Москва, Оборонгиз, 1957, 384 с.
- [4] Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. *Математическое моделирование внутриваллистических процессов в ствольных системах*. Новосибирск, Издательство СО РАН, 1999, 256 с.
- [5] Быков Н.В., Владимиров В.С., Зеленцов В.В. Инженерная методика расчета внутренней баллистики систем высокоскоростного метания. *Оборонная техника*, 2011, № 8, с. 3—9.
- [6] Быков Н.В., Владимиров В.С., Зеленцов В.В. Численное моделирование внутренней баллистики цилиндрикоконических стволов с использованием пластических снарядов. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, № 3.
- [7] Быков Н.В., Зеленцов В.В., Карнейчик А.С. Влияние длины конического участка на баллистические характеристики цилиндрикоконических стволов с пластическими снарядами. *Оборонная техника*, 2012, № 8/9, с. 21—26.
- [8] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. Т. 2. Москва, Физматлит, 2002, 656 с.
- [9] Mills E.J. Hugoniot equations of state for plastics: a comparison. *AIAA*, 1965, no. 3, pp. 742—743.
- [10] Bogdanoff D.W., Miller R. J. *New higher-order Godunov code for modelling performance of two-stage light gas guns*. S. l., 1995. (Rep. / NASA; N TM-110363).
- [11] Liou M.S., Steffen C.J., Jr. A new flux splitting scheme. *Journal of Computational Physics*, 1993, no. 107, pp. 23—39.

Статья поступила в редакцию 26.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Быков Н.В., Зеленцов В.В., Карнейчик А.С. Баллистическая бикалиберная установка с деформируемым поршнем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/945.html>

Быков Никита Валерьевич родился в 1985 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Младший научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН, ассистент кафедры «Ракетные и импульсные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных работ в области газовой динамики и внутренней баллистики ствольных систем. e-mail: bykovnv@br.ru

Зеленцов Валентин Викторович родился в 1937 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Ракетные и импульсные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат премии Президента РФ в области образования и премии Правительства РФ в области науки и техники. Автор более 190 научных работ в области вооружения, военной техники, термодинамики и проектирования ракетных комплексов.

Карнейчик Александр Сергеевич родился в 1948 г., окончил Куйбышевский политехнический институт в 1972 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные и импульсные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ в области вооружения, специальных баллистических измерительных приборов и проектирования ствольных систем. e-mail: karas-dmitrov@mail.ru