

УДК 629.7

АНАЛИЗ И БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СРЕДНЕГО КАЛИБРА С ПРИСОЕДИНЁННОЙ КАМЕРОЙ ПОДГОНА

© 2013 А. И. Сафронов, В. М. Азовский, В. А. Зоркин, Н. В. Чиркунова

Тольяттинский государственный университет

На основе модели механики гетерогенных сред представлены результаты исследования температурной зависимости скоростей метания баллистической системы схемы СПК. Показано, что рассматриваемая схема обеспечивает стабильную работу системы в диапазоне температур от +40 до -40 °С.

Система среднего калибра, схема СПК, задержка зажигания, воспламенение, скорость метания.

Введение

Повышения скорости метания можно добиваться при использовании в баллистической системе одной или нескольких камер, присоединённых к метаемому телу. Схема метания с двумя присоединёнными камерами (СПК) подгона рассмотрена в [1]. Работу систем рассмотренной схемы можно обеспечить за счёт реализации зажигания заряда камеры (камер) подгона в строго определённый момент времени (задержки зажигания) после зажигания основного заряда, например, за счёт воспламенения заряда камеры подгона иницирующими газами, перетекающими из камеры основного заряда.

Имеются различные способы обеспечения перетока иницирующих газов из камеры основного заряда в область заряда присоединённой камеры.

Анализ применимости способов иницирования заряда присоединённой камеры можно проводить на основе решения прямой задачи внутренней баллистики (ПЗВБ) с учётом начального периода в области присоединённой камеры системы.

Ранее была рассмотрена задача, когда переток в регулирующий объём, а затем в область дополнительного заряда, начинался после мгновенного вскрытия мембраны на входном отверстии в поршне при достижении давления форсирования $P_{\Phi 1}$. При необходимости реализации достаточно высокого значения $P_{\Phi 1}$

вопрос о стабильности работы систем СПК оставался открытым. В данном случае рассматривается открытие центрального отверстия в поршне при достижении левой границей поршня заданной координаты при движении сборки СПК по каналу.

Реализации такой схемы перетока можно добиваться на основе принципа, заложенного, например, в патенте [2].

При этом воспламенение заряда присоединённой камеры, как и в первом рассмотренном случае, производится горячими газами основного заряда.

Достоинством такого способа воспламенения заряда присоединённой камеры является то, что обеспечивается стабильность начала постепенного перетока иницирующих газов основного заряда в область заряда присоединённой камеры.

После воспламенения заряда присоединённой камеры и достижения перед поршнем давления более высокого, чем давление за поршнем, в канале системы возникает сложная волновая картина, которая приводит к перераспределению энергии заряда на повышение скорости метаемого элемента по сравнению с классической схемой метания.

Рассмотрим применение схемы СПК в установке среднего калибра 100 мм. Система с одной присоединённой к метаемому телу камерой представлена на рис.1.

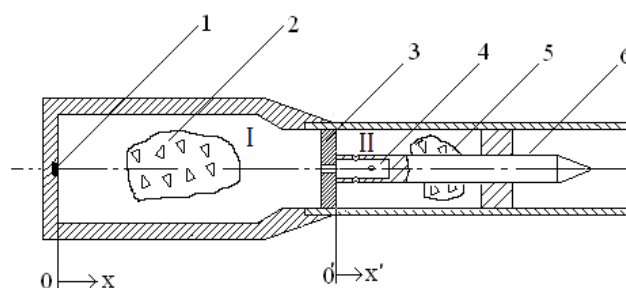


Рис. 1. Схема метания СПК: I—камера основного заряда; II—присоединённая камера; 1— капсюль-воспламенитель; 2 — основной заряд; 3 — поршень с отверстием; 4 — регулирующий объём для перетока; 5 — присоединённый к метаемому телу заряд; 6 — метаемый элемент

Поршень и метаемый элемент жёстко скреплены на сжатие и легко разделяются при растяжении. Будем называть область, где располагаются основной заряд и продукты его горения, областью I, область между поршнем и метаемым элементом — областью II.

Проведённый теоретический анализ эффективности СПК по модели, представленной в [3], показал, что при неизменном максимальном давлении на дно канала ствола при использовании СПК возможно повышение скорости метаемого элемента для системы среднего калибра примерно до 8 %. Заряд ω_1 2, называемый основным, помещается в камере I, затем располагается поршень 3, заряд 5 присоединённой к метаемому телу камеры ω_2 и метаемый элемент 6.

Физико-математическая модель

Физико-математическое моделирование СПК основано на подходах механики гетерогенных сред [4-5], применённых для внутренней баллистики ствольных систем в [6].

Основные допущения, принятые при построении модели СПК:

- вязкость и теплопроводность учитывается только в процессах взаимодействия фаз;

- начальный период (период воспламенения) для основного заряда не учитывается;

- движение сборки начинается при достижении давления форсирования;

- при движении элементов по каналу ствола не учитывается трение и сопротивление воздуха в стволе;

- горение частиц пороха происходит по геометрическому закону;

- до момента разделения сборки частицы дополнительного заряда неподвижны относительно сборки;

- после разделения сборки частицы могут выпадать на поршень; при достижении пористости вблизи поршня некоторой предельной величины ($j_{np} = 0,4$), частицы пороха начинают двигаться со скоростью поршня до тех пор, пока пористость не станет выше предельной;

- после разделения сборки перетоки газа между областями I и II не учитываются;

- входное отверстие в поршне вскрывается мгновенно в момент достижения поршнем заданной координаты при движении сборки присоединённой камеры по каналу ствола;

- мембраны на выходных отверстиях регулирующего объёма вскрываются мгновенно при достижении соответствующего давления (давления форсирования $P_{\phi 2}$);

- в полость регулирующего объёма поступают газообразные продукты горения пороха из области I без примеси частиц конденсированной фазы.

Системы уравнений, описывающие процессы в областях I и II, при СПК записываются в различных системах координат. Система уравнений, описывающая

процессы в области I, записывается в инерциальной системе координат (0-x), а системы уравнений, описывающие процессы в области II и в полости узла воспламенения дополнительного заряда, записываются в неинерциальной системе координат(0'-x'), связанной с поршнем (рис.1). Ниже приводится система уравнений с начальными и граничными условиями, которая при $N = 0$ описывает процессы в области I, а при $N = 1$ и замене переменных и параметров на переменные и параметры со штрихом ($u \equiv u'$ и т.д.) описывает процессы в области II после разделения сборки.

$$\begin{aligned} \frac{f}{f_t}(rsj) + \frac{f}{f_x}(rusj) &= M; \\ \frac{f}{f_t}(rsju) + \frac{f}{f_x}(rsju^2 + psj) &= Mw - t_{TP} + \\ + p \frac{f}{f_x}sj - NrSj \frac{du_{II}}{dt}; \\ \frac{f}{f_t}(rSjE) + \frac{f}{f_x}(Sju(rE + p)) &= -p \frac{f(1-j)Sw}{f_x} - \\ - t_{TP}w + M \left(Q + \frac{w^2}{2} \right) - NrSju \frac{du_{II}}{dt}; \\ \frac{f}{f_t}(r_2(1-j)S) + \frac{f}{f_x}(r_2(1-j)Sw) &= -M; \quad (1) \\ \frac{f}{f_t}(r_2(1-j)Sw) + \frac{f}{f_x}(r_2(1-j)Sw^2) + \\ + (1-j)S \frac{fp}{fx} &= t_{TP} - Mw - Nr_2(1-j)S \frac{du_{II}}{dt}; \\ \frac{fz}{ft} + w \frac{fz}{fx} &= \frac{a_1 p}{e_b}; \\ p \left(\frac{1}{r} - a \right) &= RT; \\ E &= \varepsilon + \frac{u^2}{2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi &= 1 - n\Lambda_0(1 - \varphi(z)); \\ \psi(z) &= \kappa_1 z(1 + \lambda_1 z); \\ M &= SnS_{02}r_2S(z)a_1p^v; \quad (2) \end{aligned}$$

$M' = S'n'S'_{02}r'_2S(z')a'_1p^m e(t' - t'_3)$ - для II области;

$$\sigma(z) = 1 + 2\lambda_1 z;$$

$$t_{TP} = \frac{1}{2} C_x r(u-w) |u-w| S_n \frac{pd_{op}^2}{4} (1-y(z))^{2/3};$$

$$C_x = \begin{cases} \frac{24}{Re} + 0.48, & 0 < Re < 3 \cdot 10^5; \\ 0.1, & Re \geq 3 \cdot 10^5; \end{cases}$$

$$Re = \frac{r|u-w|j \sqrt{S_{02}}}{m}.$$

$$q_T = \alpha_T (T_\Gamma - T_{II}) \frac{6(1-\varphi)S}{d_{op}};$$

$$d_{op} = (6\Lambda_0/\pi);$$

$$a_T = e_1 e_2 S_S (T_\Gamma^2 + T_{II}^2) (T_\Gamma + T_{II}) + \frac{0,61 Re^{0,67} l}{\sqrt{S_{02}}}.$$

Начальные условия в области I:

$$T(x,0) = T_G; P(x,0) = P_\Phi; u(x,0) = w(x,0) = 0;$$

$$\varphi(x,0) = \varphi_H;$$

$$y_H = \frac{1/\Delta - 1/r_2}{\frac{f}{P_\Phi} + a - \frac{1}{r_2}}; z_H = \frac{2y_H}{k_1(1+S_H)}; \quad (3)$$

$$S_H = \sqrt{1 + 4 \frac{I_1}{k_1} \Psi_H}.$$

Начальные условия для расчёта в области II (на момент разделения сборки):

$$\begin{aligned} T'(x\zeta t_R) &= T'(x\zeta); p'(x\zeta t_R) = p'(x\zeta); \\ u'(x\zeta t_R) &= u'(x\zeta); \\ w'(x\zeta t_R) &= 0; j'(x\zeta t_R) = j'(x\zeta); \\ z'(x\zeta t_R) &= z'(x\zeta). \end{aligned} \quad (4)$$

Граничные условия:

$$u(0,t) = w(0,t) = 0; u(x_{II},t) = w(x_{II},t) = u_{II}; \quad (5)$$

$$u'(0,t) = w'(0,t) = 0; u'(x'_s,t) = w'(x'_s,t) = u'_s,$$

где x_{II} , x'_s – координаты поршня и метаемого элемента, соответственно; u_{II} , u'_s – скорости поршня и метаемого элемента, соответственно;

Значения переменных x_{II} , x'_s , u_{II} , u'_s определяются интегрированием уравнений движения сборки, а после её разделения – поршня и метаемого элемента.

$$\left. \begin{aligned} m_{CB} \frac{du_{II}}{dt} &= p_1 S \\ q_s \frac{du'_s}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} t \leq t_R, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} q_{II} \frac{du_{II}}{dt} &= (p_1 - p'_2) S \\ q_s \frac{du'_s}{dt} &= p'_3 S - q_s \frac{du_{II}}{dt} \end{aligned} \right\} t > t_R, \quad (7)$$

где q_{II} , q_s , m_{CB} – массы поршня, метаемого элемента, сборки присоединённой камеры ($m_{II} + q_s + \omega_2$), соответственно; p_1 , p'_2 , p'_3 – давления на поршень со стороны I области, на поршень со стороны II области, на метаемый элемент, соответственно.

Разделение сборки происходит в момент времени t_R , когда ускорение поршня под действием сил давления на него станет меньше ускорения метаемого элемента под действием сил давления на него:

$$p'_3 > \frac{q_s}{q_{II}} (p_1 - p'_2). \quad (8)$$

Начальные условия в области II (4) для системы уравнений (1) с соотношениями (2) при $N = 1$ определяются из решения задачи о перетоке газов из области I через регулирующий объём и постепенного инициирования присоединённого заряда и его горения в условиях ускоряемого постоянного объёма до выполнения условия (8).

Предполагается, что отверстие в поршне (рис.1), входное для перетока в полость регулирующего объёма, вскрывается при достижении поршнем заданной координаты в процессе движения по каналу ствола. Выходные отверстия регулирующего объёма вскрываются при достижении давления $P_{\phi 2}$. Выходные отверстия регулирующего объёма равномерно распределены по длине полости l_0 .

Здесь t – время; x – координата; u – скорость газа; w – скорость твёрдой фазы; p – давление; r – плотность газа; r_2 – плотность вещества пороха; T – температура; T_0 – температура продуктов горения пороха; j – пористость; E , e – полная и внутренняя энергия единицы объёма газа; S – площадь поперечного сечения канала; z – относительная толщина сгоревшего свода; M – скорость массоприхода от горения пороха; t_{TP} – сила взаимодействия между фазами; du_{II}/dt – ускорение поршня; Q – тепловой эффект горения пороха; R – универсальная газовая постоянная; α – коволюм; e_B – толщина горящего свода зерна пороха; a_1, n – коэффициенты в законе скорости горения; n – концентрация; L_0 – начальный объём частицы пороха; $Y(z)$ – относительный сгоревший объём частицы пороха; k_1 , I_1 – коэффициенты формы частиц пороха; S_{02} – начальная площадь частиц пороха; $S(\psi)$ – относительная горящая поверхность частицы пороха; C_x – коэффициент сопротивления; d_{0P} – диаметр шара, эквивалентного по объёму частице пороха; π – число π ; Re – число Рейнольдса; m – вязкость газа; q_T – поток из газовой фазы в конденсированную; a_T – коэффициент теплоотдачи; T_T – температура газа; T_{II} – температура по-

верхности зерна пороха; e_1, e_2 – степени черноты газа и конденсированной фазы; S_S – постоянная Стефана-Больцмана; t_3 – момент зажигания частицы пороха; $e(t-t'_3)$ – функция Хевисайда; t'_3 – время воспламенения каждой расчётной точки заряда во II области; I – коэффициент теплопроводности газа.

Начальные условия для расчёта воспламенения заряда в области II:

$$T(x', t_p) = T_H, P(x', t_p) = 1 \text{ атм}, u(x', t_p) = 0, \quad (9)$$

$$j(x \zeta t_p) = j_H, z(x \zeta t_p) = 0,$$

где t_p – время раскрытия отверстий регулирующего объёма при достижении давления форсирования $p_{\Phi 2}$.

Граничные условия на левой границе области, занятой зарядом присоединённой камеры, задаются в виде потоков массы, импульса, энергии на границе регулирующего объёма и области заряда присоединённой камеры, которые определяются после расчёта распада произвольного разрыва параметров газа на скачке сечения.

На правой границе ставится условие

$$u(l^II, t) = 0,$$

где l^II – длина области, занятой зарядом присоединённой камеры.

Расчёт постепенного инициирования заряда присоединённой камеры проводится на основе локальной твёрдофазной модели зажигания [7]:

$$c_2 T_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = I_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + Q k_0 e^{-E_A/RT_2}, \quad (10)$$

$$I_2 \frac{\partial T_2(x', 0, t)}{\partial y} = a_T (T_{II} - T_I),$$

$$\frac{\partial T_2(x', \infty, t)}{\partial y} = 0, \quad (11)$$

$$T_2(x', y, t_p) = T_H,$$

где y – координата вглубь порохового зерна; c_2 – удельная теплоёмкость вещества пороха; T_2 – температура пороха; I_2 – коэффициент теплопроводности пороха; a_T – коэффициент теплоотдачи; E_A – энергия активации химической реакции; $Q k_0$ – предэкспонент; выражение для a_T приведено в соотношениях (2).

Записанная система уравнений (1) с заданными соотношениями (2), начальными условиями (3)-(4) и краевыми условиями (5)-(7) решается совместно с задачей зажигания зерна заряда (10)-(11) в каждой точке расчётной области и позволяет определять картину постепенного инициирования присоединённого заряда. После определения полей температуры, скорости и давления газа, относительной части сгоревшей толщины свода зерна эта информация используется в качестве начальных условий для системы уравнений [3] при последующем расчёте в области II.

Расчёт течения инициирующих газов в регулирующем объёме

Записанная на основе принятых допущений система уравнений газовой динамики в канале переменного сечения в неинерциальной системе координат, связанной с поршнем, решается численно.

Учитывается расход газа через боковые отверстия регулирующего объёма.

После вскрытия отверстия в поршне в регулирующий объём при $x_0 = 0$ начинают поступать инициирующие газы основного заряда из камеры I.

Параметры поступающего газа определяются после расчёта распада произвольного разрыва параметров газа на скачке сечения.

На правой границе задано условие

$$u(l_0, t) = 0,$$

где l_0 – длина регулирующего объёма.

После вскрытия выходных отверстий регулирующего объёма на правой границе задаются граничные условия в виде потоков массы, импульса, энергии,

которые определяются после расчёта расхода произвольного разрыва параметров газа на скачке сечения.

Расчёт течения газа в регулирующем объёме и в области заряда присоединённой камеры подгона проводится совместно с учётом постепенного воспламенения заряда присоединённой камеры.

Методика численного счёта

Система уравнений (1) решается численно методом С.К.Годунова [8].

Расчётные области I и II покрываются разностными сетками с шагами h и $h\zeta$ соответственно.

После вскрытия входного отверстия в регулирующей области проводится расчёт параметров газа в регулирующем объёме, а после вскрытия его выходных отверстий добавляется расчёт перетока газа и постепенного воспламенения заряда присоединённой камеры в II на основе решения системы уравнений (1) и уравнения (10).

Уравнение воспламенения (10) с краевыми условиями (11) аппроксимируется по неявной схеме на неравномерной, сгущающейся к поверхности зерна сетке и решается методом прогонки. Граничные условия аппроксимируются со вторым порядком точности по пространству.

Анализ результатов

Система уравнений, описывающая процесс работы системы СПК, с заданными соотношениями и соответствующими краевыми условиями решалась совместно с задачей зажигания зёрен заряда в каждой точке расчётной области II и позволяла определять картину постепенного инициирования заряда присоединённой камеры подгона. После определения полей температуры, скорости и давления газа, относительной части сгоревшей толщины свода зерна эта информация использовалась для совместного решения системы уравнений в областях I и II.

Таким образом, полностью рассчитывалась баллистика системы калибра 100 мм СПК с использованием воспламени-

тельного узла в виде регулирующего объёма с отверстиями, обеспечивающими переток горячих иницирующих газов в область заряда камеры подгона.

Масса основного заряда составляла 6,2 кг, заряда камеры подгона – 0,9 кг; массы поршня – 1,66 кг и метаемого элемента – 4,45 кг. При проведении параметрических исследований была получена координата X_R открытия отверстия в поршне для перетока, обеспечивающая рассматриваемый выигрыш в начальной скорости при СПК, значение которой и использовалось в расчётах.

Для исследований был выбран вариант, при котором выигрыш для системы среднего калибра в начальной скорости при СПК составил при сравнении с экспериментально полученными значениями начальной скорости 6,7 %.

На стабильность работы системы, кроме параметров схемы СПК, оказывает влияние также температурная зависимость при воспламенении и горении реакционноспособного состава. Расчёты показали, что за счёт автоподстраиваемости СПК практически снята эта зависимость для рассмотренной системы.

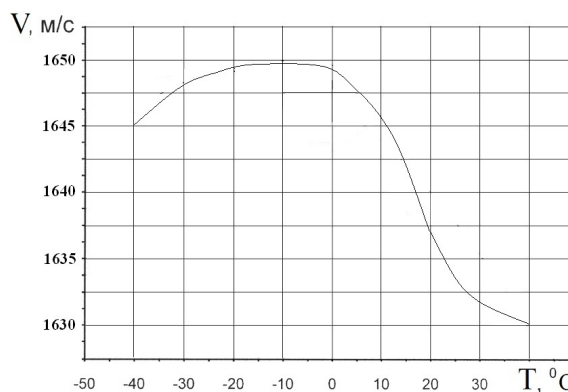


Рис.2. Зависимость скорости метания при СПК от температуры заряда в камере подгона

Расчеты с учетом начальной температуры заряда показали (рис.2), что для системы калибра 100 мм при температуре 20 °C начальная скорость $V=1637$ м/с. При температуре заряда 40 °C отклонение начальной скорости метания от начальной скорости метания при температуре 20 °C

составило -0,4 %. При температуре заряда -40 °С отклонение начальной скорости от начальной скорости метания при температуре 20 °С составило около +0,5 %.

Таким образом, расчётным путём показано, что системы СПК могут обеспечивать достаточно хорошую стабильность скорости метания при изменении начальной температуры заряда в диапазоне от -40 до +40 °С.

Библиографический список

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

2. Пат. 21661813 Российская Федерация. Устройство для зажигания топлив. [Текст] / Буркин В.В., Синяев С.В., Христенко Ю.Ф. Опубл. 27.04.2001.

3. Сафронов, А.И. Внутренняя баллистика ствольной системы с присоединенной камерой подгона [Текст] / А.И. Сафронов, А.Ю. Крайнов // Вестн. ТГПУ. – 2004. – Вып. 6(43). – С. 67-70.

4. Рахматуллин, Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред [Текст] / Х.А. Рахматуллин // ПММ. – 1956. – Т.20. – В.1. – С.184-195.

5. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред [Текст] / Р.И. Нигматулин // М.: Наука, 1987. – Ч.1. – 464с.

6. Русак, И.Г. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах [Текст] / И.Г. Русак, В.М. Ушаков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 459 с.

7. Вилунов, В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. [Текст] / В.Н. Вилунов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 180 с.

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

ANALYSIS AND BALLISTIC DESIGN OF A MEDIUM-CALIBER SYSTEM WITH AN ATTACHED CAMERA OF ACCELERATING

© 2013 A. I. Safronov, V. M. Azovsky, V. A. Zorkin, N. V. Chirkunova

Togliatti State University, Togliatti

The paper presents the results of investigating the temperature dependences of the velocities of launching a ballistic system of the SAC scheme based on the model of mechanics of heterogeneous media. The scheme proposed is shown to provide stable system operation in the temperature range from 40 ° to -40 ° C.

System of medium-caliber, SAC scheme, ignition delay, inflammation, launching velocity.

Информация об авторах

Сафронов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика», Тольяттинский государственный университет. E-mail: sufr.a@mail.ru. Область научных интересов: внутренняя баллистика, горение топлив, механика гетерогенных сред, численное моделирование процессов в импульсных системах.

Азовский Вячеслав Михайлович, кандидат химических наук, доцент кафедры «Общая и теоретическая физика», Тольяттинский государственный университет.

E-mail: azjvskivm@mail.ru. Область научных интересов: механика гетерогенных сред, численное моделирование процессов в импульсных системах.

Зоркин Владимир Анатольевич, старший преподаватель кафедры «Информатика и вычислительная техника», Тольяттинский государственный университет. E-mail: vikraft@yandex.ru. Область научных интересов: механика гетерогенных сред, численное моделирование процессов в импульсных системах.

Чиркунова Наталья Валерьевна, ассистент кафедры «Нанотехнологии, материаловедение, механика», Тольяттинский государственный университет. E-mail: Natchv@yandex.ru. Область научных интересов: механика гетерогенных сред, численное моделирование процессов в импульсных системах.

Safronov Alexander Ivanovich, Doctor of Physics and Mathematics, Department of Nanotechnologies, Material Engineering and Mechanics, E-mail: safr.a@mail.ru. Area of research: interior ballistics, burning of fuel, mechanics of heterogeneous media, numerical modeling of processes in pulse systems.

Azovsky Vyacheslav Michailovich, Candidate of Science (Chemistry), Senior Lecturer, Department of General and Theoretical Physics. E-mail: azjvskivm@mail.ru. Area of research: mechanics of heterogeneous media, numerical modeling of processes in pulse systems.

Zorkin Vladimir Anatolyevich, Senior Lecturer, Department of Informatics and Computer Science. E-mail: vikraft@yandex.ru. Area of research: mechanics of heterogeneous media, numerical modeling of processes in pulse systems.

Chirkunova Natalija Valeryevna, Assistant, Department of Nanotechnologies, Material Science and Mechanics. E-mail: Natchv@yandex.ru. Area of research: mechanics of heterogeneous media, numerical modeling of processes in pulse systems.