НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408
электронный научно-технический журнал

Особенности расчета контактных датчиков цели взрывателей

08, август 2013
DOI: 10.7463/0813.0605972

Ефремов А. К.

УДК 623.454.255

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская федерация
efrak@mail.ru

Введение

При исследовании функционирования контактных датчиков цели (КДЦ) взрывателей необходимо количественно описывать силы инерции, порождаемые взаимодействием боеприпаса с преградами различного типа. При этом применяют эмпирические формулы, т.е. экспериментально полученные соотношения, которые связывают характеристики боеприпаса (масса q и калибр d), скорость встречи V_c с преградой и ее физико-механические свойства. В фундаментальных работах [1, 2] рассмотрены теоретические аспекты процесса взаимодействия боеприпасов с преградами различного типа. Известны специальные прикладные программы, позволяющие проследить развитие во времени пространственного процесса внедрения боеприпаса в преграду [3].

Различают следующие виды взаимодействия боеприпаса с преградами [2]: мгновенно-контактное (взрыв боевого заряда происходит в результате срабатывания КДЦ мгновенного действия, а энергия взрыва расходуется на разрушение объектов на поверхности преграды) и ударно-проникающее (удар боеприпаса о преграду и внедрение в нее на заданную или полную глубину, соответствующую остановке боеприпаса; взрыв боевого заряда происходит в результате срабатывания инерционного КДЦ). Движение боеприпаса в преграде, на которое не влияют ее размеры, называют проникранием, а движение, связанное с разрушением тыльных слоев преграды и выходом боеприпаса, – пробиванием.

Одной из теоретических предпосылок при установлении закона сопротивления сплошной среды является следующее положение – кинетическая энергия боеприпаса $E_c = qV_c^2/2$ расходуется исключительно на преодоление сопротивления преграды. Данное положение тем ближе к истине, чем податливее преграда, прочнее снаряд и меньше скорость встречи. Выходной сигнал КДЦ (механический или электрический) представляет собой отклик чувствительного элемента (сенсора) на динамическое взаимодействие головной части боеприпаса с целью, при этом возникают волны механического напряжения, причем наиболее энергоемки продольные волны [4].

Процесс проникания боеприпаса в сплошные среды обычно разбивают на три этапа [5, 6].

1) Внедрение боеприпаса на глубину, примерно равную длине головной части L. Этот этап характеризуется изменением площади контакта со средой и возрастанием силы сопротивления до максимума, падение скорости боеприпаса относительно невелико.

2) Площадь контакта боеприпаса со средой практически постоянна, однако скорость все время уменьшается, в связи с чем сила сопротивления преграды также непрерывно снижается. За боеприпасом образуется канал (каверна), который в средах малой прочности схлопывается.

3) Сквозное прибивание – данный этап возможен при конечной толщине преграды и достаточно большой скорости снаряда (бронебойного или бетонобойного).

Первым этапом внедрения часто пренебрегают, ограничиваясь рассмотрением только стационарного движения боеприпаса во время второго этапа и считая, что он определяет все основные закономерности процесса [6]. Однако с точки зрения функционирования КДЦ взрывателя начальный этап является основным, поскольку срабатывание КДЦ должно произойти в пределах именно этого этапа (т.е. в пределах длительности переднего фронта закона ударной перегрузки).

Параметры данного этапа внедрения боеприпаса могут быть выявлены на основе соответствующей аппроксимации начального участка силовой характеристики преграды. В настоящей работе предложены два способа аппроксимации, основанные на использовании эмпирических формул для полного пути внедрения боеприпаса, с учетом экспериментально установленных фактов, указанных выше. При этом сделано предположение, что влияние скорости и перемещения боеприпаса при внедрении может быть учтено раздельно, путем введения в силовую характеристику преграды соответствующих функциональных множителей.

Задача решается в одномерной постановке, т.е. траектория боеприпаса в преграде считается прямолинейной. Такое допущение, строго говоря, приемлемо в случае преград типа грунта, в ограниченном диапазоне значений угла встречи от нормали к поверхности преграды (до 20…30^0). Однако, поскольку объектом исследования являются параметры только начального этапа внедрения, влиянием последующего искривления траектории боеприпаса, при бóльших углах встречи, с практической точки зрения можно пренебречь

Показано, что предлагаемый подход, будучи приближенным, тем не менее дает приемлемое для практики описание процесса взаимодействия боеприпаса с преградой. В качестве примера приведены результаты расчета КДЦ кассетного боевого элемента, причем получаемое расчетное значение перегрузки совпадает с рабочим уровнем, указанным в техническом задании.

Рассмотрен вопрос о возможности создания КДЦ интеграторного типа как средства определения запреградной скорости боеприпаса и фильтрации колебательных составляющих выходного сигнала КДЦ..

1 Эмпирические формулы

Силовая характеристика преграды при одномерной постановке задачи может быть представлена следующим образом:

$$P = P(X, V). \tag{1}$$

Здесь P – сила сопротивления; X и V – перемещение и скорость боеприпаса, соответственно, причем взаимосвязь $V(X)$ определяет динамику процесса и в большой степени зависит от начальной скорости удара V_c. Если эта взаимосвязь известна, то, очевидно, можно считать, что $P = P(X)$.

Широко известно описание силовой характеристики в форме, предложенной Г.И. Покровским [2, 5, 6]

$$P = s\lambda\left(aV^2 + bV + c\right), \tag{2}$$

где эмпирические коэффициенты a, b и c характеризуют, соответственно, динамические, вязкие и прочностные свойства преграды; λ – коэффициент, учитывающий конфигурацию головной части снаряда; $s = \pi d^2/4$ – площадь его миделевого сечения. При таком описании сила сопротивления максимальна в начальный момент удара, когда $V = V_c$, т.е. $P_m = P(V_c)$; при последующем движении боеприпаса скорость и, соответственно, сила сопротивления уменьшаются и при проникании боеприпаса на полную глубину l обращаются в ноль.

Уравнение прямолинейного движения боеприпаса (рассматриваемого как твердое тело) в процессе взаимодействия его с преградой можно записать следующим образом:

$$q\frac{dV}{dt} = qV\frac{dV}{dX} = -P. \tag{3}$$

При расчете КДЦ удобно оперировать перегрузкой

$$n = \frac{1}{g}\left|\frac{dV}{dt}\right| = \frac{P}{gq}$$

Интегрируя (3), будем иметь

$$V = V_c\sqrt{1 - \frac{1}{E_c}\int_0^X PdX}\ .$$

Принимая $V = 0$ (остановка боеприпаса), получаем соотношение

$$E_c = \int_0^l PdX\ , \tag{4}$$

т.е. кинетическая энергия боеприпаса затрачивается на совершение работы, связанной с преодолением сопротивления среды, о чем сказано выше. Схема проникания снаряда в преграду при прямолинейной траектории показана на рисунке 1, где $h = l\cos\theta_0$ – глубина проникания; θ_0 и θ_c – углы встречи от нормали и относительно поверхности преграды соответственно.

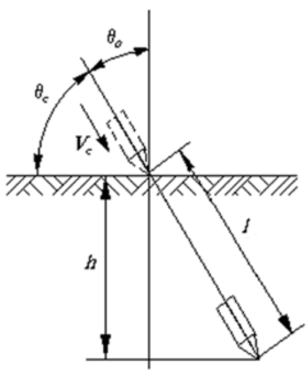


Рисунок 1 – Схема проникания снаряда в преграду

Эмпирические формулы, которые обычно используют для определения l, выводят из выражения (2), удерживая в нем те или иные члены, которые характеризуют доминирующие физические свойства преграды. Наиболее известные из них представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Эмпирические формулы для определения l

Название формулы	Выражение для l	Примечание
Березанская	$\frac{qV}{\lambda sb}=\frac{\lambda_{п}k_{п}qV_{с}}{d^2}$	$k_{п}=\frac{\pi b}{4}$ – коэффициент свойств преграды; $\lambda_{п}=\frac{1}{\lambda}=\begin{cases}1{,}0 \text{ при } L\le 1{,}5d\\ 1{,}5 \text{ при } L\le 2{,}5d\end{cases}$
Забудского-Маиевского	$\frac{\lambda_{п}q}{2sa}ln\left(1+\frac{aV_{с}^2}{c}\right)$	
Вуича	$m\xi_0 P_{m}$, где $P_m=q/s$; $\xi_0=\frac{1}{2a_1}ln\left(1+\frac{a_1V_{с}^2}{c_1}\right)$	m – поправочный коэффициент для трех классов преград: грунт, кладка, дерево; корректировка параметров: $a=a_1/m$; $c=c_1/m$
Петри	$\frac{k_{п}qf(V_{с})}{d^2}$	$f(V_c)$ – функция скорости удара (от 40 до 420 м/с)

Числовые значения коэффициентов, фигурирующих в этих формулах, можно найти в ряде работ [5–9].

2 Аппроксимация силовой характеристики преграды

При конструировании выражения для силовой характеристики преграды следует принять во внимание следующие экспериментально установленные факты:

1) при внедрении боеприпаса на длину головной части L сила сопротивления преграды, как сказано выше, максимальна;

2) при внедрении боеприпаса, равном полному пути l, сила сопротивления и скорость снаряда обращаются в ноль.

Возможность выявления параметров переднего фронта закона перегрузки на основе использования l можно обосновать следующим образом. Значения l, подсчитываемые по эмпирическим формулам, получены в результате обработки результатов полигонных стрельб и, следовательно, интегрально учитывают весь ход протекания ударного процесса при взаимодействии боеприпаса с преградой, в том числе (что особенно важно подчеркнуть) и первый этап внедрения. Иначе говоря, параметры первого этапа как бы «зашифрованы» в величине l, и их необходимо извлечь.

2.1 Кусочно-линейная аппроксимация

Рассмотрим два способа приближенного описания силовой характеристики. Предположим сначала, что она в пределах всего пути внедрения может быть представлена в виде кусочно-линейной функции перемещения снаряда:

$$P = \begin{cases} P_m \dfrac{X}{L}, 0 \le X \le L, \\ P_m \dfrac{l - X}{l - L}, L \le X \le l. \end{cases} \tag{5}$$

Более строгая зависимость $P(X)$ может быть в принципе выведена из формулы (1), если известна взаимосвязь между элементами движения боеприпаса $V(X)$, как отмечено выше. Однако с практической точки зрения достаточно того, что выражение (5) отображает два важных факта: сила сопротивления преграды максимальна при внедрении боеприпаса на длину головной части и обращается в ноль при внедрении на полную глубину. Величина максимальной силы сопротивления P_m априорно неизвестна, но может быть найдена с помощью энергетического соотношения (4), из которого следует, что кинетическая энергия удара равна площади под силовой характеристикой в пределах полного пути внедрения l, т.е.

$$E_c = \frac{qV_c^2}{2} = \frac{1}{2} P_m l = \frac{1}{2} qgn_m l,$$

откуда

$$P_m = n_m qg = \frac{qV_c^2}{l}$$

и, соответственно, максимальная перегрузка

$$n_m = \frac{V_c^2}{gl}. \tag{6}$$

Отсюда видно, что чем больше l, т.е. чем более податлива преграда, тем (при одинаковой скорости встречи) ниже уровень перегрузки, что вполне очевидно с физической точки зрения. Аналогичный результат получен в работе [9], однако авторы, используя энергетическое соотношение (4), участком нарастания силы сопротивления до максимума пренебрегают, т.е. считают, что (в наших обозначениях)

$$P = P_m\left(1 - \frac{X}{l}\right).$$

Здесь «по умолчанию» предполагается, что сила сопротивления максимальна в момент встречи боеприпаса с преградой, как это следует из формулы (2).

Запишем для первого этапа уравнение (3), учитывая (5):

$$\frac{d^2X}{dt^2} + \Omega_0^2 X = 0,.$$

Здесь $\Omega_0 = \sqrt{P_m/(qL)} = V_c/\sqrt{lL}$ Решение данного уравнения имеет вид

$$X = \frac{V_c}{\Omega_0}\sin\omega_0 t = \sqrt{Ll}\sin\Omega_0 t;\ V = V_c\cos\Omega_0 t.$$

Принимая $X = L$, найдем длительность переднего фронта

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{arcsin\left(\sqrt{L/l}\right)}{\sqrt{L/l}}.$$

Здесь $\tau_0 = L/V_c$ – время свободного перемещения боеприпаса на длину головной части (если пренебрегать сопротивлением преграды, т.е. падением скорости в пределах переднего фронта). Влияние энергии удара и свойств преграды характеризуется множителем, зависящим от отношения L/l. Скорость боеприпаса в конце первого этапа внедрения

$$\frac{V(\tau)}{V_c} = \sqrt{1 - \frac{L}{l}}.$$

Наконец, находим закон перегрузки

$$n(t) = \frac{P_m}{qg}X(t) = \frac{V_c^2}{g\sqrt{Ll}}\sin\Omega_0 t = n_m\sqrt{\frac{l}{L}}\sin\Omega_0 t = n_m\frac{\sin\Omega_0 t}{\sin\Omega_0\tau}.$$

Из приведенных формул видно, что по мере возрастания энергии удара (т.е. увеличения l) относительная доля начального этапа удара уменьшается.

2.2 Учет изменения площади взаимодействия с преградой

Теперь предположим, что влияние элементов движения боеприпаса на силовую характеристику преграды можно учитывать раздельно, записав выражение (1) в виде произведения двух функциональных множителей:

$$P = \lambda s\varphi(\bar{X})\,\psi(V), \tag{7}$$

где $\bar{X} = X/L$ – относительное перемещение боеприпаса на начальном этапе ($0 \le \bar{X} \le 1{,}0$). Функция $\varphi(\bar{X})$ характеризует относительное изменение площади сечения при возрастании силы сопротивления до максимума во время первого этапа внедрения, причем $0 \le \varphi(\bar{X}) \le 1$. Функция $\psi(V)$ отображает квазистационарный (установившийся) процесс внедрения во время второго этапа, который описывается формулой (7) при $\bar{X} > 1$:

$$P = \lambda s \psi(V).$$

Введем безразмерные скорость боеприпаса $\bar{V} = V/V_c$ и текущее время $\bar{t} = t/T$. Тогда

$$V = \bar{V} \cdot V_c = \frac{dX}{dt} = \frac{L}{T}\frac{d\bar{X}}{d\bar{t}},$$

а величину T определим из условия $T = L/V_c = \tau_0$. В результате уравнение движения боеприпаса можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\bar{V}}{d\bar{t}} = \bar{V}\frac{d\bar{V}}{d\bar{X}} = -\frac{\lambda s L}{q V_c^2}\varphi(\bar{X})\,\psi(V).$$

Рассмотрим в качестве примера Березанскую формулу, которая выводится с помощью (2) при учете только вязкой составляющей, т.е. принимаем

$$\psi(V) = bV = bV_c\bar{V}.$$

Нетрудно видеть, что (см. таблицу 1)

$$\frac{\lambda s L}{q V_c^2} b V_c = \frac{\lambda b s}{q V_c} L = \frac{L}{l}.$$

Таким образом,

$$\frac{d\bar{V}}{d\bar{X}} = \begin{cases} -\dfrac{L}{l}\varphi(\bar{X}), & \bar{X} \le 1, \\ -\dfrac{L}{l}, & \bar{X} > 1, \end{cases} ..$$

и, соответственно,

$$\bar{V} = \frac{d\bar{X}}{d\bar{t}} = \begin{cases} 1 - \dfrac{L}{l}\displaystyle\int_0^{\bar{X}} \varphi(\bar{X})d\bar{X}, & \bar{X} \le 1 \\ \bar{V}_\tau - \dfrac{L}{l}(\bar{X} - 1), & \bar{X} > 1 \end{cases},$$

где $\bar{V}_\tau = 1 - (L/l_п)\int_0^1 \varphi(\bar{X})d\bar{X}$ – скорость в конце переднего фронта закона перегрузки. Зависимость $\bar{t}(\bar{X})$ может быть вычислена из соотношений

$$\bar{t}=\begin{cases}\displaystyle\int\limits_0^{\bar{X}}\frac{d\bar{X}}{1-\frac{L}{l}\int\limits_0^{\bar{X}}\varphi\left(\bar{X}\right)d\bar{X}}, & \bar{X}\le 1\\ \displaystyle\bar{\tau}+\int\limits_1^{\bar{X}}\frac{d\bar{X}}{\bar{V}_\tau-\frac{L}{l}\left(\bar{X}-1\right)}. & \bar{X}>1\end{cases},$$

Длительность переднего фронта

$$\bar{\tau}=\frac{\tau}{\tau_0}=\int\limits_0^1\frac{d\bar{X}}{1-\frac{L}{l}\int\limits_0^{\bar{X}}\varphi\left(\bar{X}\right)d\bar{X}}.$$

Если, например, считать, что головная часть коническая, то $\varphi\left(\bar{X}\right)=\left(\bar{X}\right)^2$, и тогда

$$\bar{V}=\frac{d\bar{X}}{d\bar{t}}=\begin{cases}1-\frac{L}{3l}\left(\bar{X}\right)^3, & \bar{X}\le 1\\ 1-\frac{L}{l}\left(\bar{X}-\frac{2}{3}\right)\end{cases}.$$

Соответственно,

$$\bar{t}=\int\limits_0^{\bar{X}}\frac{d\bar{X}}{1-\frac{L}{3l}\left(\bar{X}\right)^3}=\frac{1}{\mu}\left[\frac{1}{3}ln\frac{\sqrt{1+\mu\bar{X}+\left(\mu\bar{X}\right)^2}}{1-\mu\bar{X}}+\frac{1}{\sqrt{3}}\operatorname{arctg}\frac{\mu\bar{X}\sqrt{3}}{2+\mu\bar{X}}\right],$$

где $\mu=\sqrt[3]{L/(3l)}$. Принимая $\bar{X}=1$, найдем длительность переднего фронта

$$\bar{\tau}=\frac{1}{\mu}\left[\frac{1}{3}ln\frac{\sqrt{1+\mu+\mu^2}}{1-\mu}+\frac{1}{\sqrt{3}}\operatorname{arctg}\frac{\mu\sqrt{3}}{2+\mu}\right].$$

3 Расчет КДЦ кассетного боевого элемента

Инерционный КДЦ простейшего типа состоит из ударника массой *m*, контрпредохранительной пружины с жесткостью *c* и капсюля-воспламенителя (или капсюля-детонатора). Уравнения движения боеприпаса и ударника при встрече с преградой имеют вид

$$q\frac{dV}{dt}=-P;\ m\frac{dv}{dt}=-m\frac{dV}{dt}-R_0-cx,$$

где R_0 – начальное сопротивление пружины; c – ее жесткость; v – скорость ударника. Введя перегрузку боеприпаса, уравнение движения ударника можно записать в виде

$$\frac{d^2x}{dt^2}+\omega_0^2x=g\left[n(t)-n_0\right],$$

где $n_0 = R_0/(mg)$ – начальная «настройка» КДЦ; $\omega_0 = \sqrt{c/m}$ – условная частота собственных колебаний. Полная система уравнений, необходимая для численного решения данной задачи, будет иметь вид

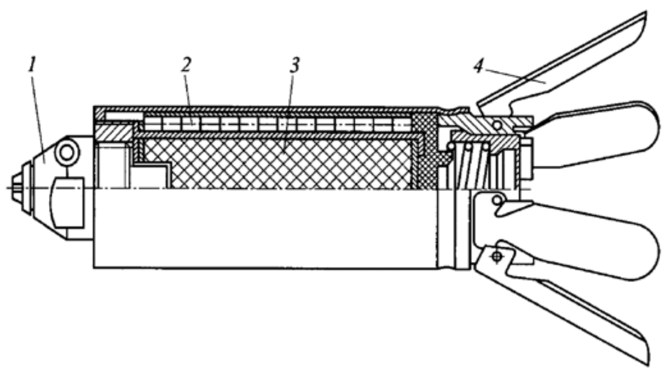
$$\frac{dV}{dt} = -gn(X); \; \frac{dX}{dt} = V; \; \frac{dv}{dt} = g[n(X) - n_0] - \omega_0^2 x; \; \frac{dx}{dt} = v.$$

Движение ударника начнется в момент времени t_0, определяемый из условия $n(t_0) = n_0$. Соответствующее заглубление боеприпаса X_0, очевидно, тем больше, чем больше n_0. Следует отметить, что величина l в данном случае имеет чисто расчетный смысл, поскольку срабатывание КДЦ произойдет при заглублении боеприпаса, соизмеримом с длиной головной части. Условие надежности действия КДЦ

$$v_{\text{н}}/v_{\min} \geq 1,$$

где $v_{\text{н}} = v(a)$ – скорость ударника в момент накола; a – расстояние между жалом ударника и капсюлем; $v_{\min}$ – минимальная скорость, обеспечивающая 100%-ное срабатывание капсюля.

Рассмотрим конкретный пример [10]: боеприпас – кассетный боевой элемент (КБЭ), представление о конструкции которого дает рисунок 2 [5]. Параметры изделия таковы $d = 0{,}084$ м; $q = 7{,}8$ кг; длина головной части $L = 2{,}5d = 0{,}21$ м; расчетная (целевая) преграда – грунт средней плотности; скорость встречи с преградой от 90 до 200 м/с; угол встречи $\theta_0 \leq 40^0$, т.е. траекторию КБЭ в преграде можно считать прямолинейной и использовать приведенные выше соотношения для этого случая.



1 – взрыватель, *2* – блок готовых поражающих элементов, *3* – разрывной заряд, *4* – стабилизатор

Рисунок 2 – Кассетный боевой элемент

Параметры инерционного КДЦ, входящего в состав взрывателя к КБЭ: масса ударника $m = 1{,}4$ г ($v_{\min} = 7{,}7$ м/с); жесткость упругого контрпредохранителя $c = 32$ Н/м; начальная осадка $\lambda_0 = 0{,}3$ мм; $a = 7$ мм. Для расчета полного пути КБЭ в преграде воспользуемся Березанской формулой. Принимаем значение коэффициента преграды (грунт средней плотности) $k_{\text{п}} = 12 \cdot 10^{-6}$ [6], коэффициент формы $\lambda_{\text{п}} \approx 1{,}0$. Тогда

$$l = \frac{k_{\text{п}} q V_{\text{c}}}{d^2} = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 7{,}8 \cdot V_{\text{c}}}{0{,}084^2} = 1.236 \cdot 10^{-2} V_{\text{c}}; \; n_{\text{m}} = \frac{V_{\text{c}}^2}{gl} = 7{,}692 V_{\text{c}}$$

Сначала используем кусочно-линейную аппроксимацию силовой характеристики, согласно (5):

$$n(X) = \begin{cases} n_{\text{m}} \dfrac{X}{L}, 0 \le X \le L, \\ n_{\text{m}} \dfrac{l - X}{l - L}, L \le X \le l. \end{cases}$$

Основные параметры ударного процесса приведены в таблице 3. Отметим, что эти параметры достаточно близки к указанным в техническом задании на КБЭ – расчетный уровень перегрузки при скорости встречи около 120 м/с задан равным 1000.

Таблица 3 – Параметры ударного процесса при встрече КБЭ с преградой

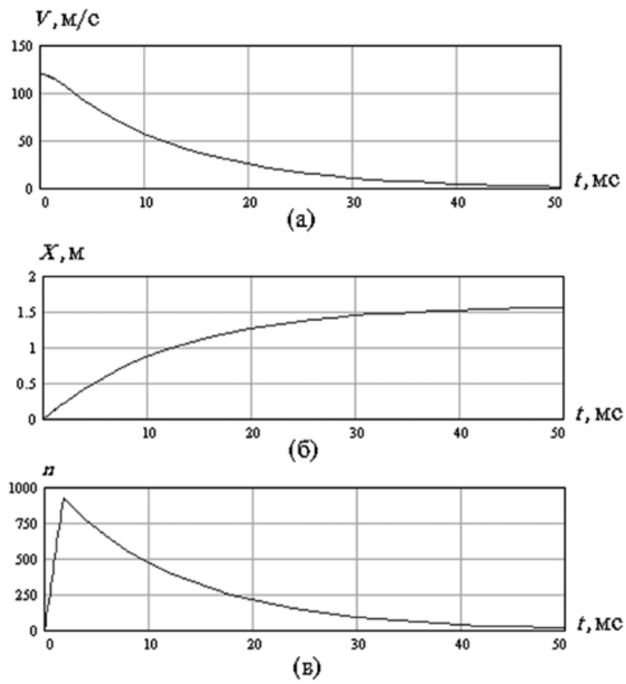
V_c, м/с	l, м	n_m	τ, мс	τ/τ_0	$V(\tau)/V_c$
90	1,194	692	2,408	1,032	0,907
100	1,326	768	2,160	1,028	0,917
110	1,459	845	1,958	1,026	0,925
120	1,592	922	1,791	1,023	0,931
130	1,724	1000	1,650	1,022	0,937
140	1,857	1076	1,530	1,020	0,941
150	1,990	1152	1,426	1,018	0,945
160	2,122	1229	1,335	1,017	0,949
170	2,255	1306	1,255	1,016	0,952
180	2,388	1383	1,184	1,015	0,955
190	2,520	1460	1,121	1,014	0,957
200	2,653	1536	1,064	1,013	0,959

В таблице 4 даны результаты исследования функционирования КДЦ в указанных условиях нагружения, через t_c обозначено время срабатывания (от момента начала контакта). Видно, что срабатывание КДЦ в данном случае происходит на спадающем участке кривой перегрузки ($t_{\text{c}}/\tau_0 > 1$), хотя и на небольшом удалении от максимума.

Таблица 4 – Параметры срабатывания КДЦ

$V_с$, м/с	$t_с$, мс	t_c/τ_0	$v_н$, м/с	$v_н/v_{\min}$
90	2,450	1,018	8,470	1,098
100	2,283	1,057	9,075	1,177
110	2,142	1,094	9,633	1,249
120	2,021	1,129	10,16	1,318
130	1,916	1,161	10,67	1,383
140	1,824	1,192	11,14	1,444
150	1,743	1,222	11,59	1,503
160	1,670	1,251	12,03	1,560
170	1,606	1,279	12,46	1,616
180	1,546	1,305	12,86	1,667
190	1,493	1,332	13,27	1,720
200	1,443	1,356	13,64	1,768

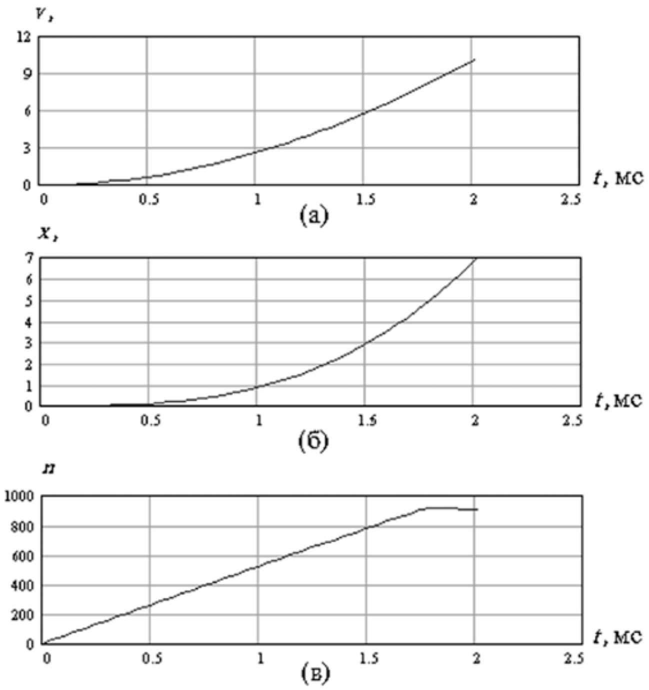
В случае более прочной преграды при одинаковой скорости встречи длительность переднего фронта практически не изменяется (она имеет порядок τ_0), но возрастает пиковый уровень перегрузки, т.е. увеличивается энергоемкость начального участка кривой перегрузки. Поэтому срабатывание КДЦ будет происходить в пределах длительности переднего фронта.



(а) – скорость; (б) – перемещение; (в) – закон перегрузки
Рисунок 3 – Элементы движения КБЭ при встрече с преградой

На рисунке 3 показаны элементы движения КБЭ при указанной в ТЗ скорости встречи с преградой $V_c = 120$ м/с. Расчетный уровень перегрузки соответствует указанному в ТЗ (порядка 1000). Следует отметить, что закон перегрузки в пределах переднего фронта практически линейный, т.е. соответствует принятой аппроксимации (вследствие относительно малого падения скорости). Этот факт может быть использован при приближенном описании закона перегрузки в пределах переднего фронта, например, при оценке чувствительности КДЦ и оптимизации его параметров [10].

На рисунке 4 приведены элементы движения ударника КДЦ, а также, для сравнения, начальный участок кривой перегрузки. В целом результаты проведенного расчета свидетельствуют, что в заданных условиях встречи КБЭ с целевой преградой надежное срабатывание КДЦ гарантируется. Таким образом, предложенный подход позволяет получить вполне адекватную оценку работоспособности инерционного КДЦ, по крайней мере при взаимодействии боеприпаса с преградой рассматриваемого типа.



(а) – скорость ударника; (б) – перемещение ударника; (в) – начальный участок закона перегрузки

Рисунок 4 – Элементы движения ударника КДЦ

Выше (раздел 2.2) приведены соотношения, получающиеся при применении Березанской формулы, в частности, при конической головной части боеприпаса. Для рассматриваемого КБЭ (при $V_c = 120$ м/с) имеем: $l = 1{,}592$ м; $L = 0{,}21$ м; $T = L/V_c = 1{,}75 \cdot 10^{-3}$ с. На рисунках 5 и 6 показаны результаты моделирования процесса взаимодействия боеприпаса с преградой. Сравнивая эти графики с полученными выше (рисунок 3), отметим близость основных параметров, что подтверждает принципиальную приемлемость обоих подходов.

Задача рассматривалась в упрощенной, т.е. одномерной постановке, но вновь подчеркнем, что влиянием искривления траектории боеприпаса в преграде можно, по-видимому, пренебречь, поскольку оценивается работоспособность КДЦ только в пределах начального этапа внедрения.

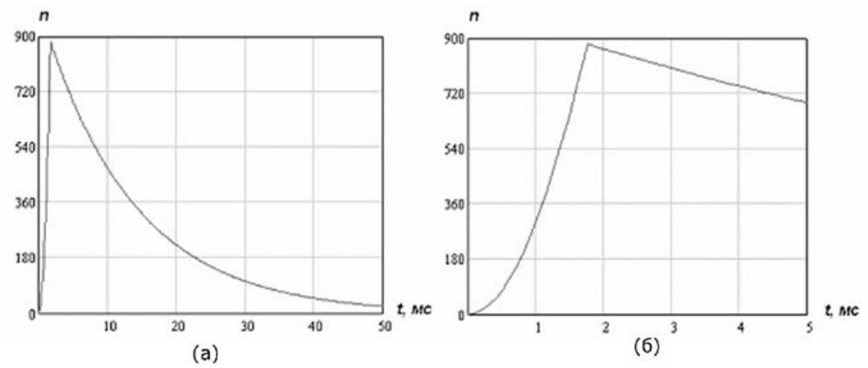
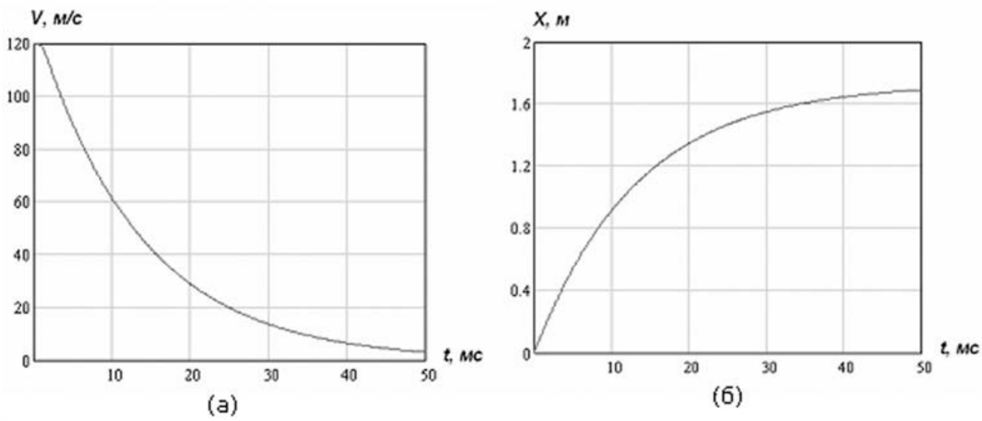


Рисунок 5 – Закон и передний фронт перегрузки при встрече КБЭ с преградой



а – скорость; *б* – заглубление

Рисунок 6 – Элементы движения КБЭ

4 Интегрирующий КДЦ

Интегрирование выходного сигнала КДЦ может быть использовано для получения информации о скорости боеприпаса при пробитии преграды, т.е. для фиксации момента выхода боеприпаса в запреградное пространство, поскольку при этом скорость становится практически постоянной. При интегрировании происходит сглаживание пульсаций (и, следовательно, волновых наложений), и можно получить достаточно гладкий сигнал, поддающийся более эффективной обработке.

Как известно, при измерении быстропротекающих процессов стремятся использовать высокочастотные измерительные средства [11–13]. Это нетрудно объяснить, предположив, что уравнение, описывающее преобразование воздействия $y(t)$ в отклик датчика $x(t)$, может быть записано в виде

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2h\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = ky(t), \tag{8}$$

где k – масштабный коэффициент; ω_0 – частота собственных колебаний; h – коэффициент демпфирования. Если из (8) выразить закон реакции, то получим соотношение

$$x(t) = \frac{ky(t)}{\omega_0^2} - \frac{1}{\omega_0^2}\left(\frac{d^2x}{dt^2} + 2h\frac{dx}{dt}\right) = x_{ст}(t) - \eta(t), \tag{9}$$

в котором $x_{ст}(t)$ – основная, или «статическая», компонента отклика, пропорциональная закону входного воздействия, а $\eta(t)$ – динамическая ошибка измерения, т.е. компонента, зависящая от частоты собственных колебаний и «маскирующая» основную составляющую. Из (9) видно, что точность измерения тем выше, чем больше член $\omega_0^2 x$ по сравнению с остальными двумя членами в левой части. Следует, однако, отметить, что при этом также снижается и чувствительность преобразователя, поскольку «статическая» компонента обратно пропорциональна ω_0^2. Условия, при выполнении которых обеспечивается требуемая точность измерения динамических процессов, сформулированы в известных работах академика А.Н. Крылова, например, [14].

При функционировании КДЦ выходной сигнал, помимо основной (информативной) составляющей, будет содержать паразитные компоненты (обусловленные распространением упругих волн по корпусу и блокам бортового оборудования), которые необходимо «отфильтровать». Это особенно относится к ракетам, имеющим большие продольные размеры. Фильтрация, естественно, может быть реализована и с помощью системы обработки, но представляет интерес оценка возможности простейшего варианта, т.е. использования самого сенсора как интегратора.

Помимо «фильтрации», т.е. сглаживания выходного сигнала, интегрирование может быть и рабочим, т.е. основным преобразованием. Например, может быть использован такой информативный признак цели, как падение (изменение) скорости боеприпаса при взаимодействии с преградой (такая ситуация характерна, например, для противокорабельной ракеты, пробивающей борт корабля или стенку берегового укрепления).

Если в левой части уравнения (8) доминирующим будет «диссипативный» член, т.е. демпфирующий элемент, сила сопротивления которого пропорциональна относительной скорости, то

$$x(t) = \frac{k}{2h}\int y(t)dt - \frac{1}{2h}\left(\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 \int x dt\right) = x_и(t) - \eta_и(t), \tag{10}$$

т.е. основной будет компонента $x_и(t)$, пропорциональная интегралу от входного воздействия, а $\eta_и(t)$ в данном случае – ошибка интегрирования. Из структуры динамической ошибки следует, что необходимо стремиться к уменьшению частоты собственных колебаний, т.е. преобразователь должен обладать большой инерционностью, что может быть достигнуто, например, за счет ослабления опоры сенсора. Кроме того, поскольку в состав ошибки входит производная отклика $x(t)$, то он должен представлять собой относительно медленно изменяющийся во времени процесс.

Для дальнейшего анализа воспользуемся спектральным (частотным) подходом. Согласно (8), передаточная функция преобразователя имеет вид

$$W(s) = \frac{k}{s^2 + 2hs + \omega_0^2}, \tag{11}$$

где s – оператор Лапласа. Соответственно, комплексный коэффициент передачи

$$W(j\omega) = \frac{k}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2j\omega h}$$

и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

$$K(\omega) = |W(j\omega)| = \frac{k}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + (2\omega h)^2}} = \frac{k}{\omega_0^2}\frac{1}{\sqrt{\left[1-(\overline{\omega})^2\right]^2 + (2\varepsilon\overline{\omega})^2}}, \tag{12}$$

где $\overline{\omega} = \omega/\omega_0$; $\varepsilon = h/\omega_0$ – коэффициент демпфирования. При $\overline{\omega} = 0$ имеем «статическое» значение частотной характеристики, т.е. $K(0) = k/\omega_0^2$.

Для идеального интегратора, согласно (11),

$$W_и(s) = \frac{k}{2hs};\; W_и(j\omega) = -j\frac{k}{2\omega h} = -j\frac{k}{\omega_0^2}\frac{1}{2\varepsilon\overline{\omega}};\; K_и(\omega) = W_и(j\omega) = \frac{k}{\omega_0^2}\cdot\frac{1}{2\varepsilon\overline{\omega}}. \tag{13}$$

Нормируя частотные характеристики (13) и (11) по $K(0)$, получим

$$\overline{K}(\overline{\omega})=\frac{1}{\sqrt{\left[1-(\overline{\omega})^2\right]^2+(2\varepsilon\overline{\omega})^2}}=\frac{1}{2\varepsilon\overline{\omega}}\frac{1}{\sqrt{1+\left[\dfrac{1-(\overline{\omega})^2}{2\varepsilon\overline{\omega}}\right]^2}}, \tag{14}$$

$$\overline{K}_и(\overline{\omega})=\frac{1}{2\varepsilon\overline{\omega}}. \tag{15}$$

Сравнивая (14) и (15), нетрудно заметить, что близость частотных характеристик «реальной» и идеальной интегрирующей систем обеспечивается в сравнительно узком диапазоне частот, в пределах которого $\overline{\omega}\approx 1$, или отношение $\left[1-(\overline{\omega})^2\right]/(2\varepsilon\overline{\omega})$ достаточно мало. На рисунках 7 и 8 показаны АЧХ, соответствующие выражениям (14) (кривая 1) и (15) (кривая *2*) при различных значениях ε. Наглядно видно, что по мере увеличения значения ε система постепенно утрачивает колебательные свойства и приближается к апериодической.

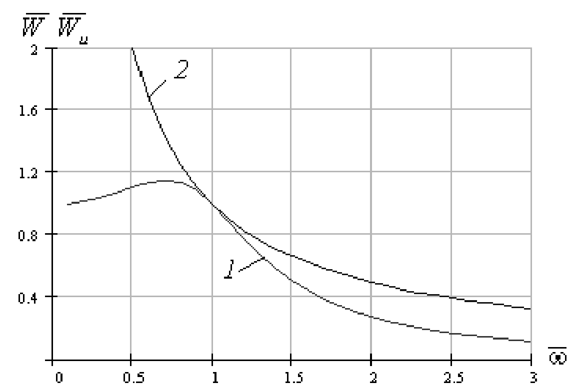


Рисунок 7 – АЧХ при $\varepsilon = 0{,}5$

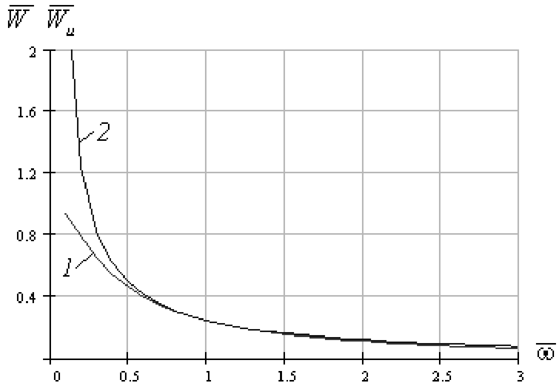


Рисунок 8 – АЧХ при $\varepsilon = 2{,}0$

Исходное уравнение преобразователя (8) приведем к безразмерному виду, введя следующие величины: статическое смещение $x_{ст}=ky_{max}/\omega_0^2$; $\overline{y}=y/y_{max}$; $\overline{x}=x/x_{ст}$; $\theta=\omega_0 t$; $\varepsilon=h/\omega_0$ – коэффициент демпфирования. В результате получим

$$\frac{d^2\overline{x}}{d\theta^2}+2\varepsilon\frac{d\overline{x}}{d\theta}+\overline{x}=\overline{y}(\theta). \tag{16}$$

Такая запись уравнения упрощает исследование, поскольку необходимо задать только форму (и временные параметры) внешнего воздействия, т.е. закон $\overline{y}(\theta)$ и варьировать значения коэффициента демпфирования. На рисунках 9 и 10 показаны закон в виде последовательности двух прямоугольных импульсов противоположного знака и результат точного интегрирования, соответственно, а на рисунке 11 – сигнал на выходе преобразователя ($\varepsilon = 2{,}0$). По осям координат отложены безразмерные величины (масштабы одинаковы). Видно, что сигнал близок по форме к «идеальной» кривой (рисунок 10), однако наблюдается характерный отрицательный «хвост» разрядного типа. Уровень этого отрицательного выброса может быть использован как критерий качества интегрирования, если на него наложить соответствующее ограничение. Кроме того, уровень этого сигнала почти в *5* раз меньше по сравнению с уровнем «идеального» сигнала. Из выражения (10) видно, что чувствительность датчика уменьшается по мере возрастания коэффициента демпфирования.

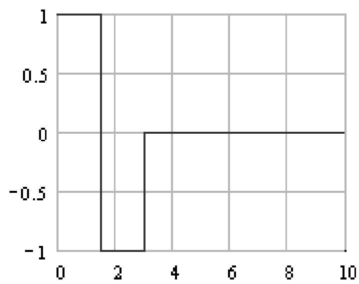


Рисунок 9 – Закон воздействия

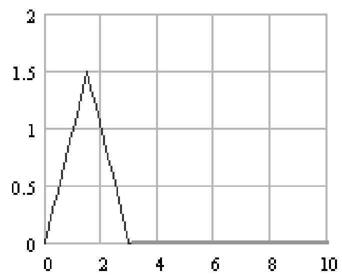


Рисунок 10 – Идеальное интегрирование

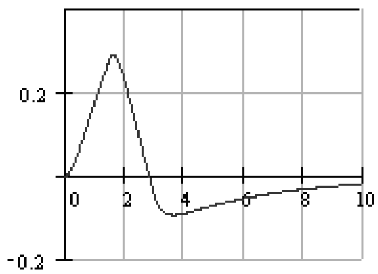


Рисунок 11 – Сигнал на выходе «реального» интегратора

При отсутствии члена $d^2\bar{x}/d\bar{t}^2$ в левой части (9) получается система первого порядка (апериодическое звено)

$$2\varepsilon \frac{d\bar{x}}{d\theta} + \bar{x} = \bar{y}(\theta),$$

в которой 2ε выполняет роль своеобразной постоянной времени. Уравнением данного типа, например, описывается схема замещения генераторного магнитоупругого преобразователя с одной обмоткой, обладающего четко выраженными интегрирующими свойствами [10], что подтверждает реальность решения поставленной задачи..

Заключение

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1) Сделано предположение, что влияние скорости и перемещения боеприпаса на процесс взаимодействия с преградой может быть учтено раздельно, путем введения

соответствующих функциональных множителей в выражение для силовой характеристики преграды.

2) Показано, что параметры начального участка процесса взаимодействия боеприпаса с преградой, являющегося основным с точки зрения функционирования КДЦ, могут быть выявлены на основе использования эмпирических формул для полного пути внедрения боеприпаса и экспериментально установленных фактов.

3) Предложены два способа аппроксимации начального участка силовой характеристики преграды, а именно: в виде кусочно-линейной зависимости силы сопротивления и зависимости текущей площади сечения головной части боеприпаса от его перемещения. Приведенный пример расчета КДЦ кассетного боевого элемента иллюстрирует применение предложенной методики.

4) Проанализирована возможность использования КДЦ интеграторного типа, позволяющего оценивать скорость боеприпаса после выхода в запреградное пространство и отфильтровывать колебательные наложения.

Данные результаты получены при приближенной, т.е. одномерной постановке задачи, когда траектория боеприпаса в преграде считается прямолинейной. Тем не менее, предложенная методика дает возможность достаточно адекватно оценивать работоспособность контактных датчиков цели, поскольку их срабатывание происходит в пределах начального участка (переднего фронта) закона силы сопротивления преграды, и, следовательно, с практической точки зрения влиянием искривления траектории снаряда при последующем внедрении в преграду можно пренебречь. Предложенный подход может быть использован и в случае более прочных преград, но в пределах ограниченного диапазона углов, отсчитываемых от нормали.

Список литературы

1. Сагомонян А.Я. Проникание (проникание твердых тел в сжимаемые сплошные среды). М.: Изд-во МГУ, 1974. 300 с.
2. Ионов В.Н. Прочность боеприпаса при взаимодействии с преградой. М.: Машиностроение, 1979. 423 с.
3. Велданов В.А., Наумов А.Н. Расчет характеристик пространственного проникания тел в сопротивляющиеся среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 24 с.
4. Сулин Г.А. Теоретические основы расчета сенсорных систем: учеб. пособие. СПб. : БГТУ («Военмех»), 2000. 64 с.

5. Средства поражения и боеприпасы: учебник / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; под ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
6. Андреев С.Г., Овчинников А.Ф., Охитин В.Н. Основы конструкции и действия боеприпасов. Ч. 1. Теория и расчет. М.: ЦНИИНТЭИ и ТЭИ, 1989. 155 с.
7. Третьяков Г.М. Боеприпасы артиллерии. М.: Воениздат, 1947. 536 с.
8. Прохоров Б.А. Боеприпасы артиллерии. М.: Машиностроение, 1973. 512 с.
9. Куров В.Д., Должанский Ю.М. Основы проектирования пороховых ракетных снарядов. М.: Оборонгиз, 1961. 294 с.
10. Ефремов А.К. Автономные информационные и управляющие системы. В 4 т. Т. 4. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. 330 с.
11. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов, А.А. Федосов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1977. 240 с.
12. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.
13. Пеллинец В.С. Измерение ударных ускорений. М.: Изд-во стандартов, 1975. 288 с.
14. Крылов А.Н. О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики, имеющих приложение в технических вопросах. 5-е изд. М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. 369 с.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Some features of calculating the response of contact target sensors of fuses

 # 08, August 2013

DOI: 10.7463/0813.0605972

Efremov A.K.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

efrak@mail.ru

In order to determine the initial stage of the interacting process between an explosive item and an obstruction, which is the most important for operation of contact target sensors (CTS), the author proposes two approaches to approximation of initial force characteristic of an obstruction; they were a piecewise function and a dependence of the explosive item's cross sectional area on displacement. In this process, empirical formulas for the full path of an explosive item's punching-in into an obstruction were used along with some experimentally derived facts. An example of calculating the response of the cluster ammunition element's CTS was given. The author considers a possibility of using an integrating type of CTS as a means of measuring the explosive item's speed after piercing an obstruction and filtering the imposed oscillations.

Publications with keywords: approximation, contact target sensor, initial phase of penetration, target force characteristic, empirical formulae, integrating type target sensor

Publications with words: approximation, contact target sensor, initial phase of penetration, target force characteristic, empirical formulae, integrating type target sensor

References

1. Sagomonyan A.Ya. *Pronikanie (pronikanie tverdykh tel v szhimaemye sploshnye sredy)* [The penetration (penetration of solid bodies into compressible continuous medium)]. Moscow, MSU Publ., 1974. 300 p.

2. Ionov V.N. *Prochnost' boepripasa pri vzaimodeystvii s pregradoy* [The strength of ammunition when interacting with a barrier]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 423 p.

3. Veldanov V.A., Naumov A.N. *Raschet kharakteristik prostranstvennogo pronikaniya tel v soprotivlyayushchiesya sredy* [Calculation of characteristics of spatial penetration of bodies into resisting medium]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 24 p.

4. Sulin G.A. *Teoreticheskie osnovy rascheta sensornykh system* [Theoretical basis of calculation of sensory systems]. St. Petersburg, BSTU (“Voenmekh”) Publ., 2000. 64 p.

5. Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F., et al. *Sredstva porazheniya i boepripasy* [Means of destruction and ammunition]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 984 p.

6. Andreev S.G., Ovchinnikov A.F., Okhitin V.N. *Osnovy konstruktsii i deystviya boepripasov. Ch. 1. Teoriya i raschet* [The basics of design and action of ammunition. Part. 1. Theory and calculation]. Moscow, TsNIINTEI Publ., 1989. 155 p.

7. Tret'iakov G.M. *Boepripasy artillerii* [Artillery ammunition]. Moscow, Voenizdat, 1947. 536 p.

8. Prokhorov B.A. *Boepripasy artillerii* [Artillery ammunition]. Moscow, Mashinostroenie, 1973. 512 p.

9. Kurov V.D., Dolzhanskiy Yu.M. *Osnovy proektirovaniya porokhovykh raketnykh snaryadov* [Bases of designing of propellant rockets]. Moscow, Oborongiz, 1961. 294 p.

10. Efremov A.K. *Avtonomnye informatsionnye i upravlyayushchie sistemy. V 4 t. T. 4* [Stand-alone information and control systems. In 4 vols. Vol. 4]. Moscow, OOO NITs «Inzhener», OOO «Oniko-M», 2011. 330 p.

11. Batuev G.S., Golubkov Yu.V., Efremov A.K., Fedosov A.A. *Inzhenernye metody issledovaniya udarnykh protsessov* [Engineering methods of research of percussive processes]. Moscow, Mashinostroenie, 1977. 240 p.

12. Osadchiy E.P., ed. *Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin* [Design of sensors for the measurement of mechanical values]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 480 p.

13. Pellinets V.S. *Izmerenie udarnykh uskoreniy* [Measurement of shock acceleration]. Moscow, Standards Publishing House, 1975. 288 p.

14. Krylov A.N. *O nekotorykh differentsial'nykh uravneniyakh matematicheskoy fiziki, imeyushchikh prilozhenie v tekhnicheskikh voprosakh* [On some differential equations of mathematical physics having application in technical matters]. Moscow, Leningrad, GITTL, 1950. 369 p.