УДК 629.7.018.3:623.5

АНАЛИЗ И БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С ПРИСОЕДИНЕННОЙ КАМЕРОЙ ПОДГОНА

©2009 А. И. Сафронов[1], В. В. Потапенко[2]

[1]Тольяттинский госуниверситет
[2] Тольяттинский военный технический институт

На основе модели двухфазной двухскоростной среды проводится численное моделирование нетрадиционной схемы с присоединённой камерой подгона. Возможно повышение начальных скоростей метаемых элементов с C_q=4,55 кГ/дм^3 примерно на 7% при неизменных максимальных давлениях на дно закрытого торца цилиндрического канала по сравнению с классической схемой метания.

Баллистическое проектирование, баллистическая система, присоединённая камера подгона

Схема с присоединённой камерой подгона (рис.1) позволяет повышать начальные скорости метания элементов, что необходимо для практики.

В данной работе рассматривается возможность получения выигрыша в начальной скорости метаемого элемента для модельной установки с использованием присоединённой камеры подгона при неизменном максимальном давлении на дно закрытого торца цилиндрического канала по сравнению с классической схемой метания.

В этом случае решается задача движения метаемого элемента по цилиндрическому каналу под действием газов, образующихся при постепенном горении топлива в двух областях. Топливо во второй области воспламеняется через некоторое время (время задержки зажигания) после воспламенения основного заряда.

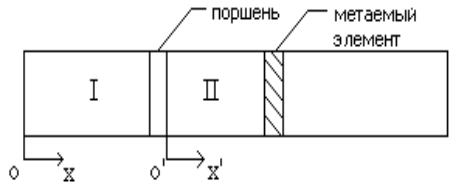

Рис.1. Схема метания с присоединённой камерой подгона:
I – область основного заряда; II – область присоединенной камеры подгона

Разделение общей массы заряда на две части является частным случаем. Возможно рассмотрение трех и более областей. Между двумя частями топлива помещается поршень. Поршень совершает движение по цилиндрическому каналу под действием давления газов, образующихся в результате сгорания топлива. В начальный момент времени в движение приходит вся сборка, состоящая из присоединённой камеры подгона (поршнь + топливо во второй области) и метаемого элемента. Через некоторый промежуток времени $t_з$ (время задержки зажигания) воспламеняется заряд в присоединённой камере подгона (будем называть его присоединённым), в результате давление во второй области повышается; и в момент, когда сила сопротивления становится больше силы, ускоряющей сборку, последняя разделяется: метаемый элемент отделяется и далее движется вперед самостоятельно, а поршень притормаживается. При достижении метаемым элементом конца ствола расчет заканчивается. Основным положительным свойством этого процесса является то, что за счет работы присоединённого заряда происходит перераспределение энергии: часть энергии идет на дополнительное ускорение, вследствие которого достигается выигрыш в скорости по сравнению с системами использующими классическую схему метания.

Математическое моделирование схемы с присоединённой камерой подгона основано на подходе механики гетерогенных сред [1,2], модифицированного для внутренней баллистики ствольных систем в [3], и проводится при следующих основных допущениях:

- движение камеры подгона (поршень + присоединённый заряд) и метаемого элемента начинается при достижении давления форсирования;
- начальный период для основного и присоединённого зарядов не учитывается;

- горение частиц пороха происходит по геометрическому закону;
- вязкость и теплопроводность существенны только в процессах взаимодействия фаз;
- до момента разделения сборки частицы присоединённого заряда неподвижны относительно сборки;
- после разделения сборки частицы присоединённого заряда могут выпадать на поршень; при равенстве пористости некоторой предельной величине вблизи поршня частицы начинают двигаться со скоростью поршня до тех пор, пока пористость не станет выше предельной;
- при движении элементов схемы метания (сборки, затем поршня и метаемого элемента) не учитываются трение и сопротивление воздуха в стволе;
- присоединённый заряд воспламеняется мгновенно в момент времени, соответствующий времени задержки зажигания;
- после воспламенения присоединённого заряда перетоки между областями I и II отсутствуют.

Система уравнений, описывающая процессы в области I, записывается в инерциальной системе координат (0, *x*), в области II – в неинерциальной системе координат (0′, *x*′), связанной с поршнем (рис. 1). Далее приводится система уравнений, которая при N=0 описывает процессы в области I, а при N=1 и замене переменных и параметров на переменные и параметры со штрихом «′» (u≡u′ и т.д.) описывает процессы в области присоединенного заряда (области II) после воспламенения всего присоединенного заряда.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho s\varphi)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho us\varphi)=M; \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho s\varphi u)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho s\varphi u^2+ps\varphi)=M\omega-\tau_{\text{TP}}+p\frac{\partial s\varphi}{\partial x}-N\rho S\varphi\frac{du_{\Pi}}{dt}; \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho S\varphi E)+\frac{\partial}{\partial x}(S\varphi u(\rho E+p))=-p\frac{\partial(1-\varphi)S\omega}{\partial x}-\tau_{TP}\omega+M\left(Q+\frac{\omega^2}{2}\right)-N\rho S\varphi u\frac{du_{\Pi}}{dt}; \qquad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_2(1-\varphi)S)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho_2(1-\varphi)S\omega)=-M; \qquad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_2(1-\varphi)S\omega)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho_2(1-\varphi)S\omega^2)+(1-\varphi)S\frac{\partial p}{\partial x}=\tau_{TP}-M\omega-N\rho_2(1-\varphi)S\frac{du_{\Pi}}{dt}; \qquad (5)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t}+\omega\frac{\partial z}{\partial x}=\frac{a_1 p}{e_b} \qquad (6)$$

$$\text{P}\left(\frac{1}{\rho}-\alpha\right)=\text{RT} \qquad (7)$$

$$E=\varepsilon+\frac{u^2}{2};$$

$$\varphi=1-\text{n}\Lambda_0(1-\varphi(\text{z}))$$

$$\psi(\text{z})=\kappa_1\text{z}(1+\lambda_1\text{z})$$

$$\text{M}=\text{SnS}_{02}\rho_2\sigma(\text{z})\text{a}_1\text{p} \qquad (8)$$

$$\sigma(\text{z})=1+2\lambda_1\text{z}$$

$$\tau_{TP}=\frac{1}{2}C_x\rho(u-\omega)|u-\omega|S_n\frac{\pi d^2_{op}}{4}*(1-\psi(z))^{2/3};$$

$$Cx=\begin{cases}\dfrac{24}{\text{Re}}+0.48; & 0<\text{Re}<3\cdot10^5;\\ 0.1, & \text{Re}\geq3\cdot10^5;\end{cases}$$

$$\text{Re}=\frac{\rho|u-\omega|\varphi\sqrt{S_{02}}}{\mu}.$$

Здесь t – время; x – координата; P – давление; ρ – плотность; ρ_2 – плотность вещества топлива; T – температура; T_0 – температура продуктов горения топлива;

u – скорость газа; ω – скорость частиц; φ – пористость; E,ε - полная и внутренняя энергия единицы объёма газа; S – площадь поперечного сечения канала; Z – относительная толщина сгоревшего свода; M – скорость массоприхода от горения топлива; τ_{TP} – сила взаимодействия между фазами; N – признак системы координат; du_{Π}/dt - ускорение поршня; Q – тепловой эффект горения топлива; R – универсальная газовая постоянная; α - коволюм; a_1 – коэффициент в законе

скорости горения; e_B – толщина горящего свода зерна топлива; n – концентрация; Λ_0 – начальный объём частицы топлива; $\Psi(z)$ – относительный сгоревший объём частицы топлива; κ_1, λ_1 – коэффициенты формы частиц топлива; S_{02} – начальная площадь частиц топлива; $\sigma(z)$ – относительная горящая поверхность частицы топлива; C_x – коэффициент сопротивления; d_{0P} – диаметр шара эквивалентного по объёму частице топлива; π – число Пи; Re – число Рейнольдса; μ – вязкость газа.

Начальные условия в области I:

$T(x,0)=T_G$; $P(x,0)=P_\Phi$; $u(x,0)=\omega(x,0)=0$; $\varphi(x,0)=\varphi_H$;

$$\psi_H = \frac{1/\Delta - 1/\rho_2}{\frac{f}{P_\Phi} + \alpha - \frac{1}{\rho_2}}; \qquad z_H = \frac{2\psi_H}{\kappa_1(1+\sigma_H)}; \qquad \sigma_H = \sqrt{1+4\frac{\lambda_1}{\kappa_1}\Psi_H}. \tag{9}$$

Здесь Δ – плотность заряжания; f – сила топлива; P_Φ – давление форсирования.

Индексы:

н – означает начальные значения переменных и параметров; G –относится к газу.

Граничные условия:

$$u(0,t) = \omega(0,t) = 0;\ u(x_\Pi,t) = u_\Pi; \qquad u'(0,t) = \omega'(0,t) = 0;\ u'(x'_S,t) = u'_S. \tag{10}$$

Здесь x_Π – координата положения левой границы поршня; x_S – координата положения дна метаемого элемента; u_Π – скорость поршня; u_S – скорость метаемого элемента.

Индексы:

$_\Pi$– означают, что параметры относятся к поршню; $_S$ – к метаемому элементу.

Значения переменных x_Π, x'_S, u_Π, u'_S определяются интегрированием уравнения движения сборки, а после её разделения – уравнений движения поршня и метаемого элемента.

$$\left.\begin{aligned} m_{СБ}\frac{du_\Pi}{dt} &= P_1 S \\ q_S\frac{du'_S}{dt} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad t \le t_R \ ; \tag{11}$$

$$\left.\begin{aligned} m_\Pi\frac{du_\Pi}{dt} &= (P_1 - P_2)S \\ q_S\frac{du'_S}{dt} &= P_3 S - q_S\frac{du_\Pi}{dt} \end{aligned}\right\} \quad t > t_R . \tag{12}$$

Здесь P_1 – давление на поршень слева; P_2 – давление на поршень справа; P_3 – давление на дно метаемого элемента; $m_{СБ}$ – масса сборки; m_Π – масса поршня и осевших на него частиц; q_S – масса метаемого элемента; t_R – момент разделения сборки.

Момент разделения сборки t_R определяется из условия разделения:

$$p_3 > \frac{q_S}{q_\Pi}(P_1 - P_2). \tag{13}$$

Физический смысл (13) состоит в следующем: разделение сборки происходит в тот момент времени, когда ускорение поршня под действием сил давления на него становится меньше ускорения метаемого элемента, возникающего под действием силы давления на метаемый элемент.

Начальные условия во второй области для системы уравнений (1) – (7) с замыкающими соотношениями (8) определяются в момент достижения времени задержки зажигания присоединённого заряда $t_З$ для параметров этого заряда и давления форсирования $P_{Ф2}$.

Система уравнений (1) – (12) решается численно методом С.К. Годунова [4], где потоки массы, импульса и энергии в уравнениях (1) – (3) определяются из решения задачи распада произвольного разрыва параметров газа на скачке площади сечения [5]. В уравнениях (4) – (5) потоки массы и импульса находятся из решения задачи распада произвольного разрыва для среды, не имеющей «собственного» давления. Уравнение (6) решается методом, аппроксимирующим конвективный член разностями против потока. Уравнения (11) – (12) решаются методом Эйлера, где давления P_1, P_2, P_3 определяются из решения задачи распада произвольного разрыва параметров газа на неподвижной непроницаемой поверхности [4].

Расчётные области I и II покрываются разностной сеткой с шагами h и h′ соответственно.

Для проведения расчётов была выбрана система с диаметром канала 0,1 м с относительной длиной канала 7,0; C_q=4,55 кГ/дм^3 для метаемого элемента,

где $C_q = \frac{q_s}{d^3}$, d – диаметр канала баллистической системы; C_q=1,28 кГ/дм^3 для поршня. Параметры составов основного и присоединённого зарядов были выбраны по данным [3].

В таблице приведены максимальные безразмерные давления на дно закрытого торца цилиндрического канала $P^I max$; в области II – $P^{II} max$; на дно метаемого элемента – $P^Э max$; конечные импульсы топлив в области I – I_K и в области II – I'_K; время задержки зажигания – $t_З$ для нескольких расчётных вариантов схемы с присоединённой камерой подгона, при различных значениях масс основного заряда ω_1 и масс присоединённого заряда ω_2. В строках 7,8 таблицы представлены результаты расчёта при классической схеме метания на той же установке.

Из таблицы видно, что во всех приведённых расчётных значениях безразмерная дульная скорость при схеме с присоединённой камерой подгона выше расчётной скорости при классической схеме метания. При этом максимальное давление на дно закрытого торца цилиндрического канала и максимальное давление в области II в случае использования схемы с присоединённой камерой подгона не выше максимального давления на дно закрытого торца канала для классической схемы метания.

При увеличении массы присоединённого заряда (за счёт увеличения плотности заряжания в области II при постоянном её начальном объёме) дульная скорость увеличивается (таблица, строки 1, 2, 3, 4) при близких значениях максимальных давлений в области II и на дно метаемого элемента.

Таблица2-Расчётные значения баллистических параметров схемы с присоединённой камерой подгона

№ п/п	ω_1 кг	ω_2 кг	$t_З$ мс	P^I_{MAX} б/р	P^{II}_{MAX} б/р	$P^Э max$ б/р	Iк МПа·с	I′к МПа·с	$V_Д$ б/р
1	6,5	0,8	6,552	0,5934	0,5904	0,5813	1,02113	0,19426	1,657
2	6,5	0,9	6,553	0,5946	0,5910	0,5788	1,02546	0,23000	1,677
3	6,5	1,0	6,554	0,5936	0,5896	0,5851	1,03129	0,26888	1,690
4	6,5	1,1	6,578	0,5933	0,6009	0,5904	1,03645	0,30927	1,698
5	6,5	1,2	6,579	0,5929	0,5831	0,5754	1,04167	0,36019	1,691
6	7,0	1,1	6,504	0,5944	0,5924	0,5836	1,14897	0,32842	1,718
7	6,5	—	—	0,5916	—	0,3076	0,95030	—	1,610
8	7,0	—	—	0,5939	—	0,3004	0,99044	—	1,631

Примечание: б/р - означает, что параметры приведены в безразмерном виде.

При дальнейшем увеличении ω_2 дульная скорость начинает падать, так как при обеспечении ограничения максимального давления в области II не выше 0,5937 появляется недогорание присоединённого заряда, а если уменьшать I'_k, обеспечивая полное сгорание присоединённого заряда, нарушается ограничение на максимальное давление в области II. Увеличение массы основного заряда позволяет увеличить дульную скорость до 1,718 при заданных ограничениях на максимальное давление (таблица, строка 6).

Результаты расчётов по двухфазной двухскоростной модели схемы выстрела с присоединённым зарядом хорошо согласуются с расчётными данными по модели газопороховой смеси при фиксированных параметрах процесса метания.

Таким образом, реализация схемы с присоединённой камерой подгона на модельной установке с диаметром цилиндрического канала 0,1 м позволит повысить начальные скорости метаемых элементов с C_q=4,55 кГ/дм^3 примерно на 7% при неизменных максимальных давлениях на дно закрытого торца цилиндрического канала по сравнению с классической схемой метания элементов.

Библиографический список

1. Рахматуллин, Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред/ Х.А. Рахматуллин //ПММ. – 1956. – Т.20. – Вып.1. – С.184-195.

2. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.I. / Р.И Нигматулин – М.: Наука, 1987. – 464 с.

3. Русяк, И.Г. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах/ И.Г. Русяк, В.М. Ушаков. Екатеринбург: УрО РАН, 2001.-259 с.

4. Численное решение многомерных задач газовой динамики/ С.К. Годунов [и др.].,-М.:Наука.1976.- 400с.

5. Якушев, И.К. Распад произвольного разрыва в канале со скачком площади сечения/ И.К. Якушев // Известия СО АН СССР. –Сер. техн. наук.- 1967.-Вып. 2.- №8.-С.109-120.

References

1. Rahmatulin H.A. Bases of gazodimamiki of interperetrative motions of the squeezed environments//Applied mathematics and mechanics-1956.-v.20-p. 184-195.

2. Nigmatulin R.I. Dynamics of many-phased environments. Part I. - M.: Science, 1987, p. 464

3. Rusyak I. G., Ushakov V. M. Inside-chamber gcterogennye processes in the barrel systems. Ekaterenburg: Uralski department RAS, 2001, p. 259

4. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.L, Kraiko A.I., Prokopov G.I. Numeral decision of problem of gas dynamics.-M..:Science.-1976, p.400

5. Yakushev I.K. Disintegration of arbitrary gap in canal with bound of area section// News SD AS USSR, issue 2, № 8, series of technical sciencs.-1967, p. 109-120

ANALYSIS AND BALLISTICS PROJECT THE GUN TUBE SYSTEM WITH A JOINED DRIVE ON CHAMBER

©2009 A. I. Safronov[1], V. V. Potapenko[2]

[1]Togliatty State University,
[2]Togliatty military enginiring Institute

On the basis of the mathematical model of internal gun's ballistics with two phases and two velocities of phases the numerical simulation of non traditional scheme of throwing was carried out. The possibility of increasing of initial velocities of missiles with Cq=4,55 kilogram - force per cubic decimeter at about 7% comparison with classical scheme of throwing on conditions that maximum pressures are invariable.

Ballistics Project, Gun Tube System, Joined Drive on Chamber

Информация об авторах

Сафронов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Тольяттинского государственного университета. Тел. 637401. E-mail: safr.a@mail.ru. Область научных интересов: механика гетерогенных систем, численное моделирование процессов в импульсных системах.

Потапенко Вячеслав Викторович, заместитель начальника факультета, начальник учебной части Тольяттинского военного технического института. Тел. +79608431311, E-mail: pww@mail.ru. Область научных интересов: механика гетерогенных систем, численное моделирование процессов в импульсных системах.

Safronov Alexander Ivanovich, Doctor, Head of Math. Physics Departament of Togliatty State University. Phone: 637401. E-mail: safr.a@mail.ru. Area of research: mechanics heterogeneous Systems, numerical modeling Processes in Impulses Systems.

Potapenko Vyacheslav Viktorovich, Deputy of battalion commander chief of study department of Togliatty military engineering institute. Phone: +79608431311. E-mail: pww@mail.ru. Area of research: mechanics heterogeneous Systems, numerical modeling Processes in Impulses Systems.