

## АНАЛИЗ И БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ МАЛОГО КАЛИБРА С ПРИСОЕДИНЕННЫМИ КАМЕРАМИ ПОДГОНА

©2011 А. И. Сафронов<sup>1</sup>, В. А. Зоркин<sup>1</sup>, В. В. Потапенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тольяттинский государственный университет

<sup>2</sup>Военный инженерный технический институт, г. С.-Петербург

В статье рассматриваются вопросы проектирования систем с двумя камерами подгона. Такие системы дают больший выигрыш в начальных скоростях по сравнению с системами с одной камерой - около 9%, а по сравнению с классической схемой - более 25%.

*Баллистическое проектирование, ствольная система, присоединенная камера.*

Для высокоскоростного метания представляет интерес применение систем с одной или двумя камерами подгона при реализации предложенного в [1] перспективного уровня давлений, в 2-3 раза превышающих традиционные максимумы в ствольных системах. В [2] рассмотрена схема метания с присоединёнными камерами подгона (рис. 1).

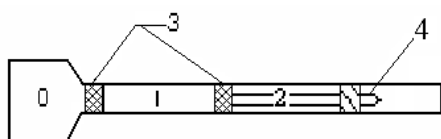


Рис. 1. Схема метания СПК: 0 – камера основного заряда; 1 – первая камера подгона; 2 – вторая камера подгона; 3 – поршни; 4 – метаемый элемент

За счет управления параметрами давления в канале системы СПК возможно регулирование ускорения метаемого элемента до момента выхода из канала ствола.

Часть заряда, находящаяся в первой камере подгона, воспламеняется через заданное время задержки воспламенения после начала движения сборки. Часть заряда, находящаяся во второй камере подгона, воспламеняется через заданный промежуток времени после воспламенения заряда в первой камере подгона. После этого метаемый элемент продолжает движение по каналу ствола отдельно от сборки, приобретая на дульном срезе высокую скорость. Прямая задача внутренней баллистики для рассмотренной схемы решается совместным Эйлера - Лагранжевым методом (СЭЛ) [3] при обычных допущениях модели газопороховой смеси.

Система уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями записывается в комбинированной системе координат в относительных переменных:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u^2 S}{\partial x} + S \frac{\partial p}{\partial x} = -N_1 \rho S \frac{\partial v}{\partial \tau} - N_2 \rho S \frac{\partial v_1}{\partial \tau},$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon S}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho \varepsilon u S}{\partial x} = -N_1 p v \frac{\partial S}{\partial x} - N_2 p v_1 \frac{\partial S}{\partial x} + S P \rho \left( \frac{\partial \psi}{\partial \tau} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} \right),$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} = \sqrt{\chi^2 + 4\chi\lambda\psi} \frac{p}{I_k},$$

$$\psi = \chi z(1 + \lambda z),$$

$$\varepsilon = \frac{p}{k-1} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1-\psi}{\delta} - \alpha \psi \right),$$

где  $\theta = k-1$ ,  $A = \frac{\Delta L_{км} c_0}{I_k}$ .

Здесь обозначены:  $\tau$  – время;  $x$  – координата;  $u$  – скорость смеси;  $v$  – скорость неинерциальной системы координат связанной с первым поршнем;  $v_1$  – скорость неинерциальной системы координат связанной со вторым поршнем;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $S$  – площадь канала системы;  $\varepsilon$  – внутренняя энергия;  $\psi$  – весовая доля сгоревшего пороха;  $z$  – относительная часть сгоревшего свода пороха;  $I_k$  – конечный импульс давления;  $\alpha$  – коволюм;  $\chi, \lambda$  – характеристики формы зерна заряда;  $k$  – показатель адиабаты;  $P = f/(k-1)$  – потенциал пороха;  $f$  – сила пороха;  $\delta$  – плотность пороха;  $L_{км}$  – масштаб длины;  $\Delta$  – масштаб плотности;  $c_0$  – масштаб скорости.

Эта система уравнений используется для расчета в трёх областях. Как частный

случай, из нее можно легко получить уравнения в инерциальной системе координат – при  $N_1=N_2=0$  (в области 0). В неинерциальной системе координат, связанной с первым поршнем – при значениях коэффициентов  $N_1=1, N_2=0$  (для расчёта параметров в области I). В неинерциальной системе координат, связанной со вторым поршнем – при значениях коэффициентов  $N_1=1, N_2=1$  (для расчёта параметров в области II).

Расчёты проводятся при соответствующих начальных и граничных условиях. Начальные условия обычные [2]. Граничные условия:

1. При  $x=0, \tau \geq 0; u=0$ .

2. При  $x=x_1, \tau \geq 0$

$$\frac{du_1}{d\tau} = \begin{cases} \frac{S}{Q} \left( p_1 - \frac{f_{CB}}{S_{KH}} \right), & \text{если } \frac{p_1 - p_2}{Q_{\Gamma}} \geq \frac{p_3}{q}, \\ \frac{S(p_1 - p_2)}{Q_{\Gamma}}, & \text{если } \frac{p_1 - p_2}{Q_{\Gamma}} < \frac{p_3}{q}. \end{cases}$$

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{du_1}{d\tau}.$$

3. При  $x=x_2, \tau \geq 0; u_2=0$ .

4. При  $x=x_3, \tau \geq t_3$

$$\frac{du_3}{d\tau} = \begin{cases} 0, & \text{если } \frac{p_1 - p_2}{Q_{\Gamma}} \geq \frac{p_3}{q}, \\ \frac{B}{Q_1} \left( p_3 - \frac{f_{CB}}{S_{KH}} \right) - \frac{dv}{d\tau}, & \text{если } \frac{p_3 - p_4}{Q_{\Gamma 1}} \geq \frac{p_5}{q}, \\ \frac{B}{Q_{\Gamma 1}} (p_3 - p_4) - \frac{dv}{d\tau}, & \text{если } \frac{p_3 - p_4}{Q_{\Gamma 1}} < \frac{p_5}{q}. \end{cases}$$

$$\frac{dv_1}{d\tau} = \frac{du_3}{d\tau}.$$

5. При  $x=x_4, \tau \geq 0; u_4=0$ .

6. При  $x=x_5, \tau \geq t_{31}$ ,

$$\frac{du_5}{d\tau} = \begin{cases} 0, & \text{если } \frac{p_3 - p_4}{Q_{\Gamma 1}} \geq \frac{p_5}{q}, \\ \frac{B}{q} \left( p_5 - \frac{f_{CB}}{S_{KH}} \right) - \frac{dv}{d\tau} - \frac{dv_1}{d\tau}, & \text{если } \frac{p_3 - p_4}{Q_{\Gamma 1}} < \frac{p_5}{q}. \end{cases}$$

$$V = S_{KH} \Delta L_{KM},$$

$$f_{CB} = \left( p_{BH} + \frac{k+1}{2} \rho_{BH} u^2 \right) S_{KH} - \text{сопротивление}$$

воздушного столба по формуле прямого скачка,

где  $p_{BH}$  – начальное давление в стволе;  $\rho_{BH}$  – начальная плотность газа в стволе;  $S_{KH}$  – площадь канала ствола; символы римскими цифрами означают принадлежность параметров к областям, символы арабскими цифрами означают принадлежность параметров

границам областей: 1, 2, 3, 4, 5 – правой границе 0 области, левой и правой границам I области, левой и правой границам II области соответственно;  $Q, Q_{\Gamma}, Q_{\Gamma 1}, Q_1$ , – масса всей сборки, масса первого поршня, масса второго поршня, масса сборки второй области соответственно;  $q$  – масса метаемого элемента;  $t_3$  – время задержки воспламенения присоединенного заряда I области,  $t_{31}$  – время задержки воспламенения присоединенного заряда II области.

При реализации высокоскоростного метания элементов массой 35 г с использованием СПК на модельной системе калибра 34 мм при общей длине канала ствола, равной 4,7 м, расчетная скорость составила 5123 м/с [4]. Необходимо отметить, что эту расчетную скорость удается получить при использовании обычных штатных порохов. Расчетные максимальные давления при этом не превышали 1000 МПа. Представляет интерес метание элементов с большим относительным весом, например  $C_q = 3 \text{ кг/дм}^3$ . Для исследования баллистических возможностей нетрадиционной схемы метания СПК была выбрана система калибра 42 мм.

В [5] было отмечено, что поршни, используемые в СПК, могут быть сгораемыми. Важно обеспечить воспламенение поршней к моменту резкого повышения давления за счет горения зарядов в областях присоединенных камер.

Проведенные ранее исследования показали эффективность управления скоростью поршня для повышения начальной скорости метания СПК. При этом улучшается перераспределение энергии на ускорение метаемого элемента. В данном случае рассматривается воспламенение первого поршня синхронно с ростом давления в первой присоединенной камере подгона.

Результаты расчётов для метаемого элемента с коэффициентом относительного веса  $C_q=3,0 \text{ кг/дм}^3$  представлены на рис. 2: зависимости процесса изменения давления от координаты левой границы первого поршня в казенной части (1), за первым поршнем (2); зависимости процесса изменения давления от координаты левой границы второго поршня на правой границе первого поршня (3), за вторым поршнем (4); зависимость процесса изменения давления от координаты метаемого элемента на правой границе вто-

рого поршня (5); зависимость процесса изменения скорости первого поршня от координаты его левой границы (6); зависимость процесса изменения скорости второго поршня от координаты его левой границы (7); зависимость процесса изменения скорости метаемого элемента от его координаты (8).

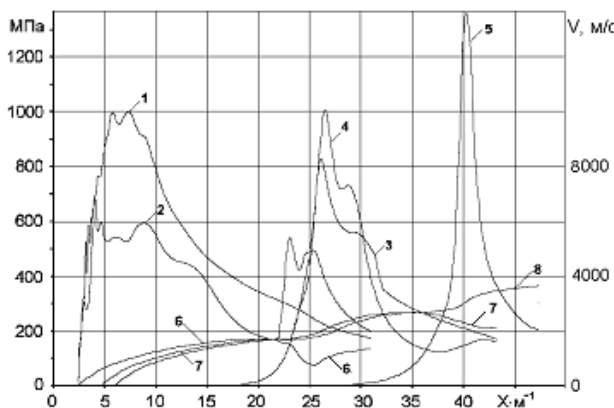


Рис. 2. Зависимости давлений и скоростей от координат движущихся поршней и метаемого элемента

Рассчитывался выстрел из модельной пороховой пушки калибра 42 мм. Показаны зависимости давлений и скоростей на границах рассматриваемых областей от координат движущихся в процессе выстрела поршней и метаемого элемента.

Результаты расчётов для метаемого элемента с коэффициентом относительного веса  $C_q=3,0$  кг/дм<sup>3</sup> показали возможность достижения расчетной скорости метания  $V=3642$  м/с при применении СПК.

Время задержки воспламенения для первой камеры подгона  $t_3=2,576$  мс. После воспламенения давление в камере подгона предполагается равным 5 МПа, а затем, при горении заряда в первой камере, давление перед поршнем возрастает до 830 МПа (кривая 3). Торможению поршня препятствует давление за поршнем, возрастающее примерно до 540 МПа (кривая 2). Это давление реализуется за счет горения первого поршня, а также повышения давления при торможении поршня. При этом не так резко падает скорость поршня (кривая 6), чем в случае без сгорающего поршня. Расчётное давление на сборку второй камеры достигает 1000 МПа (кривая 4). Через некоторое время после воспламенения заряда (кривая 5) во второй камере подгона ( $t_{31}=3,116$  мс) проис-

ходит разделение сборки второй камеры подгона (второй поршень + заряд + метаемый элемент), и метаемый элемент дополнительно ускоряется (кривая 8), приобретая на дульном срезе высокую скорость.

В результате подгона за счет срабатывания первой присоединённой камеры скорость сборки второй камеры подгона увеличивается на 592 м/с. После разделения сборки второй камеры подгона скорость метаемого элемента увеличивается дополнительно на 969 м/с.

Необходимо отметить, что расчетной скорости 3642 м/с метаемый элемент с  $C_q=3,0$  кг/дм<sup>3</sup> достигает, как и для системы калибра 34 мм, при использовании обычных штатных порохов. Эффект может быть увеличен при применении новых высокоэнергетических составов. С момента разделения первой камеры подгона скорость метаемого элемента возрастает более чем в 2,1 раза - с 1689 м/с до 3642 м/с.

При классическом выстреле из той же модельной пороховой пушки с заданными ограничениями на давление в камере не более 1000 МПа расчетная скорость метаемого элемента составила 2897 м/с.

Таким образом, расчетное повышение скорости метания при применении СПК на рассматриваемой системе достигает 25,7 процентов.

При использовании сгорающего первого поршня падение скорости поршня менее резкое (кривая 6), чем в случае несгораемого поршня, до подхода волны разрежения. При этом происходит интенсивное перераспределение энергии на ускорение сборки второй камеры подгона.

При воспламенении заряда второй камеры подгона скорость сборки составляет 2281 м/с, поэтому торможение второго поршня менее значительное, чем первого. Подъем давления за счет торможения потока также меньше, чем на первом поршне. Энергия заряда второй камеры подгона в основном идет на ускорение метаемого элемента.

Рассмотрим баллистические возможности системы с двумя камерами подгона, приведенные в табл. 1 (приведены результаты баллистических расчетов при метании элементов с  $C_q=0,9, 1, 2, 3$  кг/дм<sup>3</sup>).

Здесь обозначены:  $q$  – масса метаемого элемента;  $V$  – начальная скорость метаемого

элемента;  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  – максимальные давления на дно канала (в 1-й камере подгона) на метаемый элемент соответственно;  $t_3$  – время задержки воспламенения заряда первой камеры подгона;  $t_{31}$  – время задержки воспламенения заряда второй камеры подгона;  $F$  – сила порохов зарядов в камерах СПК;  $\Delta V/V$  – выигрыш в начальной скорости метаемого элемента.

Таблица 1. Баллистические возможности системы с двумя камерами подгона

q, г	V, м/с	P <sub>0</sub> , МПа	P <sub>1</sub> , МПа	P <sub>2</sub> , МПа	t <sub>3</sub> , мс	t <sub>31</sub> , мс	F, МДж/кг	ΔV/V, %
50	5432	1022	1010	1026	2,358	2,840	0,9996	7,1
74,1	4891	1007	1018	998	2,425	2,924	0,9996	6,0
148,2	4117	1007	1008	1012	2,530	3,058	0,9996	8,4
222,3	3642	1000	1004	1350	2,576	3,116	0,9996	8,8

В правом столбце приведен выигрыш в начальной скорости метаемого элемента в сравнении с расчетными скоростями при использовании только одной камеры подгона. При сравнении с расчетными скоростями при классической схеме метания выигрыш в начальной скорости метаемого элемента в случае одинаковых максимальных давлений на дно канала модельной пороховой пушки составляет примерно 30%.

Важным моментом при обсуждении применения систем СПК является то, что выигрыш в скорости с повышением давления для рассматриваемой схемы остается значительным.

При давлениях в перспективных системах, в 2-3 раза превышающих традиционные максимумы давлений, применяемых в штатных артиллерийских орудиях, схема с соединёнными камерами подгона также будет обеспечивать значительный выигрыш в

скорости метания по сравнению с расчетными начальными скоростями, получаемыми при классической схеме выстрела.

### Библиографический список

1. Липанов, А.М. Термомеханические технологии – резерв повышения эффективности ствольных систем [Текст] / А.М. Липанов, В.Б. Дементьев, Н.А. Спичкин // Современная баллистика и смежные вопросы механики: сб. материалов науч. конф. – Томск: Томский государственный университет, 2009. – С. 26-30.

2. Комаровский, Л.В. Использование нетрадиционной схемы метания в баллистических системах [Текст] / Л.В. Комаровский, А.И. Сафронов // Междунар. конф. по математике и механике: избр. докл. / под общ. ред. Н.Р. Щербакова – Томск, 2003. – С. 182–187.

3. Нох, В.Ф. СЭЛ – совместный эйлерово-лагранжевый метод для расчета нестационарных двумерных задач [Текст] / В.Ф. Нох // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: 1967. – С. 128–189.

4. Комаровский, Л.В. Теоретический анализ внутренней баллистики установки с камерами подгона для высокоскоростного метания тел [Текст] / Л.В. Комаровский, А.И. Сафронов // Пятая Всерос. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» – Томск: Изд-во Томского ун-та. 2006. – С.118.

5. Комаровский, Л.В. Анализ внутренней баллистики систем с подгоном модели в пусковой трубе [Текст] / Л.В. Комаровский, А.И. Сафронов // Четвёртая Всерос. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004. – С.107.

## ANALYSIS AND BALLISTICS DESIGN OF A LABORATORY INSTALLATION SYSTEM A SMALL CALIBRE WITH A JOINED DRIVE ON CHAMBERS

©2011 A. I. Safronov<sup>1</sup>, V. A. Zorkin<sup>1</sup>, V. V. Potapenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Togliatty State University  
S.-Peterburg military engineering Institute

This article discusses issues of designing systems with two a joined drive on chambers. These systems give a greater gain in the initial speeds than systems with single-camera about 9%, as compared with the classical scheme more 25%.

### **Информация об авторах**

**Сафронов Александр Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор Тольяттинского государственного университета. Тел.: (8482) 53-93-43. E – mail: [safr.a@mail.ru](mailto:safr.a@mail.ru). Область научных интересов: баллистика, механика гетерогенных систем, цифровое моделирование процессов и систем.

**Зоркин Владимир Анатольевич**, старший преподаватель Тольяттинского государственного университета. Тел.: (8482) 53-91-81. E – mail: [vikraft@yandex.ru](mailto:vikraft@yandex.ru). Область научных интересов: механика гетерогенных систем, цифровое моделирование процессов и систем.

**Потапенко Вячеслав Викторович**, заместитель руководителя отделения Военного инженерно технического института, г. Санкт-Петербург. Тел.: (812) 579-33-41, +7-960-843-13-11. E-mail: [ww@mail.ru](mailto:ww@mail.ru). Область научных интересов: механика гетерогенных систем, цифровое моделирование процессов и импульсных систем.

**Safronov Alexander Ivanovich**, Doctor of Mathematic and Physics Sciences, professor of Togliatty State University. Phone: (8482) 53-93-43. E – mail: [safr.a@mail.ru](mailto:safr.a@mail.ru). Area of research: Inner ballistic, Mechanics heterogeneous Systems, Numerical modeling Processes in Impulses Systems.

**Zorkin Vladimir Anatolevich**, oldest teacher of Togliatty State University. Phone: (8482) 53-91-81. E-mail: [vikraft@yandex.ru](mailto:vikraft@yandex.ru). Area of research: Mechanics heterogeneous Systems, Numerical modeling, Processes in Impulses Systems.

**Potapenko Vyacheslav Viktorovich**, Carry out duty head of deparatment of S.-Peterburg military engineering technical institute. Phone: (812) 579-33-41, +7-960-843-13-11. E-mail: [ww@mail.ru](mailto:ww@mail.ru). Area of research: Mechanics heterogeneous Systems, Numerical modeling, Processes in Impulses Systems.